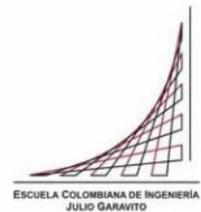


**Maestría en Ingeniería Civil.**

**Estado del arte en la impermeabilización de túneles en roca, casos,  
aplicaciones y recomendaciones.**

**Luis Alejandro Ruiz Piragauta.**

**Bogotá, D.C., Enero de 2018.**



**Estado del arte en la impermeabilización de túneles en roca, casos,  
aplicaciones y recomendaciones.**

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil,  
Énfasis en Geotecnia.**

**Luis Alejandro Ruiz Piragauta.  
Director. Ing. Ramiro Gutiérrez Rodríguez.**

**Bogotá, D.C, Enero de 2018.**



La tesis de maestría titulada; “Estado del arte en la impermeabilización de túneles en roca, casos, aplicaciones y recomendaciones”, presentada por el estudiante Luis Alejandro Ruiz Piragauta, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la tesis  
Ing. Ramiro Gutiérrez Rodríguez.

Diego Fernando Otero.  
Jurado

José Vicente Amórtegui Gil  
Jurado

Bogotá, D.C, Enero de 2018.

Dedicatoria.

A mi familia, por darme la tranquilidad, confianza y voluntad para sacar adelante mis propósitos.

Agradecimientos.

Al Ingeniero Ramiro Gutiérrez Rodríguez, por compartir todo su conocimiento y experiencia en el arte de la excavación y construcción de túneles.

En la empresa CIPSA, al Ing. Jorge Ladrón de Guevara por proveer los aditivos de cristalización Xipex y asesoría en la elaboración de muestras con este producto.

A la empresa ARGOS, al Ing. Eduardo Claros, por suministrar el cemento estructural utilizado en la mezcla.

A SIKA, al Ing. Oscar Ruiz, por facilitar los aditivos de impermeabilización utilizados.

En la empresa KAOLINK al sr Jose Santos por suministrar el mineral de Metacaolín utilizado.

En ASOCRETO al Ing. Camilo Ríos y Felipe, por facilitar sus instalaciones del Laboratorio para realizar las pruebas de permeabilidad en el Concreto y asesorías posteriores.

A la Ing Paola Acero, por su paciencia y sabios consejos para el desarrollo de los ensayos y el documento de Tesis.

## Resumen

Una obra de ingeniería geotécnica debe evaluar las incidencias al medio natural geológico desde sus fases iniciales; el nivel de escala y detalle será más riguroso en la medida del avance del proyecto. Para una excavación subterránea este proceso se hace indispensable, teniendo en cuenta las implicaciones económicas, sociales y ambientales que puede llegar a repercutir.

Durante el diseño y fases de planeación de los túneles, se evaluarán las características de la roca, génesis, mineralogía, edad, y otras propiedades. Además, el macizo donde se desarrollará el proyecto, teniendo en cuenta su ubicación frente al contexto dinámico de la corteza terrestre y los esfuerzos naturales por la cobertura o profundidad de la obra (carga litoestática), las presiones in situ inducidas por la tectónica, sismicidad y efectos dinámicos del área, que a su vez incidirán en la excavación y características constructivas del proyecto.

Así mismo, con la apertura y corte de la roca en profundidad; se generarán cambios en los esfuerzos naturales, reflejados en fenómenos de convergencia en el perímetro del túnel, corona, solera y hastiales de la obra. También se presentan fenómenos como: Sweeling, Squeezing, Rockburst y Creep, asociados a la mineralogía y génesis de los materiales, estos aspectos definirán el soporte y medidas de seguridad a incorporar en el proyecto.

Paralelamente, el agua es un factor a tener en cuenta, debido a la presión hidrostática o dinámica ejercida hacia el cuerpo del túnel, que afecta, altera y meteoriza la roca. Ya que la molécula de agua es un agente universal de disolución, puede iniciar reacciones químicas naturales, que conllevan a la desintegración y formación de canales donde el agua podrá ingresar y depositarse. Este proceso es común en la naturaleza ya que el agua en su estado líquido, sólido o gaseoso esculpe, talla y desintegra la roca; dando lugar a nuevos materiales sedimentarios, que pueden ser transportados como partículas suspendidas o que caen por gravedad.

Internamente en los macizos naturales los procesos de transmisión y almacenamiento del agua subterránea se encuentran ligados a las condiciones naturales donde los drenajes en superficie pueden recargar el sistema hidrogeológico o por el contrario son estos sistemas acuíferos los que alimentan y generan manantiales, donde se forman los afluentes.

Estas condiciones tendrán implicaciones en el proyecto de tunelería, ya que el agua es un recurso natural de gran valor estratégico; necesario para el consumo humano y de los animales en los procesos metabólicos; para la vegetación en los procesos de fotosíntesis, en actividades agrícolas, recreación y múltiples usos de industriales.

Bajo estas circunstancias, se engloba un proyecto de ingeniería de túneles, el cual debe enfocarse en el contexto geotécnico, ambiental; en el manejo y afectación de los recursos naturales, que trascenderá en aspectos sociales frente a la aceptación o no de las obras.

Adicionalmente, repercute en el aspecto económico, debido a la generación de empleo y la utilidad obtenida por los propietarios y usuarios del proyecto. Además, en la seguridad y salud para los trabajadores; identificando los escenarios de riesgo y peligros asociados en las diferentes fases de construcción, operación y mantenimiento de los túneles.

En el documento se describen los factores hidrogeológicos que afectan el flujo del agua subterránea, las diferentes variables y además conceptos generales de geología que se enmarcan en la mecánica de rocas.

Frente a esto, es esencial localizar las fugas potenciales y determinar la cantidad agua, de modo que se realicen trabajos de impermeabilización y sellado en los túneles. En el documento se presentan y evalúan los métodos de cuantificación del agua en una excavación subterránea, para las diferentes fases constructivas, en el cual se presenta un caso aplicativo del análisis de la cuantificación de la cantidad del agua subterránea para un proyecto.

Así mismo, se realiza la descripción de las técnicas de mitigación y control del agua subterránea, con diferentes elementos aplicados; evaluando su eficiencia y realizando pruebas de optimización de concretos impermeables, para su aplicación en obras bajo tierra.

Finalmente, se hace una síntesis, análisis y recomendaciones; de los principales elementos frente al control y manejo del agua en los túneles.

## Indice General.

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I – LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS.....	5
1.1. Historia de la tunelería.....	5
1.2. Planificación y diseño de las excavaciones.....	8
1.3. Características de los macizos naturales, asociadas al agua subterránea.....	11
1.3.1. Discontinuidades.....	11
1.4. Resistencia – deformación de los macizos naturales.....	11
1.5. Procedimientos constructivos.....	13
1.5.1. Construcción de portales.....	13
1.5.2. Sostenimiento.....	13
1.5.3. Excavación.....	15
Métodos de excavación.....	15
Medición de la convergencia.....	15
1.5.4. Control de la infiltración en los túneles.....	16
1.5.5. Impermeabilización de la excavación.....	17
1.5.6. Revestimiento definitivo.....	17
1.5.7. Equipamiento.....	18
1.6. Los proyectos subterráneos y la infiltración.....	18
1.6.1. Túneles Mineros.....	18
1.6.2. Túneles interconexión vial.....	19
1.6.3. Túneles carreteros.....	19
1.6.4. Túneles Férreos.....	19
1.6.5. Túneles Urbanos – Metro.....	20
1.6.6. Túneles Peatonales.....	20
1.6.7. Túneles Hidráulicos.....	21
1.6.8. Almacenes y refugios subterráneos.....	22

1.6.9. Estructuras subterráneas de Investigación y tecnología. ....	22
1.6.10. Futuro de los Túneles .....	25
CAPÍTULO II – HIDROGEOLOGIA ASOCIADA A LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS..	26
2.1. Geología. ....	27
2.1.1. La escala geológica .....	27
2.2. Morfología del territorio colombiano. ....	29
2.3. Evolución geológica de Colombia.....	30
2.4. Sistemas hidrogeológicos.....	36
2.4.1. Zonas aptas para el almacenamiento del agua subterránea.....	38
2.4.2. Barreras y fronteras de los sistemas acuíferos. ....	38
2.5. El ciclo hidrológico .....	38
2.6. Condiciones Climáticas. ....	40
2.6.1 La temperatura .....	42
2.6.1. Radiación solar. ....	42
2.6.2. Humedad Atmosférica. ....	43
2.6.3. Los Vientos. ....	43
2.6.4. Las precipitaciones. ....	43
2.6.5. La Evapotranspiración. ....	45
2.6.6. La Escorrentía. ....	45
2.6.7. La Infiltración. ....	46
2.6.8. Aguas Geológicas.....	46
2.7. La Molécula del Agua. ....	47
2.7.1. Propiedades físicas del agua.....	48
2.7.2. Tipos de agua. ....	49
2.7.3. Agua Meteórica.....	49
2.7.4. Agua Congénita. ....	49
2.7.5. Agua Juvenil. ....	49
2.7.6. Agua Superficial.....	49
2.7.7. Agua Subterránea.....	50

2.8. Minerales y calidad del Agua en la Naturaleza.....	50
2.8.1. Sólidos disueltos.....	50
2.8.2. Sílice.....	50
2.8.3. Hierro.....	51
2.8.4. Calcio.....	52
2.8.5. Magnesio.....	52
2.8.6. Sodio.....	53
2.8.7. Potasio.....	53
2.8.8. Carbonatos y bicarbonatos.....	54
2.8.9. Acidez del agua subterránea.....	54
2.8.10. Sulfatos.....	55
2.8.11. Cloruros.....	55
2.8.12. Nitratos.....	56
2.9. Parametros hidraulicos.....	58
2.9.1. Carga Total - Teorema de Bernoulli.....	58
2.9.2. Nivel piezómetro.....	60
2.9.3. Agua en reposo - condiciones hidrostáticas.....	60
2.9.4. Permeabilidad - Conductividad Hidráulica.....	61
2.9.5. Porosidad.....	64
Porosidad Primaria y secundaria.....	65
Porosidad Efectiva.....	66
2.9.6. Gradiente Hidráulico.....	66
2.9.7. Transmisividad o transmisibilidad.....	67
2.9.8. Coeficiente de almacenamiento.....	67
2.9.9. Homogeneidad e isotropía.....	69
2.10. Expresiones teóricas en el análisis del flujo del agua.....	71
2.10.1. Ley de Darcy.....	71
2.10.2. Número de Reynolds.....	74
2.10.3. Ecuación de continuidad para estado estacionario.....	75
2.10.4. Ecuación de Laplace.....	76
2.10.5. Ecuación de Poisson.....	77
2.10.6. Ecuación de flujo para régimen transitorio.....	78
2.10.7. Ley de Fick.....	79

2.11. Aspectos estructurales que controlan los sistemas acuíferos en rocas duras. ....	80
2.12. Zonas Impermeables. ....	82
2.13. Recarga Hidrogeológica. ....	82
2.14. Descarga Hidrogeológica. ....	83
2.15. Flujo del agua en los Macizos rocosos y subsuelo. ....	85
2.15.1. Flujo de agua en el subsuelo y superficie. ....	85
2.15.2. Flujo del agua en la zona no saturada. ....	86
2.15.3. Flujo del agua en la zona capilar. ....	86
2.15.4. Flujo de agua en la zona saturada. ....	86
2.16. Clasificación de los sistemas Acuíferos Subterráneos. ....	87
2.16.1. Formaciones acuíferas. ....	87
2.16.2. Estrato confinante. ....	87
2.16.3. Acuícludo. ....	87
2.16.4. Acuitardo. ....	87
2.16.5. Acuífugo. ....	88
2.17. Tipos de Acuíferos y su comportamiento. ....	88
2.17.1. Acuíferos Porosos. ....	89
2.17.2. Acuíferos Fisurados. ....	89
2.17.3. Acuífero Libre. ....	89
2.17.4. Acuífero Confinado. ....	90
2.17.5. Acuífero semiconfinados. ....	91
2.18. Geología asociada al potencial acuífero. ....	92
2.18.1. El agua subterránea en las rocas ígneas y metamórficas. ....	92
Rocas Metamórficas. ....	92
Intrusivos. ....	93
Flujos volcánicos y el agua subterránea. ....	94
Agua subterránea en cuerpos piroclásticos. ....	95
2.18.2. El agua subterránea en las rocas sedimentarias. ....	96
Sedimentos Consolidados. ....	96
Sedimentos no Consolidados. ....	97

Rocas Carbonatadas.....	98
2.19. Problemática del agua subterránea.....	98
<b>CAPÍTULO III - EXPLORACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....</b>	<b>102</b>
3.1. Evaluación cartográfica.....	103
3.2. Evaluación hidrológica.....	103
3.3. Exploración Geofísica – métodos indirectos.....	104
3.3.1. Geoeléctrica.....	104
3.3.2. Sísmica – Refracción, reflexión de ondas superficiales.....	105
3.3.3. Ensayos Downhole y crosshole.....	106
3.3.4. Técnica de inspección de la perforación.....	107
3.3.5. Técnicas geofísicas Aéreas.....	108
3.3.6. Técnicas de exploración directa.....	108
3.3.7. Perforaciones.....	109
3.3.8. Ensayos de Bombeo.....	109
Ensayos de Inyección.....	110
Ensayos Lugeon.....	111
Evaluación de la permeabilidad para terrenos estratificados.....	112
Ensayos con Trazadores.....	113
3.3.9. Caracterización hidrogeoquímica.....	113
3.3.10. Métodos de laboratorio.....	114
3.3.11. Técnicas de medición de parámetros geomecánicos durante el avance del túnel.....	115
3.3.12. Pruebas Hidráulicas en la excavación.....	116
Ensayos a sondeo único.....	117
Ensayos de interferencia.....	117
Ensayos de extracción finita o de bombeo con caudal constante.....	118
Ensayo de Slug o cuchareo.....	118
Ensayo de Pulso.....	119
<b>CAPITULO IV. ANÁLISIS DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA.....</b>	<b>120</b>
4.1. Estado Constante - estacionario.....	121

4.1.1. Método de Goodman.....	122
4.1.2. Método de Heuer.....	124
4.1.3. Método de Lei.....	125
4.1.4. Método El Tani.....	126
4.2. Régimen transitorio.....	126
4.2.1. Solución de Jacob y Lohman (1952).....	127
4.2.2. Solución de Perrochet para túneles o pozos de descarga.....	128
4.2.3. Solución Renard (2005), para un túnel infinito en un acuífero confinado ideal.....	132
4.2.4. Kawechi y Low (2000).....	133
4.2.5. Solución semiempírica de Goodman.....	135
4.3. Modelación de los sistemas hidrogeológicos.....	136
4.3.1. Parámetros adicionales de los modelos.....	138
4.3.2. Modelo Hidrogeológico conceptual.....	138
4.3.3. Análisis con modelos finitos.....	140
CAPÍTULO V. NORMATIVAS Y DIRECTRICES PARA EL CONTROL DEL AGUA EN LAS EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS.....	142
5.1. Directivas Europeas.....	142
5.2. Referencias transnacionales.....	145
5.3. Norte América.....	145
5.4. Latinoamérica.....	146
5.5. Instituciones de tunelería.....	148
5.6. Unidades de medida.....	148
5.7. Requerimientos de impermeabilización en túneles.....	148
5.8. Calificación del nivel de riesgo por irrupción de agua en un túnel - SGR.....	154
CAPÍTULO VI - CONTROL DEL AGUA EN LOS TÚNELES DE ROCA.....	157

6.1. Control del agua en los tuneles.....	160
6.2. Elementos o sistemas de drenaje.....	165
6.2.1. Características del revestimiento.....	166
6.2.2. Sistema Obershasli.....	168
6.2.3. Perforaciones de alivio.....	169
6.3. Impermeabilización de tuneles.....	169
6.3.1. Sistemas básicos de impermeabilización parcial de túneles.....	172
6.3.2. Categorías de impermeabilización.....	173
Impermeabilización preliminar.....	175
Impermeabilización Intermedia.....	176
Impermeabilización Principal.....	176
Técnicas de mantenimiento o reparación de las obras de impermeabilización.....	178
Impermeabilización temporal.....	178
6.3.3. Requerimientos de los elementos en el proceso constructivo.....	178
6.3.4. Características en el diseño de los elementos de impermeabilización.....	179
6.3.5. Requisitos para el personal y medio ambiente.....	180
6.4. Materiales y elementos de impermeabilización.....	180
6.4.1. Concreto Impermeable.....	181
Cementante.....	181
Agregados.....	182
Agua.....	182
Características del concreto.....	182
Concreto resistente al agua, aditivos o resinas.....	184
Aditivos impermeabilizantes.....	185
Fibras.....	186
Elaboración del concreto en los túneles.....	186
6.4.2. Material de Bitumen o Asfalto.....	187
Instalación del material de Bitumen.....	188
6.4.3. Capas impermeabilizantes de polímeros – Membranas.....	189
Instalación.....	190
Juntas de sellado.....	193
Elementos de unión e inspección.....	193

Arandelas o discos de soporte.....	193
Elementos de fijación.....	194
Herramientas de soldadura.....	195
Parches.....	195
6.4.4. Materiales de impermeabilización proyectados.....	196
6.4.5. Materiales de impermeabilización Metálicos.....	199
6.4.6. Capas de materiales epóxicos.....	199
6.4.7. Geles polímero de caucho.....	199
6.4.8. Geotextiles.....	200
6.4.9. Sistemas impermeabilización especiales.....	201
6.5. Control de la infiltración con técnicas de mejoramiento del terreno.....	203
6.5.1. Inyecciones.....	203
6.5.2. Pre Inyecciones.....	204
6.5.3. Post Inyecciones.....	206
6.5.4. Características de las soluciones cementicias en las inyecciones.....	206
Soluciones de Bentonita.....	207
Soluciones de Puzolanas.....	208
Soluciones Químicas.....	208
Soluciones a base de silicato.....	209
6.5.5. Equipos.....	209
CAPÍTULO VII - ENSAYOS EN CONCRETO IMPERMEABLE APLICADO A TÚNELES.....	210
7.1. Recomendaciones en la selección del tipo de ensayos.....	211
7.1.1. Otros requerimientos.....	213
7.2. Elaboración de los especímenes de concreto.....	213
7.2.1. Preparación de la probeta.....	213
7.2.2. Referencias.....	214
7.2.3. Herramientas y equipos.....	215
7.3. Características de los materiales de la mezcla.....	215
7.3.1. Características de los agregados (grava / arena).....	216
7.3.2. Características del cemento.....	217
7.3.3. Diseño de la mezcla.....	217

7.3.4. Especímenes de concreto elaborados. ....	221
7.3.5. Características de los aditivos utilizados. ....	229
Metacaolín. ....	229
Materiales de cristalización. ....	231
Otros aditivos comerciales. ....	233
7.4. Ensayo de infiltración de Agua a presión en el Concreto. ....	234
7.4.1. Preparación de la probeta. ....	234
7.4.2. Características del montaje y equipos de ensayo. ....	235
7.4.3. Procedimiento de ensayo. ....	236
7.4.4. Características de las muestras y resultados. ....	239
7.5. Pruebas para determinar la gravedad específica, absorción y vacíos en el Concreto. ...	245
7.6. Resultados obtenidos en los ensayos. ....	248
7.7. Evaluación de los resultados. ....	252
CAPÍTULO VIII – CASO DE ANÁLISIS FLUJO DE AGUA EN TÚNEL DE ROCA. ....	258
8.1. Características generales. ....	259
8.1.1. Geología Básica. ....	260
8.1.2. Geomecánica. ....	261
8.2. Obras de impermeabilización y manejo del agua subterránea. ....	262
8.3. Aguas de infiltración. ....	262
8.3.1. Retro análisis de los valores de infiltración en el túnel. ....	263
Método análisis retrospectivo con la expresión de Goodman. ....	266
Análisis de acuerdo a la expresión (Perrochet & Dematteis, 2007). ....	267
Análisis aplicando la metodología propuesta por (Aliaga, 2015). ....	268
Métodos numéricos. ....	273
Análisis de los resultados por las diferentes metodologías. ....	276
8.3.2. Evaluación de medidas de mejoramiento. ....	278
Inyecciones de mejoramiento. ....	278
8.4. Otros casos Históricos evaluados. ....	282

CAPÍTULO IX – CONCLUSIONES.....	A
Recomendaciones .....	e
CAPÍTULO X - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	A

## Índice de tablas.

Tabla 1. Túneles más representativos del mundo.....	23
Tabla 2. Tasas de precipitación, evapotranspiración escorrentía por continente. ....	40
Tabla 3. Densidad del agua a diferentes temperaturas.....	48
Tabla 4. Viscosidad y temperatura del agua. (Verruijt, 1970).....	48
Tabla 5. Tiempo de residencia de agua diferentes estados y ambientes naturales. ....	50
Tabla 6. Clasificación Meinzer para recarga subterránea .....	84
Tabla 7. Características de los sistemas acuíferos frente al agua.....	88
Tabla 8. Propiedades de rocas piroclásticas en rocas de Nevada, USA. (Keller, 1960). ....	95
Tabla 9. Coeficientes de permeabilidad y porosidad para rocas sedimentarias (Davis, 1967).....	96
Tabla 10. Valores de porosidad y permeabilidad en materiales no consolidados (Davis, 1967).....	97
Tabla 11. Causas y consecuencias de los problemas con el agua subterránea.....	100
Tabla 12. Criterios técnicos para identificar zonas potenciales de ocurrencia de agua subterráneas.....	103
Tabla 13. Permeabilidades asociadas a los diferentes valores Lugeon y su precisión .....	112
Tabla 14. Normativas y directrices Alemanas.....	142
Tabla 15. Normativas y directrices Austriacas.....	142
Tabla 16. Normativas y directrices Suizas.....	143
Tabla 17. Normativas y directrices de Noruega.....	143
Tabla 18. Normativas y directrices de Italia. ....	143
Tabla 19. Normativas y directrices de España. ....	143
Tabla 20. Reino Unido. ....	144
Tabla 21. Otras referencias en el mundo.....	144
Tabla 22. Directrices de la Unión Europea .....	145
Tabla 23. Directrices Estados Unidos.....	145
Tabla 24. Directrices Chile.....	146
Tabla 25. Directrices México.....	146
Tabla 26. Directrices Perú.....	147
Tabla 27. Directrices Colombia.....	147
Tabla 28. Otros referentes latinoamericanos.....	147
Tabla 29. Guías y manuales institucionales .....	148
Tabla 30. Gran Bretaña, Clasificación del tipo de impermeabilización. (CIRIA 1979) .....	149
Tabla 31. Grados de impermeabilidad de acuerdo al uso del proyecto. ....	149
Tabla 32. Clasificación Germana, razón de infiltración permitida, de acuerdo al uso del proyecto, Instituto Otto-Graf (Haack 1991).....	151
Tabla 33. Niveles de impermeabilización en túneles ferroviarios de Alemania. (Haack 1991).....	151
Tabla 34. Propuesta STUVA de determinar las fugas de agua en Alemania, (Haack 1991).....	152

Tabla 35. Clasificación de la Estanqueidad, Deutsche Bahn AG (Ferrocarril Alemán) e Instalaciones subterráneas, (AITES 2001). .....	152
Tabla 36. Flujo de agua permisible en varias ciudades de Estados Unidos, Bélgica, Australia. (Haack 1991) .....	153
Tabla 37. Definición de impermeabilidad para el diseño de túneles y galerías Norma UNE - 104424....	153
Tabla 38. Factor $S_3$ – Zonas de falla, calificación de peligrosidad de agua subterránea.....	155
Tabla 39. Clasificación SGR para el ingreso de aguas subterráneas a los túneles.....	156
Tabla 40. Tipos de flujo que ingresan a las cavidades subterráneas.....	158
Tabla 41. Medidas de control del agua en los túneles. ....	165
Tabla 42. Selección de impermeabilización debido al tipo de infiltración.....	170
Tabla 43. Escenarios típicos de la impermeabilización y control de agua en túneles.....	171
Tabla 44. Sistemas básicos de manejo de agua e impermeabilización de los túneles.....	172
Tabla 45. Selección del sistema de impermeabilización subterráneo.....	174
Tabla 46. Características de las membranas impermeabilizantes. ....	190
Tabla 47. Propiedades mecánicas e hidráulicas mínimas del geotextil, según el tipo de túnel.....	200
Tabla 48. Propiedades estimadas de los agregados utilizados.....	216
Tabla 49. Contenido de aire atrapado frente a granulometría gruesa.....	217
Tabla 50. Proporción de agua de acuerdo al TMN y Asentamiento requerido para la obra .....	218
Tabla 51. Asentamientos de cono recomendados para diversos tipos de construcciones.....	218
Tabla 52. Cantidad de materiales en la mezcla para la elaboración de concreto. ....	220
Tabla 53. Especificaciones de las varillas compactadoras en relación con el diámetro del cilindro.....	223
Tabla 54. Dimensiones de cilindros evaluados en los ensayos de resistencia. ....	226
Tabla 55. Valores de resistencia obtenidas en los ensayos de compresión. ....	226
Tabla 56. Módulo de elasticidad Mezclas Metacaolín para concreto con relación A/C=0.4. ....	231
Tabla 57. Relación de permeabilidad en concreto con el coeficiente de permeabilidad y profundidad de penetración. ....	237
Tabla 58. Valores obtenidos en los especímenes de concreto elaborado. ....	250
Tabla 59. Efectos de la edad en el coeficiente de permeabilidad, con pastas A/C=0.51.....	252
Tabla 60. Parámetros de la roca intacta de los tipos de roca encontrados en el túnel. ....	261
Tabla 61. Valores de Infiltración, excavación y niveles piezométricos registrados durante la obra.....	263
Tabla 62. Valores obtenidos en el análisis retrospectivo bajo la expresión de Goodman. ....	266
Tabla 63. Valores asignados al código Tun Flow 1.0 – Solución Perrochet - . Dematteis (2007). ....	268
Tabla 64. Valores de conductividad hidráulica de acuerdo a las diferentes categorías de macizo. ....	269
Tabla 65. Condición de discontinuidades y características del macizo por cada tramo evaluado.....	269
Tabla 66. Valores obtenidos a partir de la calificación del macizo, de acuerdo a la metodología propuesta por Aliaga. ....	271
Tabla 67. Valores de rendimiento específico en rocas graníticas y gneises .....	271

Tabla 68. Valores de infiltración estimados acuerdo a la metodología propuesta por (Aliaga, 2015). ....	272
Tabla 69. Parámetros asignados y resultados de caudal para cada tramo evaluado.....	276
Tabla 70. Valores asignados a la formulación para estimar los valores de infiltración en los diferentes tramos. ....	279
Tabla 71. Proyectos subterráneos Nacionales evaluados.....	282
Tabla 72. Proyectos subterráneos Internacionales evaluados. ....	285

## Índice de figuras

Figura 1. Historia de la tunelería.....	5
Figura 2. Elementos en la planificación de las estructuras subterráneas.....	8
Figura 3. Consideraciones generales diseño y construcción de túneles.....	10
Figura 4. Esquemas de comportamiento de las rocas frente a los esfuerzos.....	12
Figura 5. Parámetros en la evaluación de las propiedades de la roca.....	12
Figura 6. Excavación y cortes a cielo abierto en zona de portal de Túnel.....	13
Figura 7. Sección típica de medidas de convergencia.....	16
Figura 8. Infiltración en una excavación subterránea.....	17
Figura 9. Galerías de comunicación y cámara de explotación minera.....	18
Figura 10. Proyecto Túnel bidireccional Kachotis, Primavera – Medellín, Antioquia.....	19
Figura 11. Proyecto ferroviario Túnel Seikan - Japón.....	20
Figura 12. Inspección, sistema almacenamiento de agua Chicago – USA.....	21
Figura 13. Esquema Central Hidroeléctrica Subterránea.....	21
Figura 14. Proyecto Tau Shat Wan Túnel - Explosivos Magazín.....	22
Figura 15. Proyecto CERN, estructura subterránea.....	23
Figura 16. Proyecto Hallansas, Suecia, revestimiento en dovelas y geomembranas.....	25
Figura 17. Estructura interna de la Tierra.....	26
Figura 18. Etapas del tiempo Geológico.....	27
Figura 19. Cinturones montañosos, plataformas estables y escudos de la corteza terrestre.....	28
Figura 20. Ciclos de las Rocas.....	29
Figura 21. Aspectos Fisiográficos del territorio Colombiano. 1 - Llanos Orientales. 2 - Región Andina. 3 - Región Caribe. (INGEOMINAS, Proyecto: C01R01 - Investigación y Monitoreo de la Actividad Sísmica y Volcánica, 2001).....	30
Figura 22. Vectores de deformación y desplazamiento placas tectónicas en el país. (INGEOMINAS, Proyecto: C01R01 - Investigación y Monitoreo de la Actividad Sísmica y Volcánica, 2001).....	32
Figura 23. Mapa Geológico Simplificado de los Andes Colombianos. Toussaint, 1993. (Duque, 2007). Aspectos Geofísicos y Amenazas Naturales en los Andes de Colombia, 1er congreso internacional de desempeño humano en altura.....	33
Figura 24. Mapa Geológico de Colombia con fines Hidrogeológicos. (INGEOMINAS, Programa de Exploración de Aguas Subterráneas, 2004).....	35
Figura 25. Aguas subterráneas en el sistema global.....	36
Figura 26. Provincias Hidrogeológicas de Colombia.....	37
Figura 27. Ciclo Hidrológico.....	39
Figura 28. Diagrama idealizado de la circulación del aire en la superficie terrestre.....	40
Figura 29. Transferencia de temperatura en condiciones Normales y debido al Niño.....	41
Figura 30. Generación y descarga de la precipitación.....	44

Figura 31. Procesos evapotranspiración, intercambio de agua a la atmosfera - suelo.....	45
Figura 32. Diferencias de concentración de sólidos disueltos en la escorrentía superficial en función del tipo de roca (Walling, 1980). Fuente: (Appelo & Postma, 2005). Geochemistry, groundwater and pollution, pág. 55 .....	46
Figura 33. Configuración geométrica típica de la molécula dipolar del agua (H <sub>2</sub> O), con el átomo de oxígeno en un ángulo de 105°. (Clark, 2015). .....	47
Figura 34. Distribución del agua en el planeta. (USGS, The water cycle, 2016) <sup>3</sup> .....	49
Figura 35. Reacciones oxido reducción en el agua, iones de Hierro .....	51
Figura 36. Ciclo del Nitrógeno. ....	56
Figura 37. Diagrama Piper de los diferentes tipos de agua y sus iones asociados. ....	57
Figura 38. Espacios en la estructura de los cuerpos consolidados (derecha) y no consolidados (izquierda) .....	58
Figura 39. Esquema Teorema de Bernoulli .....	59
Figura 40. Nivel piezómetro .....	60
Figura 41. Definición de conductividad Hidráulica. ....	62
Figura 42. Conductividad hidráulica de diferentes paquetes rocosos. ....	62
Figura 43. Valores de conductividad hidráulica para varios paquetes de Roca.....	63
Figura 44. Empaquetamiento de granos y distribución granulométrica. ....	64
Figura 45. Tipos de porosidad para los paquetes de roca. ....	65
Figura 46. Características primarias y secundarias de las rocas .....	66
Figura 47. Coeficiente de almacenamiento. (Espinoza, 2004).....	67
Figura 48. Liberación de agua en un sistema acuífero confinado. ....	68
Figura 49. Formaciones no homogéneas. ....	69
Figura 50. Sistemas hidrogeológicos homogéneos y anisotrópicos.....	70
Figura 51. Configuraciones de los sistemas acuíferos. ....	70
Figura 52. Experimento de Darcy .....	71
Figura 53. Flujos de agua en un medio .....	72
Figura 54. Representación del paso del agua en un modelo hidrogeológico.....	74
Figura 55. Características de flujo de agua de acuerdo al número de Reynolds.....	75
Figura 56. Volumen de control y flujo de agua en medio poroso. ....	75
Figura 57. Bloque esquemático en la deducción de Poisson. ....	77
Figura 58. Bloque esquemático en la proposición de un flujo transitorio. ....	78
Figura 59. Transporte por dispersión, el agua fluye por un medio poroso como el suelo.....	79
Figura 60. Características de las discontinuidades frente a la infiltración de agua.....	81
Figura 61. Acuíferos formados por la erosión.....	82
Figura 62. Esquema de flujo de agua subterránea y zonas de recarga.....	83
Figura 63. Esquema de descarga hidrogeológica en los macizos naturales .....	84

Figura 64. Líneas de flujo y recarga superficial .....	85
Figura 65. Zonas de un terreno donde puede fluir el agua.....	86
Figura 66. Características de los acuíferos según su estructura y funcionamiento. ....	88
Figura 67. Acuífero no confinado o libre. ....	89
Figura 68. Acuífero confinado o artesiano. ....	90
Figura 69. Acuífero en zonas coladas de lava.....	90
Figura 70. Acuífero confinado cuenca intermontana .....	91
Figura 71. Acuífero Colgado .....	91
Figura 72. Basamentos intrusivos aflorando en superficie y recargan sistemas aluviales .....	94
Figura 73. Estratos y flujos de lava interacción con las recarga subterránea. ....	94
Figura 74. Depósitos no consolidados sobre lechos de roca erosionados. ....	98
Figura 75. Problemática ambiental global. (Taniguchi & Hiyama, 2014).....	99
Figura 76. Estimación de recarga de agua subterránea (mm/año) (Doll et al. 2002) .....	100
Figura 77. Características de resistividad de diferentes grupos de roca.....	105
Figura 78. Sísmica de reflexión en unidad estratificada .....	106
Figura 79. Características de resistividad de diferentes grupos de roca.....	107
Figura 80. Perfil de tomografía ferrocarril. (ITALFERR y GEOINVEST, 2005) .....	108
Figura 81. Disposición de sondeos exploratorios poco correcta. ....	109
Figura 82. Disposición de sondeos exploratorios correcta .....	109
Figura 83. Esquema típico de ensayo de bombeo .....	110
Figura 84. Configuración para ensayos Lugeon con uno (izquierda) y dos obturadores (derecha) .....	111
Figura 85. Flujo perpendicular a la estratificación. ....	112
Figura 86. Montaje equipo para medición en cabeza variable. ....	114
Figura 87. Permeámetro de cabeza variable.....	115
Figura 88. Disposición de sensores y fuentes durante la ejecución de un túnel y en la Tuneladora.....	116
Figura 89. Valores reportados de pruebas Hidráulicas Túnel Forsmark. ....	117
Figura 90. Ensayo a sondeo Único.....	117
Figura 91. Ensayo de interferencia. ....	118
Figura 92. Ensayo Slug o Cuchareo.....	119
Figura 93. Relación entre los tipos de terreno, fugas, presión de aguas subterráneas .....	120
Figura 94. Régimen estacionario de un túnel .....	121
Figura 95. Flujo constante para un acuífero confinado en la pared de un pozo .....	122
Figura 96. Diagrama de Goodman – régimen constante.....	123
Figura 97. Histograma hipotético de pruebas de perforación exploratoria en un túnel. Heuer, 1995. ....	124
Figura 98. Interpretación del peso de las diferentes variables bajo esta metodología. ....	125
Figura 99. Estado Transitorio, cambios en el nivel de agua con el tiempo .....	126
Figura 100. Esquema de flujo descarga constante. ....	128

Figura 101. Esquema de la descarga específica para una excavación progresiva. ....	129
Figura 102. Túnel siendo excavado en diferentes litologías, Perrochet y Dematteis, 2007.....	131
Figura 103. Modelo Kawecki, flujo lineal temprano. ....	133
Figura 104. Modelo Goodman de flujo variable. ....	135
Figura 105. Diagrama de Flujo Exploración aguas subterráneas.....	136
Figura 106. Esquema del modelamiento de acuíferos. ....	137
Figura 107. Variables que afectan los modelos hidrogeológicos .....	138
Figura 108. Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	139
Figura 109. Esquema de malla de elementos finitos a) Red diferencias finitas. b) Supuesto del sistema Acuífero.....	140
Figura 110. Valores de infiltración frente a especificaciones requeridas .....	150
Figura 111. Extensión de la zona plástica p, distribución de la presión hidráulica. a) Permeabilidad muy baja del macizo. b) Alta permeabilidad, fracturación, sin tratamiento del terreno.....	157
Figura 112. Daños por filtración de agua en placa de concreto, corrosión de acero instalado como refuerzo de la placa en un muro de estabilización. ....	158
Figura 113. Afectaciones del agua en el túnel. a) Inestabilidad en el frente de avance. b) Falla en el arco del túnel. c) Subsistencia. d) Esfuerzos en la zona de mejoramiento por inyecciones. e) Presiones hidráulicas y del terreno. f) Fenómenos de hinchamiento en pisos y paredes del túnel.....	160
Figura 114. Principios básicos para el control del agua en túneles. ....	161
Figura 115. Características de manejo de aguas en los túneles.....	162
Figura 116. Túnel Estanco.....	162
Figura 117. Túnel Drenado. ....	163
Figura 118. Túnel con inyecciones e impermeabilización parcial del revestimiento. ....	164
Figura 119. Túnel con drenaje e inyecciones de consolidación. ....	164
Figura 120. Sistema control del agua, solución drenada.....	165
Figura 121. Sistemas de control y drenaje del túnel.....	167
Figura 122. Conexiones desde las membranas, drenes laterales hacia el colector principal.....	167
Figura 123. Características del pozo, conexión con el sistema colector principal del túnel.....	168
Figura 124. Sistema Oberhasli para drenaje de Tuneles .....	168
Figura 125. Tecnicas de control de surgencias puntuales en un túnel. ....	169
Figura 126. Características y perfil típico de la impermeabilización principal en el túnel. ....	173
Figura 127. Características de los niveles de impermeabilización de túneles. ....	174
Figura 128. Características y perfil típico de la impermeabilización principal en el túnel. ....	175
Figura 129. Configuraciones típicas de revestimiento de tuneles.....	176
Figura 130. Sistema de impermeabilización en túneles (en sándwich).....	177
Figura 131. Sistemas de Impermeabilización de Túneles, de acuerdo a los materiales. ....	181
Figura 132. Proporciones de materiales en el concreto .....	181

Figura 133. Filtración de agua en los especímenes de concreto con respecto a la edad del concreto...	183
Figura 134. Grietas en el concreto.....	185
Figura 135. Medición de la infiltración de agua en el Concreto.....	186
Figura 136. Características de la logística para la colocación del concreto in situ.....	187
Figura 137. Técnicas antiguas de aplicación del Bitumen como revestimiento.....	189
Figura 138. Características en la impermeabilización con membranas.....	190
Figura 139. Impermeabilización con membrana de plástico de una sola capa en los lados y la corona.	191
Figura 140. Elementos de fijación, soldadura y anclaje de la membrana al macizo.....	191
Figura 141. Instalación de tubos de hormigón en la zona de corona del túnel.....	192
Figura 142. Características de los solapes entre las capas de impermeabilización.....	192
Figura 143. Esquema típico de la instalación de andamios para la colocación de las membranas y elementos de impermeabilización.....	193
Figura 144. Fijación de las membranas con elementos de soporte.....	194
Figura 145. Tipos de soldaduras en el solape de las capas de impermeabilización.....	195
Figura 146. Irregularidades permisibles de impermeabilización en el soporte.....	195
Figura 147. Requisitos de soporte para la fijación de las membranas.....	196
Figura 148. Esquema de rociado con equipos mecánicos del sistema de revestimiento.....	197
Figura 149. Impermeabilización con resina, sobre los elementos de soporte.....	197
Figura 150. Características Granulométricas propuestas en la mezcla de hormigón proyectado.....	197
Figura 151. Montaje típico en las tareas de lanzado de concreto.....	198
Figura 152. Variables que rigen la durabilidad en el concreto lanzado.....	199
Figura 153. Sistema de impermeabilización compartimentado WATERSTOP e inyectores a través del hormigón de revestimiento.....	201
Figura 154. Sistema de impermeabilización Activo de Control e inyectores para control de vacío través del hormigón de revestimiento.....	202
Figura 155. Sistema Anchor.....	202
Figura 156. Inyecciones de lechada impermeabilizante en el anillo de roca fracturado en el túnel.....	203
Figura 157. Preinyección y post – inyección de una sección del túnel – Planta.....	204
Figura 158. Distribución de la presión hidráulica alrededor de la excavación.....	205
Figura 159. Métodos de mejoramiento progresivo del túnel, tipo paraguas e inyecciones progresivas..	206
Figura 160. Actividades y elementos utilizados para caracterizar los materiales de la mezcla.....	214
Figura 161. Fuente de materiales de agregados rio Somondoco.....	216
Figura 162. Resistencia a compresión frente a la relación Agua / cemento.....	219
Figura 163. Granulometría del material, rangos de optimización frente a la mezcla.....	220
Figura 164. Dimensiones del molde para preparación del espécimen.....	222
Figura 165. Marquillas de identificación de los especímenes elaborados.....	224
Figura 166. Valores de carga máxima para los diferentes especímenes evaluados.....	227

Figura 167. Zona de extracción de Metacaolín de la empresa Easycem, Oiba – Santander. ....	230
Figura 168. Impermeabilización del concreto por cristalización. ....	232
Figura 169. Dispositivo y esquema típico del montaje .....	234
Figura 170. Profundidad de infiltración del agua en los diferentes especímenes de concreto ensayados. .....	238
Figura 171. Profundidad de infiltración del agua en especímenes prefisurados, y que posterior al curado se impregnaron con soluciones de aditivos de cristalización. ....	240
Figura 172. Profundidad de infiltración del agua en las muestras patrón para la mezcla elaborada.....	240
Figura 173. Profundidad de infiltración del agua en especímenes con adición de metacaolín.....	241
Figura 174. Profundidad de infiltración del agua en especímenes aditivos por Cristalización.....	242
Figura 175. Características de concreto agrietado con medidas de mejoramiento con aditivos .....	243
Figura 176. Profundidad de infiltración del agua en especímenes agrietados y con procesos de tratamiento con aditivos por cristalización. ....	244
Figura 177. Profundidad de infiltración del agua en especímenes con fibras, A/C=0.45.....	245
Figura 178. Valores de Porosidad de los especímenes evaluados.....	249
Figura 179. Valores de permeabilidad frente a la infiltración obtenida de los especímenes evaluados. .	251
Figura 180. Valores de Permeabilidad estimados para cada espécimen elaborado. ....	252
En la Figura 181, se presenta la relación de la edad del concreto frente a los valores de infiltración obtenidos, con el avance en la maduración del espécimen ocurrirá una disminución en los valores de permeabilidad de acuerdo a (Neville, 2011), en tiempos de curado mayores a 28 días, para la relación A/C= 0.49 con aditivos por cristalización se obtuvieron tasas de conductividad del orden de $1E^{-13}$ m/seg, menores que las establecidas para concretos comunes.....	253
Figura 182. Edad de los especímenes frente a valores de infiltración reportados.....	254
Figura 183. Valores de Infiltración al agua, recomendaciones a/c fabricantes y calificación NTC 4483 .	255
Figura 184. Sección geométrica de la excavación. ....	258
Figura 185. Características constructivas y colocación del revestimiento del túnel.....	259
Figura 186. Perfil topográfico, geológico y tipos de terrenos del túnel.....	260
Figura 187. Características del macizo, intercalación de los diferentes paquetes de roca.....	261
Figura 188. Irrupción de agua subterránea en uno de los tramos del proyecto. ....	262
Figura 189. Valores de caudal acumulado y tramos definidos para el proyecto. ....	264
Figura 190. Tramos definidos para la excavación. ....	265
Figura 191. Límites del modelo y geometría de la excavación, generada por el código RS <sup>2</sup> . ....	273
Figura 192. Parámetros de la litología del macizo, de acuerdo al programa RocLab.....	274
Figura 193. Ubicación de las condiciones de presión hidráulica asignadas para el macizo y túnel. ....	275
Figura 194. Rangos de permeabilidad para los diferentes tramos del túnel. ....	276
Figura 195. Curva base de caudal de infiltración reportada frente los valores de conductividad de cada tramo por cada método de análisis.....	277

Figura 196. Parámetros de inyección para evaluar las tasas de infiltración en el túnel.....	279
Figura 197. Valores de infiltración estimados de acuerdo a diferentes espesores de la zona inyectada (t) y características de mejoramiento en los valores de conductividad hidráulica. ....	280
Figura 198. Efectividad de los valores de infiltración frente a espesor de la zona inyectada. ....	280
Figura 199. Valores registrados de infiltración ( $m^3/seg/ml$ ) frente a cobertura para los proyectos del país investigados. ....	283
Figura 200. Características de revestimientos en algunos proyectos del país.....	284
Figura 201. Especificaciones Técnicas frente a caudales de infiltración reportados. ....	286

## **Introducción.**

Las obras de ingeniería de túneles presentan desafíos en el diseño, construcción y operación del proyecto; además en la seguridad de trabajadores y usuarios del mismo. El control del agua es uno de los retos principales para una excavación, debido a la complejidad de la obra e interacción con el medio natural.

Las obras de ingeniería subterránea, repercuten con gran importancia en el cuidado y la protección ambiental, como ha ocurrido en proyectos como: la Colosa (Cajamarca - Tolima), Minería subterránea en el Páramo de Santurban (Santander) y Túnel de la Línea (Quindío y Tolima), que han presentado elevada notoriedad mediática, debido a la problemática de afectación a los sistemas acuíferos y su repercusión en comunidades aledañas.

En Colombia, gran parte de los proyectos en etapa de planificación y ejecución se localizan en el núcleo de las tres cordilleras; asociados a basamentos ígneos metamórficos y sedimentarios, en rocas duras, así como en múltiples zonas de cizallamiento (sistema de fallas de Cauca – Romeral, Bucaramanga, Guaicaramo, entre otras); resultado de procesos activos de levantamiento y subducción del continente.

Estos procesos geodinámicos, conllevan a que los macizos naturales presenten características variables en los parámetros esfuerzo – deformación, anisotropías y cambios mineralógicos en la roca. Además, en las propiedades hidráulicas que controlan el movimiento del agua en subsuelo. Aspectos que un proyecto de ingeniería subterránea, deberá profundizar en el entendimiento de los sistemas naturales y estructurales complejos, para el flujo y almacenamiento del agua en el subsuelo.

En una obra de excavación subterránea, con condiciones hidrológicas y del macizo rocoso aceptable; es común que en el contorno del túnel se presenten fenómenos de goteo e irrupción de agua, los cuales se deben anticipar y solucionar en el diseño inicial, priorizando el desarrollo de las técnicas de control y manejo del agua subterránea.

Con el presente documento se pretende ampliar el conocimiento de la comunidad académica, propietarios, consultores, constructores y usuarios de los túneles; frente al control de las infiltraciones en las obras y con esto, evitar su incidencia negativa.

Inicialmente, se presenta el contexto histórico de las excavaciones subterráneas; características, factores constructivos y los escenarios en los que un proyecto tunelero deberá enmarcarse. Así mismo, se exponen las directrices y pautas para el control y medición de las tasas de infiltración del agua que irrumpe en un túnel.

Posteriormente, se describen los factores hidrogeológicos que afectan el flujo del agua subterránea en la naturaleza; conceptos generales de geología e hidráulica, las actividades de investigación y exploración del agua.

Además, se presenta el desarrollo y análisis para estimar y cuantificar la cantidad de agua que podría irrumpir en una excavación subterránea, describiendo las técnicas de modelación de los sistemas acuíferos, su abordaje conceptual, numérico, los requerimientos y restricción para su adopción.

En uno de los capítulos del documento, se describen las técnicas para el control y manejo del agua subterránea; los elementos instalados, características de los materiales, técnicas y equipos utilizados.

También, se describen las actividades de caracterización de materiales y ejecución de ensayos de laboratorio en especímenes de concreto para túneles, diseños de hormigones impermeables, diferentes adiciones y elementos de mejoramiento de los materiales que componen la mezcla. Los resultados se analizan y comparan bajo referentes de materiales, en el manejo del agua y las tasas de infiltración requeridas para el control de la infiltración en una obra subterránea.

Se presenta un caso real de tunelería, donde se analizan las características litológicas, geomecánicas e hidrológicas del macizo natural, la evaluación por diferentes metodologías para estimar la cantidad de agua que irrumpe en el túnel, comparando los resultados con los datos registrados antes y después de la excavación subterránea.

Finalmente, se presentan las recomendaciones y propuestas para futuros proyectos, conclusiones de los resultados obtenidos en los ensayos realizados y del caso analizado.

## OBJETIVOS.

### Objetivo general:

Estudiar los aspectos que controlan la infiltración de agua en las obras subterráneas en roca, evaluando las técnicas constructivas y de impermeabilización, proponiendo las medidas de mejor desempeño para los futuros proyectos de tunelería.

### Objetivos específicos:

- Obtener información relevante frente a los aspectos constructivos y técnicas de impermeabilización de túneles en roca, documentada en literatura especializada, normativa y casos históricos en proyectos subterráneos referentes; nacionales e internacionales.
- Describir el desarrollo alcanzado, en las técnicas de impermeabilización en los ambientes hidrogeológicos en túneles de roca del país.
- Ampliar el conocimiento en las técnicas de control de la infiltración en túneles de roca, con base en la información analizada y ensayos en materiales de revestimiento de túneles.
- Establecer pautas frente a las medidas de impermeabilización, que puedan ser incorporadas en los futuros proyectos subterráneos en roca.

## ALCANCE.

A continuación, se presenta la descripción de las actividades llevadas cabo para la ejecución del proyecto de investigación académica:

### a. Información bibliográfica conceptos de hidrogeología.

Recopilación de información sobre conceptos de hidrogeología aplicada a túneles, en los parámetros que rigen la infiltración subterránea.

### b. Casos referentes.

Recopilación y análisis de información acerca de proyectos de tunelería dentro y fuera del país, de diferente índole (minería, infraestructura vial, generación eléctrica), su contexto

hidrogeológico y los aspectos más relevantes frente a las medidas de control y manejo del agua subterránea.

c. Investigación normativa.

Revisión de la normativa sobre los aspectos constructivos y sistemas subterráneos, en el manejo y control del agua.

d. Técnicas de manejo y control de las filtraciones en túneles, materiales y requerimientos constructivos.

Evaluación de las diferentes técnicas en el control de la infiltración y manejo de agua en túneles, analizando el tipo de materiales, elementos aplicados al macizo y elementos de soporte de la obra.

e. Análisis de un proyecto de tunelería.

Investigación y recopilación de información sobre un caso de excavación subterránea en roca, con respecto a las características las hidrogeológicas, construcción, cuantificación de la irrupción de agua y su valoración por distintas técnicas de análisis.

f. Medición y pruebas de laboratorio

Evaluación de los tipos de revestimiento más utilizados para el control de la impermeabilización, ejecutando pruebas de laboratorio en concretos impermeables, normalmente utilizados en los proyectos de tunelería.

g. Recomendaciones y pautas finales.

De acuerdo con la información recopilada, los resultados de ensayos de laboratorio, casos de ingeniería y proyecto evaluado. Al final del documento se presentan una serie de conclusiones, pautas y recomendaciones sobre los aspectos más relevantes para tener en cuenta en futuros proyectos subterráneos.

## Capítulo I – Las excavaciones subterráneas.

Con el desarrollo humano se ha avanzado en técnicas de ingeniería subterránea, los materiales y elementos relacionados a los trabajos bajo tierra, en un principio con excavaciones muy rústicas, hasta la actualidad con técnicas de avance mecanizado y control de la estabilidad en tiempo real, como se puede apreciar en la figura 1.

### 1.1. Historia de la tunelería.

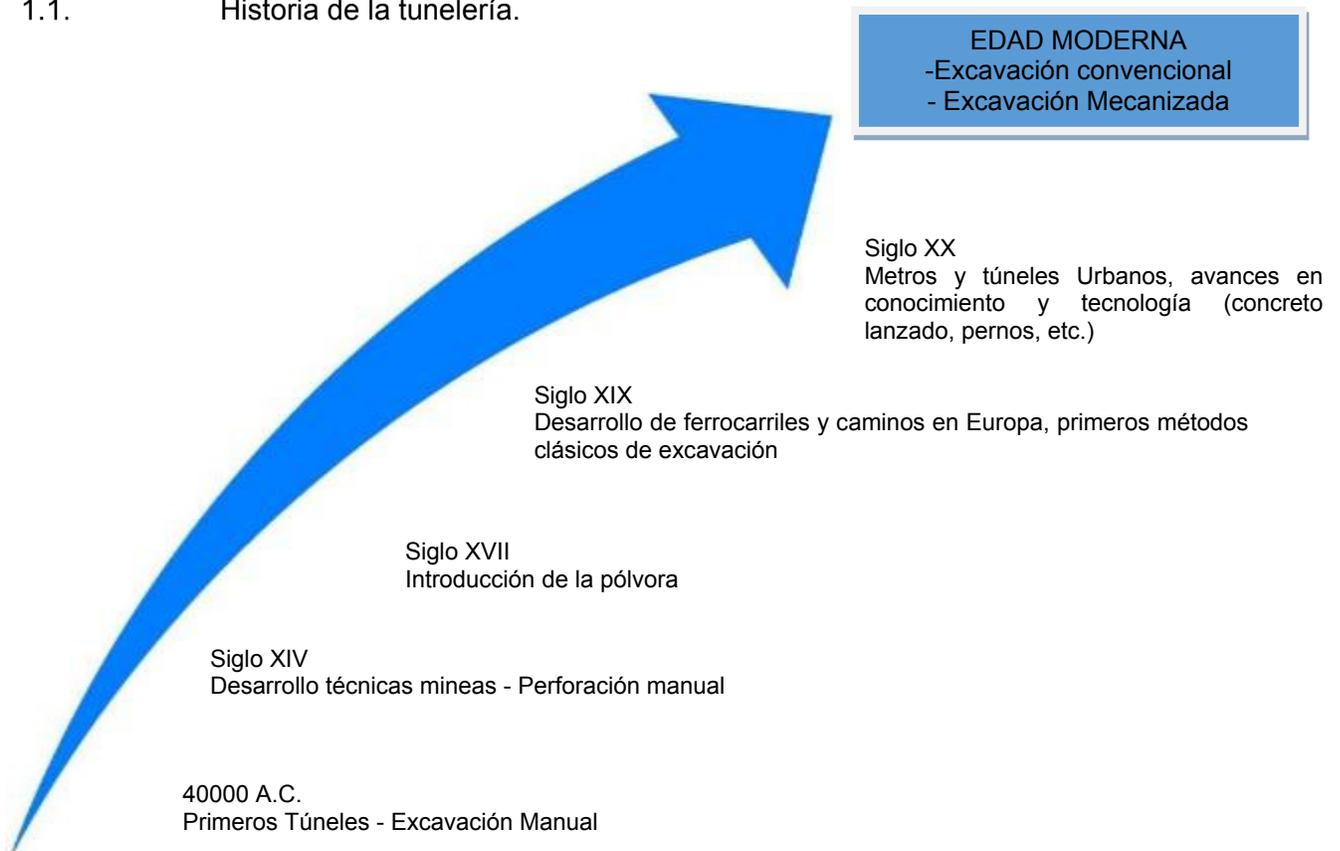


Figura 1. Historia de la tunelería.  
Fuente: (Gomes, 2013). "Pasado, Presente y Futuro de la Tunelería"

El agua ha esculpido la roca, generando espacios naturales subterráneos que fueron utilizados como lugares de estadía en tiempos remotos.

Las primeras manifestaciones humanas en desarrollar excavaciones se presentan en la edad de piedra; en explotaciones de Sílex o materiales de pedernal utilizados para la fabricación de armas y herramientas. Estas obras mineras consistían en galerías y pozos siguiendo la veta.

Posteriormente, se presentó un avance en las técnicas de excavación con el uso del fuego para generar choques térmicos y fracturas en las rocas.

Mientras, en el antiguo Egipto se excavaban y construían cámaras funerarias, demostrando el desarrollo de las diferentes técnicas de ingeniería alcanzadas por esta civilización, similar rasgo se ha encontrado en las culturas Persa y Romana.

Otro de los desarrollos para resaltar, es el túnel de Siloam (700 A.C), que conducía el agua de las montañas hasta un estanque dentro de la antigua y fortificada ciudad de Jerusalén; también sobresalen los avances griegos en la conducción de agua, con el uso de entibación en madera para sostener la roca.

La civilización romana perfeccionó el desarrollo de las técnicas constructivas de corte y excavación de la roca, para la conducción de agua y redes de acueducto a las ciudades. Además, innovó con elementos como: miras, niveles de agua y plomadas, al igual que el uso del cemento como material para adherir las rocas.

La primera manifestación de un túnel hidráulico moderno fue el desarrollado en la mina de Daroca del cerro de San Jorge (Zaragoza, España), que construyó el Arquitecto e Ingeniero Bedel entre los años 1.555 y 1.560,(Soto, 2004).

Otro desarrollo importante fue el canal de Midi, construido por Jean Baptiste Colbert con 240 Km de longitud, que comunicaba el Atlántico y Mar Mediterráneo, evitando largos caminos a través de la península Ibérica.

Los túneles como vías de comunicación tienen su desarrollo a comienzos del siglo XIX con el imperio napoleónico, construidos a través de los Alpes con longitudes cortas (menores de 200 m). En este periodo se presentó un alto progreso industrial, con el auge de ferrocarriles y la conceptualización de los primeros métodos clásicos de excavación subterránea.

En el siglo XX, se presentó un florecimiento en la creación de nuevas máquinas y técnicas industriales para la excavación y corte de las rocas, se facilitó el desarrollo y avance de obras en el subsuelo, metros y túneles urbanos; así como la tecnología en el uso de concreto lanzado y pernos de anclaje como sostenimiento de la roca.

En la actualidad, se presenta un desarrollo y mejora de las técnicas de excavación y construcción de las obras subterráneas, destacando aspectos como:

- Prospección con Geofísica.
- Paraguas de tubos de acero o de pernos.
- Jet-grouting.
- Inyecciones de consolidación – compensación.
- Congelamiento del suelo.
- Empleo de aire comprimido.

Frente al desarrollo adquirido para las técnicas de estabilidad y soporte de los túneles se presentan avances en:

- Desarrollo de materiales como; pernos de fibra, autoperforantes, expansibles, etc. (cemento, resina, etc.).
- Avances en las características de los materiales de soportes, como marcos metálicos de distintas secciones y diseños.
- Nuevas técnicas de elaboración del hormigón (dovelas, colado y shotcrete) reforzado con fibras (acero, sintético, etc.).
- Desarrollo en aplicación de materiales de concreto proyectado por vía húmeda.
- Avances en el conocimiento y técnicas de soporte con elementos de amortiguación para prevenir squeezing.
- Capas lanzadas para soporte de roca.

Así mismo, se ha avanzado en las técnicas para el control del agua principalmente en:

- Nuevos dispositivos para entrada controlada del agua.
- Desarrollo de capas impermeables confinada entre sostenimiento provisional y revestimiento definitivo sistemas mixtos tipo “sándwich” (PVC, poliolefinas, geotextiles, etc.).
- Nuevas técnicas para elaborar concretos de baja permeabilidad, que se describirá con más detalle en el Capítulo VII - Ensayos en concreto impermeable aplicado a túneles.
- Mejora en las herramientas y técnicas de proyección del concreto.

## 1.2. Planificación y diseño de las excavaciones.

Las diferentes metodologías de evaluación y planificación de túneles se basan en técnicas empíricas y observacionales, tal es el caso del método NATM de la década de 1960, que se basó en la selección del soporte del túnel por medio de clasificaciones geotécnicas. Su análisis requería la comprobación posterior con instrumentación, además de un alto grado de entendimiento y experticia por parte de los planificadores, acerca del tipo de terreno donde se emplaza la obra, los problemas constructivos y riesgos durante la excavación, como lo señala (Celada & Geocontrol, 2011).

En los años 70, con la incorporación de la curva de reacción del terreno, se definió una metodología más apropiada para el análisis del soporte a incorporar en el macizo y el momento de su instalación; pero aún con incógnitas sobre el real dimensionamiento de los componentes del sostenimiento subterráneo, (Celada & Geocontrol, 2011).

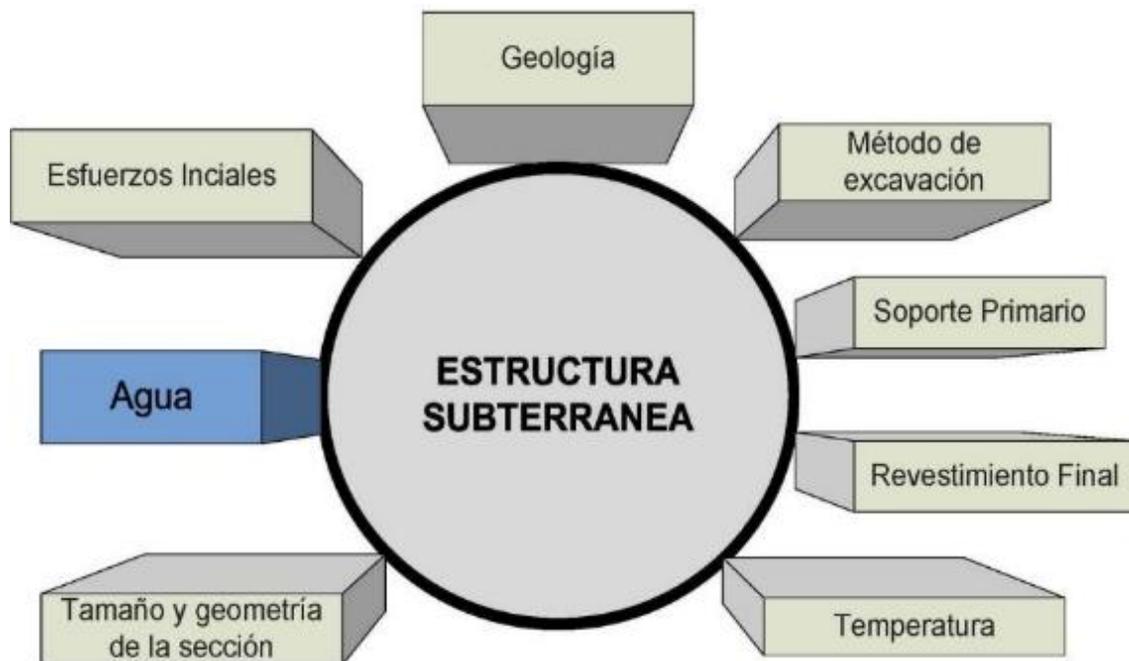


Figura 2. Elementos en la planificación de las estructuras subterráneas.  
Fuente: (Amberg Engineering, 2016). Waterproofing. Seminario de Túneles. CTS

Con el paso del tiempo, se han propuesto nuevas técnicas que mejoran el entendimiento del macizo y su respuesta frente a una excavación. El desarrollo de nuevas técnicas de instrumentación y medición de la convergencia, que permite pronosticar la respuesta del terreno en la construcción del túnel en tiempo real, optimizando la instalación del soporte.

La primera fase en el diseño estructural subterráneo es la caracterización del terreno con la elaboración de cartografía geológica con base en actividades exploratorias, levantamiento de datos estructurales del macizo y evaluación del estado tensional de la roca. Finalmente, la elaboración de un perfil geomecánico del macizo y su evaluación por una metodología de clasificación geotécnica del terreno, (Celada & Geocontrol, 2011).

Una segunda etapa, está enfocada en el diseño estructural de la excavación, con base en la hipótesis del comportamiento del macizo y datos recopilados de la primera fase, analizando el modelo geológico con respecto a las características de excavación transversal y longitudinal, la funcionalidad prevista para el túnel y geometría de la obra, se define el método constructivo más adecuado. También se tienen en cuenta el estado tensional de la roca, requerimientos de avance, servicios de ventilación, manejo de agua, maquinaria y seguridad industrial; los cuales integrarán los modelos constitutivos de los materiales y rocas.

En esta fase, se precisa el análisis con la modelación analítica de los diferentes escenarios del proyecto, complementado la evaluación con la incorporación de modelos numéricos.

A través de este análisis y metodología de evaluación se realiza una validación de las suposiciones iniciales, ajustando los parámetros tenso deformaciones del macizo a las secciones constructivas.

La tercera etapa, es la comprobación en obra de las hipótesis y análisis, evaluando si las características de soporte y revestimiento previsto se ajustan a los datos de convergencia obtenidos.

Finalmente, con la evaluación directa y respuesta del terreno se realiza una calificación al terreno, ajustando los elementos de soporte al tipo de roca excavada. Con esta metodología se podrá reducir la cantidad de instrumentación de la obra, ofreciendo un grado de seguridad y medidas más apropiadas a considerar.

El diagrama de flujo requerido para la metodología propuesta se presenta en la Figura 3.

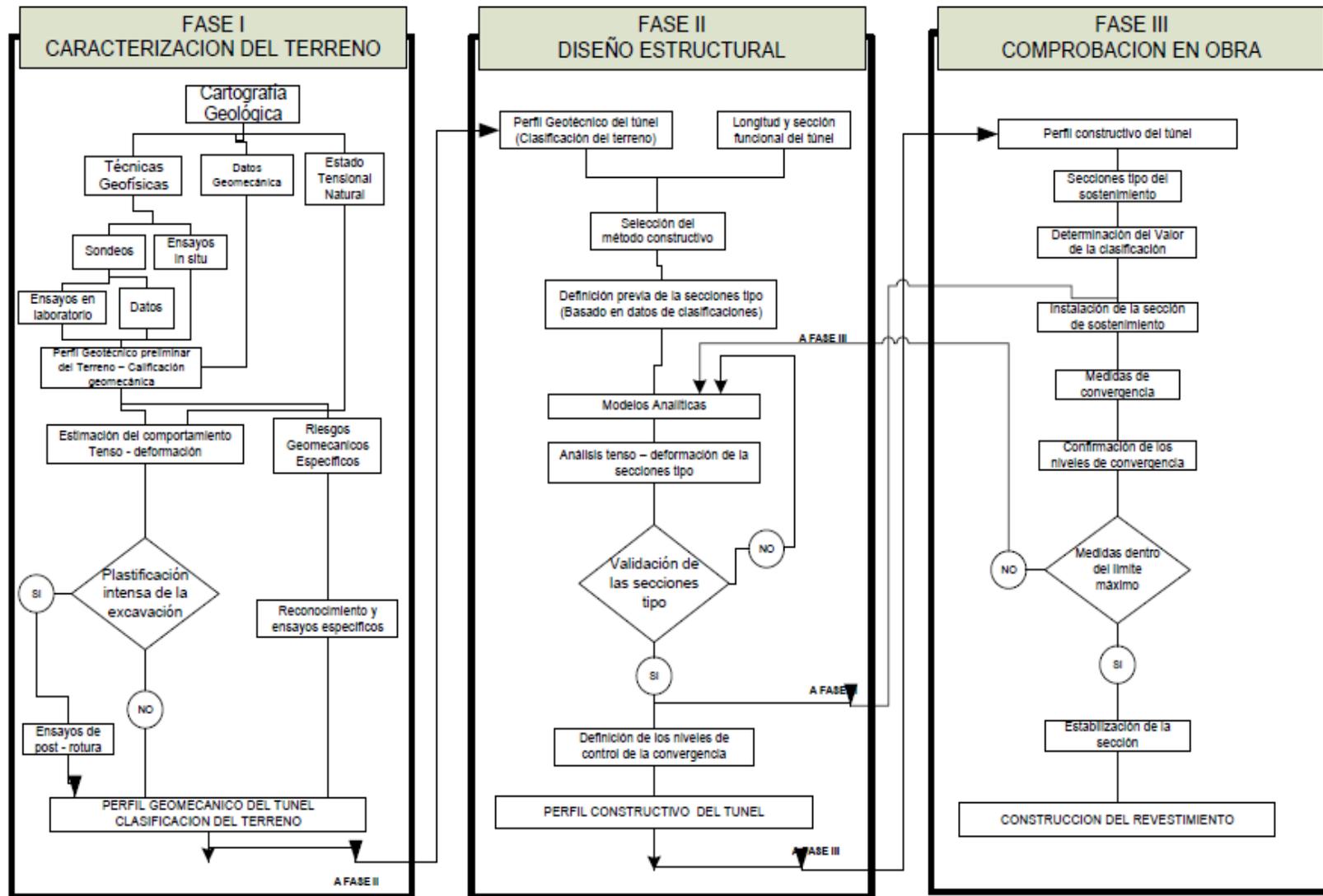


Figura 3. Consideraciones generales diseño y construcción de túneles. Fuente: Adaptado. (Bieniawski, 2011). Dimensioning Tunnel Support by Design Metodología.

### 1.3. Características de los macizos naturales, asociadas al agua subterránea.

El agua en sus diferentes estados se presenta con frecuencia en las excavaciones, debido a procesos de filtración en el subsuelo, donde el flujo se canaliza y penetra en los espacios libres en zonas de contacto de las formaciones geológicas o puntos donde la estructura del material presenta vacíos debido a procesos erosivos, cizallas, cortes y presiones naturales.

A continuación, se describen las características asociadas al flujo de agua subterránea y conceptos generales que influyen en el movimiento y almacenamiento del agua en los macizos.

#### 1.3.1. Discontinuidades.

Debido a los mecanismos de formación de los materiales en la corteza, grado de metamorfismo y ambientes de sedimentación, se presentan en los macizos juntas naturales; las cuales representan las fronteras entre paquetes de rocas o focos de esfuerzos (fallas y zonas de cizallamiento), estas sistema estructurales están definidas como:

- Sistemas de Fallas.
- Familias de Diaclasas.
- Grados de mineralización.
- Contactos Litológicos Discordancias.

### 1.4. Resistencia – deformación de los macizos naturales.

Los macizos rocosos presentan diversos grados de respuesta frente a los esfuerzos naturales o los derivados de las obras de ingeniería, que depende de la resistencia de los paquetes litológicos, la mineralogía, cementación de las partículas individuales e historia geológica.

En la Figura 4, se presentan los diferentes modelos de comportamiento de la roca con respecto a los esfuerzos y del estado de deformación frente a las presiones naturales, así:

- a) Estado elástico.
- b) Perfectamente Plástico.
- c) Elasto – plástico.
- d) Frágil.
- e) Dúctil.

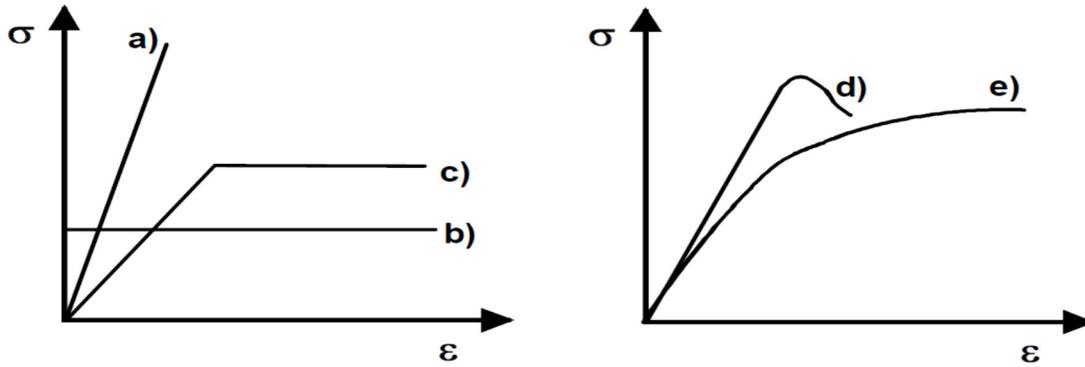


Figura 4. Esquemas de comportamiento de las rocas frente a los esfuerzos  
Fuente: (Hürlimann, 2013). Propiedades de la roca matriz.

Además de los modelos del comportamiento de las rocas, también se presentan fenómenos como Creep, como se puede observar en la Figura 5; en el cual, en un macizo sometido a una tensión durante un tiempo prolongado presenta una disminución de la resistencia y aumento de las deformaciones aún con un bajo esfuerzo.

A este proceso se le denomina enfermedad de las rocas y está asociado a la mineralogía de un grupo de rocas sedimentarias, halitas, lutitas, entre otras.

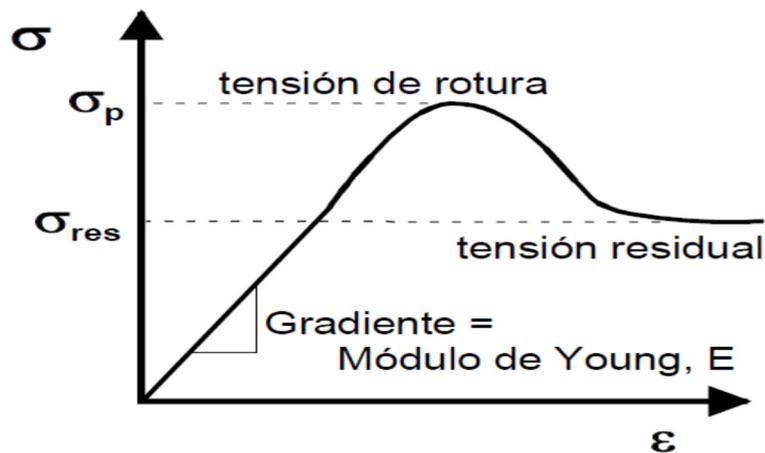


Figura 5. Parámetros en la evaluación de las propiedades de la roca.  
Fuente: (Hürlimann, 2013). Propiedades de la roca matriz.

## 1.5. Procedimientos constructivos.

A través del conocimiento adquirido con las obras y proyectos, se han definido mejoras en los métodos de excavación, construcción, avance y operación de los túneles; a continuación se reseñan sus aspectos más relevantes.

### 1.5.1. Construcción de portales.

En la primera fase, se deben construir los accesos a los túneles, en las zonas denominadas portales, que delimitan los puntos de ingreso y salida de la obra, en las cuales se deben definir en actividades como:

- Excavación, cortes o rellenos a cielo abierto.
- Construcción de drenajes.
- Refuerzo de taludes con concreto lanzado, en los terrenos que requieran medidas de revestimiento.
- Instalación de tendones.
- Colocación de drenes.



Figura 6. Excavación y cortes a cielo abierto en zona de portal de Túnel.  
Fuente: (AMITOS & Guzman, Túneles Carreteros Diseño, Construcción y Supervisión, 2012). Túneles Carreteros Diseño, Construcción y Supervisión.

### 1.5.2. Sostenimiento.

Una excavación subterránea genera una pérdida de confinamiento de la roca, que propicia cambios en las características de resistencia del macizo y se requiere de medidas de soporte temporal de los trabajos para asegurar la estabilidad de la obra. Para evaluar las características del comportamiento se deben tener en cuenta:

- Cambio de las propiedades de esfuerzo - deformación del macizo.
- Desprendimientos y caída de rocas o materiales en el cuerpo del túnel durante su construcción y operación.

- Control de las deformaciones generadas por el túnel, con la instalación de elementos de soporte.
- Evaluación de la adaptación de los materiales y elementos instalados frente a la deformación y presión del macizo.
- Manejo y control de las infiltraciones e irrupciones del agua en el cuerpo del túnel.
- Protección de los trabajadores con respecto a los riesgos naturales producidos por la construcción del túnel, manipulación de equipos y materiales utilizados.

En la construcción de las obras de ingeniería subterránea, es común la instalación de un sostenimiento temporal denominado soporte primario; el cual se instala durante el avance del túnel y tiene la finalidad de proteger los equipos y trabajadores de caídas de roca o materiales frágiles en el contorno de la excavación.

Según la complejidad geológica y características del proyecto se podrán instalar soportes secundarios como refuerzo. Y luego se define un revestimiento que proporcione protección ante agentes naturales comunes (gases, desprendimientos de roca, agua contaminada, entre otras).

El revestimiento en concreto impermeable o geomembranas constituyen capas de protección final, con el objetivo de garantizar la estanqueidad de los trabajos frente a las infiltraciones; previniendo el deterioro de los elementos instalados dentro de la obra.

Entre las medidas de estabilidad más comunes en las obras subterráneas se encuentran;

- Soporte natural o auto - soporte.
- Concreto Lanzado (Gunita).
- Malla electro soldada y fibras en los elementos de soporte.
- Pernos y bulones de anclaje.
- Concreto vaciado in situ.
- Concreto prefabricado (Dovelas).
- Cerchas o Arcos de Acero (Auto deslizantes y fijas).
- Gatos hidráulicos.

Estos métodos de soporte varían según la condición del terreno, es usual en un túnel combinar las diferentes medidas de estabilidad según la importancia y complejidad del proyecto. Así mismo, se han establecido otras medidas de soporte y mejoramiento de las características geológicas de la roca, como:

- Enfilajes.
- Paraguas.
- Coronas de Jet grouting.
- Inyecciones.
- Drenajes.

### 1.5.3. Excavación.

Durante el avance de un túnel se requiere cortar la roca, proceso que se facilitara de acuerdo a los materiales, técnicas constructivas y geológicas. A continuación se reseñan sus aspectos más relevantes para tener en cuenta durante la etapa de excavación:

- Mineralogía de la roca.
- Resistencia de la matriz rocosa.
- Dureza y agresividad de la roca.
- Fracturación y características de las discontinuidades.
- Índices de calidad geotécnica.
- Tipos de terreno y cambios geológicos en el túnel.
- Infiltración y posibles irrupciones de agua en el túnel.
- Características tecnológicas y de equipos.

#### Métodos de excavación.

Dentro de las técnicas más comunes de excavación, se encuentran:

- Perforación y voladura.
- Excavación mecanizada (equipos buldócer, retroexcavadora o maquinas rozadoras).
- Maquinas Tuneladora (TBM) o también denominadas topes.
- Técnicas mineras de disolución de la roca.

#### Medición de la convergencia.

La medición de las deformaciones es el paso final en el proceso de optimización y diseño de túneles, con las innovaciones tecnológicas han tenido acogida, por su practicidad y adaptación con terrenos complejos; además de posibilitar el ahorro en sistemas de soporte y cantidades de obra.

Mediante las técnicas de medición del grado de convergencia se podrán determinar los cambios en la longitud de puntos hastiales y bóveda excavada, como se muestra en la Figura 7, si se presentan cambios significativos se podrá realizar ajustes al sostenimiento instalado casi instantáneamente.

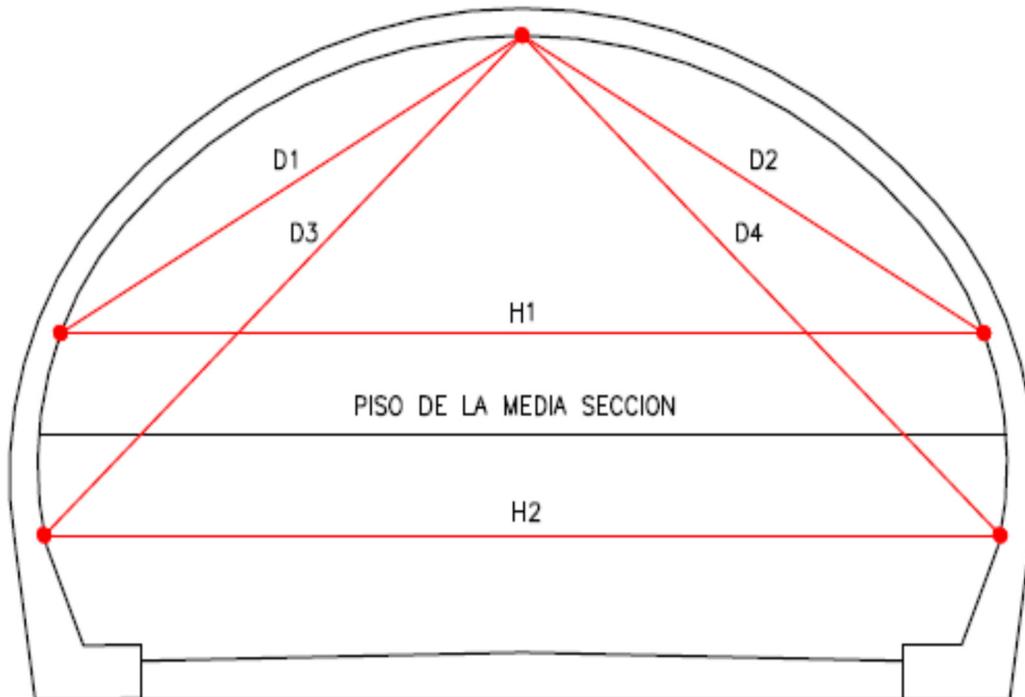


Figura 7. Sección típica de medidas de convergencia  
Fuente: (AMITOS & Guzman, Túneles Carreteros Diseño, Construcción y Supervisión, 2012).  
Túneles Carreteros Diseño, Construcción y Supervisión

#### 1.5.4. Control de la infiltración en los túneles.

Los macizos naturales presentan ventanas o puntos que permiten el ingreso de agua, si la roca no ha tenido el grado suficiente de litificación o la mineralogía presenta una estructura poco estable. En escenarios con macizos alterados, sueltos, poco consolidados y con las condiciones hidrológicas aptas, el agua podría irrumpir en la obra.

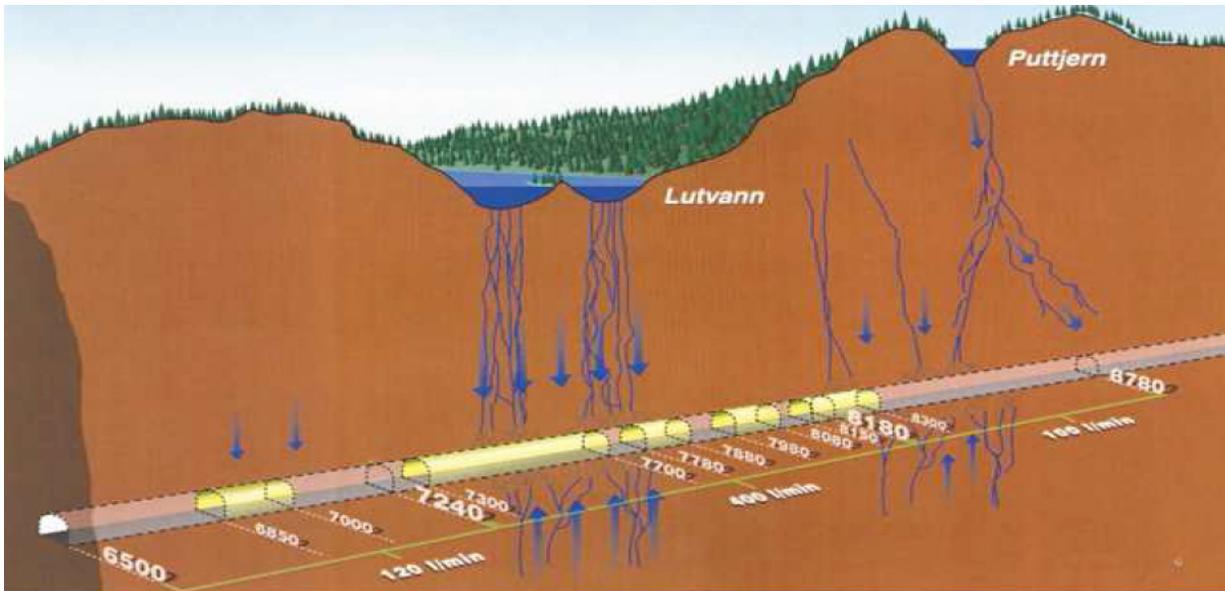


Figura 8. Infiltración en una excavación subterránea.  
 Fuente: (NTS, 2010, p. 53). Introducción tú wáter control in Norwegian Tunneling.

#### 1.5.5. Impermeabilización de la excavación.

Los trabajos de ingeniería, equipos, personal y la irrupción del agua en la excavación; conllevan problemas para la estabilidad de la obra, seguridad del personal y avance del túnel.

Para controlar las infiltraciones se han definido actividades, que se presentan con detalle en el capítulo 5. Su desarrollo e implementación dependerán del conocimiento geológico, características constructivas y tecnología aplicada, también del nivel de la obra, requisitos ambientales y de seguridad. En general, se definen medidas como:

- Mejoramiento del macizo (inyecciones y preinyecciones), impermeabilización del macizo
- Medidas de impermeabilización primaria al contorno del tunel.
- Medidas de impermeabilización secundaria al contorno del tunel.
- Medidas de mantenimiento y control posterior al instalado inicialmente.

#### 1.5.6. Revestimiento definitivo.

Después de la instalación del soporte, drenaje e impermeabilización de la excavación, se coloca el revestimiento definitivo del túnel; su función es estética y de protección de las capas de soporte, compuestos principalmente por-líneas de concreto y geomembranas. Cuando se trata de túneles hidráulicos o proyectos especiales de investigación se emplean hasta láminas protectoras en acero.

### 1.5.7. Equipamiento

Para la operación y mantenimiento de la obra subterránea, también se requerirá la instalación de equipos y máquinas complementarias en caso de emergencias; que permitan la comunicación entre los diferentes puntos de la obra. Entre los sistemas de apoyo y servicio más comunes de un túnel están;

- Sistemas de alumbrado.
- Sistemas de comunicación.
- Sistema de ventilación.
- Sistema contra incendio.
- Sistema de señalización.
- Control de sistemas y comunicación.

### 1.6. Los proyectos subterráneos y la infiltración.

Las características constructivas y naturaleza de la obra definirán los métodos para el control de las filtraciones, de acuerdo al proceso y uso del proyecto; los cuales comprenden:

#### 1.6.1. Túneles Mineros.

Se utilizan en la extracción de materiales y recursos naturales. Las obras de impermeabilización se concentran en las zonas de portales o boca minas, así como en las galerías principales. En la Figura 9, se presentan algunos escenarios de un proyecto minero.



Figura 9. Galerías de comunicación y cámara de explotación minera.  
Fuente: (ITA, 2012). Presentación, descripción general del uso del espacio subterráneo.

La mayoría de proyectos se emplazan en formaciones de roca dura y buena calidad del terreno, presentando una vida útil relativamente corta que en la mayoría de escenarios no superan 10 años para galerías principales en periodos de tiempo muy cortos en las zonas de explotación; por esta razón se emplean medidas temporales para el control del agua, principalmente con desniveles y la excavación de pozos para el bombeo del agua.

#### 1.6.2. Túneles interconexión vial.

Se utilizan como medios de comunicación con vías y obras en superficie, cuentan con un nivel de operatividad y vida útil mayor que los de minería, las obras de manejo de agua dependerán de la complejidad hidrogeológica. Se pueden clasificar así:

- Carreteros.
- Férreos.
- Metro.
- Peatonales.

#### 1.6.3. Túneles carreteros

El grado de impermeabilización requerido varía de acuerdo con las condiciones hidrogeológicas. El tipo de revestimiento varía desde una impermeabilización con geomembranas, hasta capas de revestimiento en concreto lanzado.



Figura 10. Proyecto Túnel bidireccional Kachotis, Primavera – Medellín, Antioquia.  
Fuente: (INVIAS, Tunel Kachotis, 2016). Memorias XI Seminario de túneles.

#### 1.6.4. Túneles Férreos.

Representan obras de infraestructura vial para tránsito de vías férreas. Debido a las condiciones operativas de este tipo de túneles no tienen la necesidad de ser totalmente herméticos, pudiendo

asimilar ocasionales infiltraciones, si estas no influyen en el deterioro de la excavación y mecanismos del túnel.

Sin embargo, se requieren medidas de inspección y drenaje, evaluando los daños frente a filtraciones ocasionales, así como en zonas electrizadas y con corriente, las soluciones de impermeabilización variaran de acuerdo con la complejidad geológica del proyecto; es común encontrar revestimiento en concreto lanzado ocasionalmente con la instalación de líneas de concreto.

#### 1.6.5. Túneles Urbanos – Metro.

Este tipo de proyectos deberán tener una total hermeticidad y un control constante de las deformaciones, las medidas de manejo del agua deben garantizar una estanqueidad e impermeabilización primaria y secundaria. Desde la excavación y colocación de los primeros revestimientos se necesita controlar el flujo del agua con geomembranas o concretos impermeables, lo cual dependerá de las condiciones hidrogeológicas del proyecto.

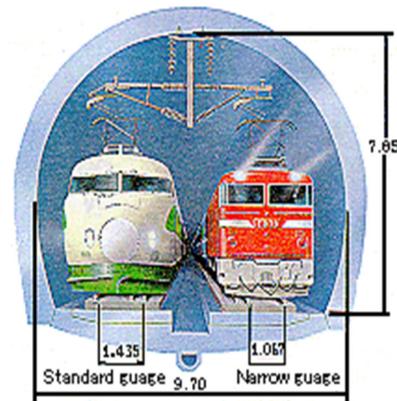


Figura 11. Proyecto ferroviario Túnel Seikan - Japón  
Fuente. ACTOS -2016. Memorias XI Seminario de túneles

Así mismo, en la fase final de construcción en la operación del túnel es usual complementar las medidas de impermeabilización.

#### 1.6.6. Túneles Peatonales.

Sus dimensiones son menores en comparación con otro tipo de túneles viales, oscilando entre diámetros de 4 a 6 metros, sus características constructivas dependen de las condiciones hidrogeológicas del macizo, cuentan con revestimientos y medidas de control de infiltración en concreto, ocasionalmente con la instalación de geomembranas.

### 1.6.7. Túneles Hidráulicos.

Este tipo de obras está destinado a la generación de energía eléctrica con el uso del agua, también en el tratamiento de residuos desde las grandes urbes a través de sistemas de alcantarillado.

Entre los usos de los túneles hidráulicos se encuentran:

- Centrales hidroeléctricas.
- Sistemas de Riego.
- Acueductos.
- Alcantarillado.

Este tipo de túneles son completamente herméticos en soleras y bóvedas para evitar cantidades importantes de flujo, humedad y daños en equipos. El nivel de impermeabilización en este tipo de obras requerirá capas de revestimiento primario y secundario, ocasionalmente con medidas complementarias para el control del agua.



Figura 12. Inspección, sistema almacenamiento de agua Chicago – USA  
Fuente: (ITA, 2012). Presentación, descripción general del uso del espacio subterráneo.



Figura 13. Esquema Central Hidroeléctrica Subterránea  
Fuente: (ISAGEN, 2013). Central Hidroeléctrica La Miel I.

#### 1.6.8. Almacenes y refugios subterráneos.

Este tipo de proyectos se encuentran destinados al almacenamiento de equipos, alimentos y otros objetos, que requieran un nivel de seguridad y control frente a elementos ambientales nocivos, de acuerdo a las condiciones del macizo e hidrológica pueden requerir medidas de revestimiento primario y secundario.



Figura 14. Proyecto Tau Shat Wan Túnel - Explosivos Magazín.  
Fuente: (Kong, 2006). Proceedings of the 30th International Geological Congress y Chan & Ng.

En este tipo de obras es común encontrar inyecciones de lechada de consolidación e instalación de capas de revestimiento, con geomembranas, capas de concreto lanzado, en sistemas mixtos de impermeabilización.

Para algunos proyectos, su función es la protección y refugio de civiles y militares, este tipo de estructuras deben tener una elevada competencia estructural, con características de control de agua que dependerán de la complejidad hidrogeológica de la zona, usualmente se instalan sistemas combinados de concreto lanzado, armado y capas de geomembranas.

#### 1.6.9. Estructuras subterráneas de Investigación y tecnología.

En este tipo de obras de carácter académico e investigación, como el colisionador de partículas subatómicas, se requieren elevados niveles de hermeticidad.

Se pueden encontrar técnicas mixtas, como medidas de mejoramiento y sistemas tipo sándwich de capas de geomembranas, revestimientos en concreto e incluso con el blindaje completo de la sección.



Figura 15. Proyecto CERN, estructura subterránea.  
Fuente: (ITA, 2012). Presentación, descripción general del uso del espacio subterráneo.

Tabla 1. Túneles más representativos del mundo.

TUNEL	LOCALIZACION	LONGITUD (Km)	AÑO	USO	OBSERVACIONES
Seikan	Japón	53.9	1988	Línea Férrea	Su trazado se encuentra en sobre el estrecho de Tsugaru entre las islas de Honshu y Hokkaido.
Channel Túnel - Eurotunnel	Inglaterra-Francia	50.5	1994	Línea Férrea	Este canal se encuentra por debajo del Canal Inglés entre Folkestone, Inglaterra, y Calais, Francia.
Lötschberg / base	Suiza	34.6	2007	Línea Férrea	Enlace ferroviario bajo Lotschen entre Berna y Valais cantones.
Iwate-Ichinohe	Japón	25.8	2002	Línea Férrea	Conduce a la línea de alta velocidad a través de Tohoku montañas entre Tokio y el norte de Honshu.
Lærdal	Noruega	24.5	2000	Autopista	Conduce a la carretera principal a través del país a través de las montañas en el centro de Noruega.
Daishimizu - (Great Shimizu)	Japón	22.2	1982	Línea Férrea	Línea de alta velocidad a través de Joetsu Honshu entre Tokio y Niigata.
Simplon II	Italia-Suiza	19.8	1922	Línea Férrea	Enlace ferroviario bajo el paso de Simplon, la división tradicional entre Europa del norte y del sur.
Simplon I	Italia-Suiza	19.8	1906	Línea Férrea	
Vereina	Suiza	19.1	1999	Línea Férrea	Enlace ferroviario bajo el paso de Flüela entre el Rin superior e inferior valles Engadina.
Shin-Kanmon / (New Kanmon)	Japón	18.7	1975	Línea Férrea	Conduce a la línea de alta velocidad Sanyo bajo Kanmon estrecho entre las islas de Honshu y Kyushu.
Great Apennine	Italia	18.5	1934	Línea Férrea	Enlace ferroviario a través de montañas entre Bolonia y Florencia.

TUNEL	LOCALIZACION	LONGITUD (Km)	AÑO	USO	OBSERVACIONES
Qinling	China	18.5	2001	Línea Férrea	Atraviesa las montañas de Qin (Tsinling), la barrera histórica entre China norte y el sur.
St. Gotthard	Suiza	16.9	1980	Autopista	Conecta a Ticino cantones bajo el paso de San Gotthard.
Haruna	Japón	15.4	1982	Línea Férrea	Línea de alta velocidad a través de Joetsu Honshu entre Tokio y Niigata.
Severomuiskiy	Rusia	15.3	2003	Línea Férrea	Enlace en el ferrocarril Baikal-Amur, en la república rusa de Buryatia.
St. Gotthard	Suiza	15	1882	Línea Férrea	Conduce a la línea de Zúrich-Milán bajo el paso de San Gotardo entre Uri y cantones del Tesino.
Mount MacDonald	Columbia Británica – Canadá	14.6	1988	Línea Férrea	Conduce al Canadian Pacifica Línea Férrea bajo Rogers Pass en el Parque Nacional Glacier.
Dayaoshan	China	14.3	1988	Línea Férrea	Conduce a una línea de doble vía a través de las montañas de Nan, provincia de Guangdong norte.
Arlberg	Austria	14	1978	Autopista	Establece un enlace de carretera bajo el Paso de Arlberg entre Tirol y Vorarlberg provincias.
Hokuriku	Japón	13.9	1962	Línea Férrea	Línea Hokuriku a lo largo del Mar de Japón.
Mount Cenis	Francia-Italia	13.7	1871	Línea Férrea	Lleva a la línea principal París-Turín a través de los Alpes en el paso de Fréjus.
Hex River	South Africa	13.4	1989	Línea Férrea	Conduce a las montañas entre el valle del río Hex y la altiplanicie Gran Karoo.
Fréjus	Francia-Italia	12.9	1980	Autopista	Lleva a la autopista Lyon-Turín a través de los Alpes en el puerto de Fréjus.
Cascada	Washington, U.S.	12.5	1929	Línea Férrea	Conduce en la gama de la cascada, que une el medio oeste americano y el noroeste del Pacífico.
Mont Blanc	Francia-Italia	11.6	1965	Autopista	vía de comunicación entre la Alta Saboya, Francia, y Valle de Aosta, Italia, bajo el pico más alto de Europa.

Fuente: Enciclopedia Británica, 2016.

#### 1.6.10. Futuro de los Túneles

En la actualidad hay apogeo de proyectos subterráneos para la generación de energía eléctrica, propósitos militares, comunicaciones, obras mineras y de almacenamiento, los dos últimos menos desarrollados en Colombia, pero con gran potencial.

Con la experiencia desarrollada en proyectos subterráneos, se han perfeccionado las técnicas de excavación y construcción; además de la tecnología y maquinaria especializada.

Los túneles viales también presentan auge, debido a las necesidades de infraestructura e interconexión desde el campo a las metrópolis.

Otros escenarios como la investigación científica no son comunes en la región, pero se deberán desarrollar proyectos académicos que sirvan de aprendizaje sobre procesos de construcción, técnicas de excavación y control del agua.



Figura 16. Proyecto Hallansas, Suecia, revestimiento en dovelas y geomembranas.  
Fuente: (ITACET, 2012). Manejo de Agua en Túneles.

## Capítulo II – Hidrogeología asociada a las excavaciones subterráneas.

Las ciencias de la tierra se han desarrollado paralelo al avance del hombre, resolviendo interrogantes naturales, como los asociados al flujo del agua en la naturaleza, infiriendo teorías y metodologías de investigación a partir de la ocurrencia de los diferentes fenómenos como: inundaciones, sismos, erupciones volcánicas, entre otros.

Bajo estos hechos, se han descrito los procesos de formación y evolución de los continentes, la distribución y composición de los materiales de la corteza, en diagramas como el que representa la Figura 17.

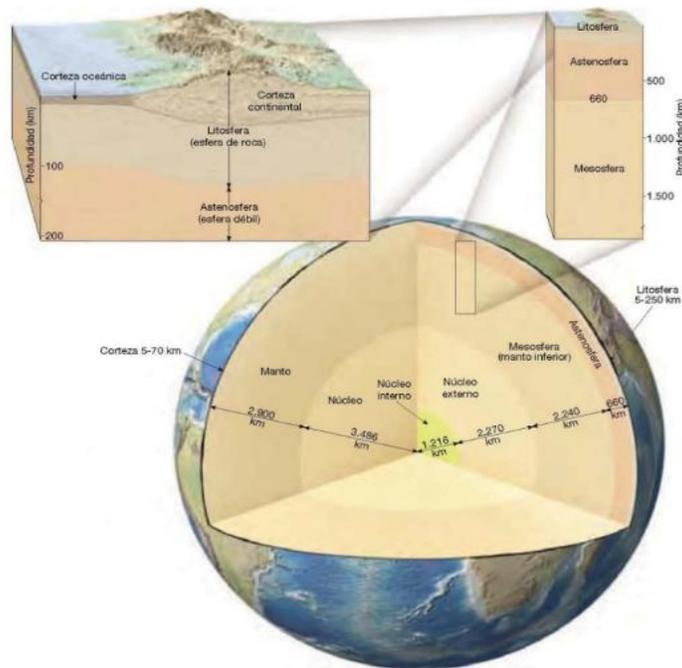


Figura 17. Estructura interna de la Tierra.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física.

Para la zona más dura de la corteza, el estudio de los diferentes elementos, propiedades y rasgos distintivos ha sido un reto mayor debido a la complejidad de revelar las propiedades y existencia de los diferentes grupos rocosos. Con lo cual ha sido necesario el desarrollo de diferentes metodologías de investigación propias de la mecánica de rocas, en el comportamiento de los macizos, su incidencia en el flujo y almacenamiento del agua subterránea.

A continuación, se presentan los aspectos más relevantes de la geología e hidráulica natural, importantes en el análisis y cuantificación del agua subterránea.

## 2.1. Geología.

Se define como la ciencia que estudia los diferentes componentes de la tierra y fenómenos naturales que han originado las geoformas y características actuales de las capas terrestres como la corteza y el núcleo.

La geología evalúa elementos como el clima, fenómenos antrópicos, atmosféricos y del universo que puedan incidir en la dinámica de la geosfera. Así mismo, estudia elementos naturales y su relación con el agua, ambientes en depósitos y sistemas geológicos y biológicos complejos.

### 2.1.1. La escala geológica.

La geología cubre un amplio espectro de estudio, incluye los cambios y transformaciones del relieve a través del tiempo y su relación con la historia natural, en los procesos de formación y transformación del planeta.

Eón	Era	Período	Época	Desarrollo de plantas y animales		
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	0.01	Desarrollo de los seres humanos	
			Pleistoceno	1.8		
		Terciario	Plioceno	5.9	«Edad de los mamíferos»	
			Mioceno	23.8		
			Oligoceno	33.7		
			Eoceno	54.8		
			Paleoceno	65.0		
	Mesozoico	Cretácico		«Edad de los reptiles»	Extinción de los dinosaurios y otras muchas especies	
		Jurásico	144		Primeras plantas con flores	
		Triásico	206		Primeras aves	
	Paleozoico	Pérmico		«Edad de los anfibios»	Dinosaurios dominantes	
			Pensilvaniense		248	Extinción de los trilobites y muchos otros animales marinos
			Misisipiense		290	Primeros reptiles
		Carbonífero		«Edad de los peces»	Grandes pantanos carboníferos	
					323	Anfibios abundantes
		Devónico	354	Primeros insectos fósiles		
		Silúrico	417	Peces dominantes		
		«Edad de los invertebrados»	Ordovícico	443	Primeras plantas terrestres	
	Cámbrico		490	Primeros peces		
	540		Trilobites dominantes			
Proterozoico				Primeros organismos pluricelulares		
Arcaico	2.500			Primeros organismos unicelulares		
Hádico	3.800			Origen de la Tierra		
				Denominado colectivamente precámbrico, abarca alrededor del 88 por ciento de la escala de tiempo geológico		
				4.500		

Figura 18. Etapas del tiempo Geológico.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física.

En la figura 18, se presenta la cronología terrestre relevante durante el tiempo geológico, determinadas a partir de evidencias petrificadas.

Las hipótesis más desarrolladas estiman en 4.600 millones de años la edad de la tierra, en Colombia se han descubierto rocas precámbricas con edades mayores a 2.200 millones de años, en la zona del Cratón de la Guyana hacia la Amazonía.

La morfología actual de la corteza evidencia el gran dinamismo terrestre con el paso del tiempo. Los diferentes sistemas litológicos, pliegues, cortes, fallas y discontinuidades que se han desarrollado a partir de los fenómenos de diagénesis y sismicidad en los sistemas de placas estructuralmente, se presentan en la Figura 19.

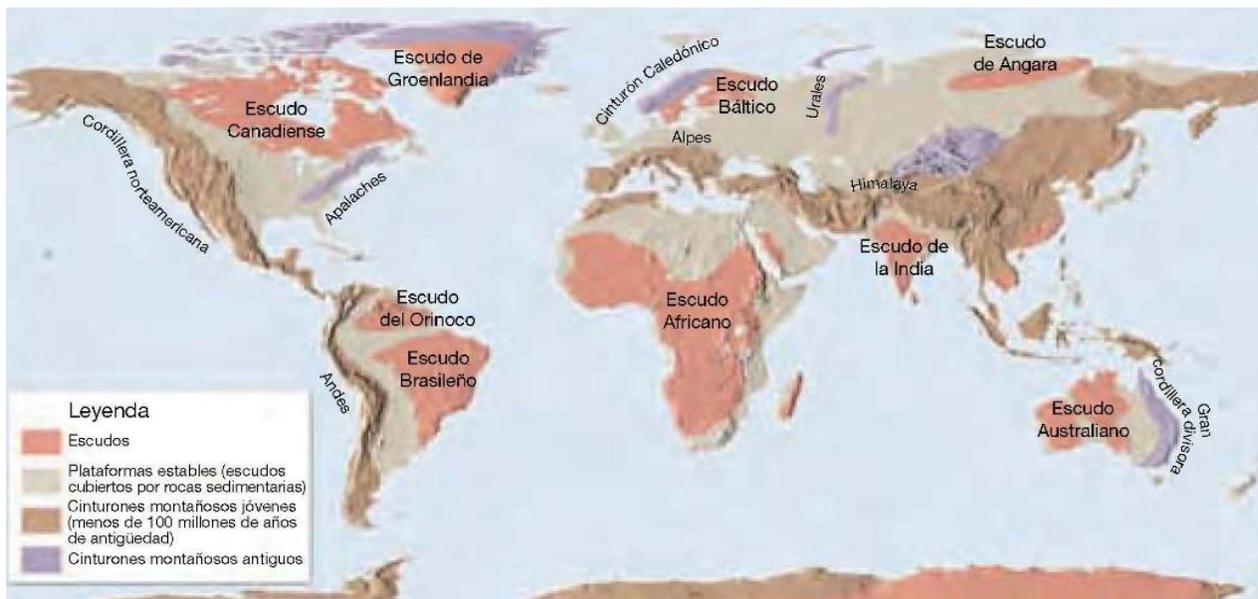


Figura 19. Cinturones montañosos, plataformas estables y escudos de la corteza terrestre.  
Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física.

Una roca se define como un aglomerado de minerales, compuesto por materiales cementantes y otras estructuras que brindan soporte a este agregado.

El origen de este tipo de elementos naturales se encuentra asociado al grupo de rocas que conforman el macizo. Se dividen en rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas, como se presenta en la Figura 20, donde se esquematiza el ciclo de formación y transformación de los diferentes paquetes litológicos.

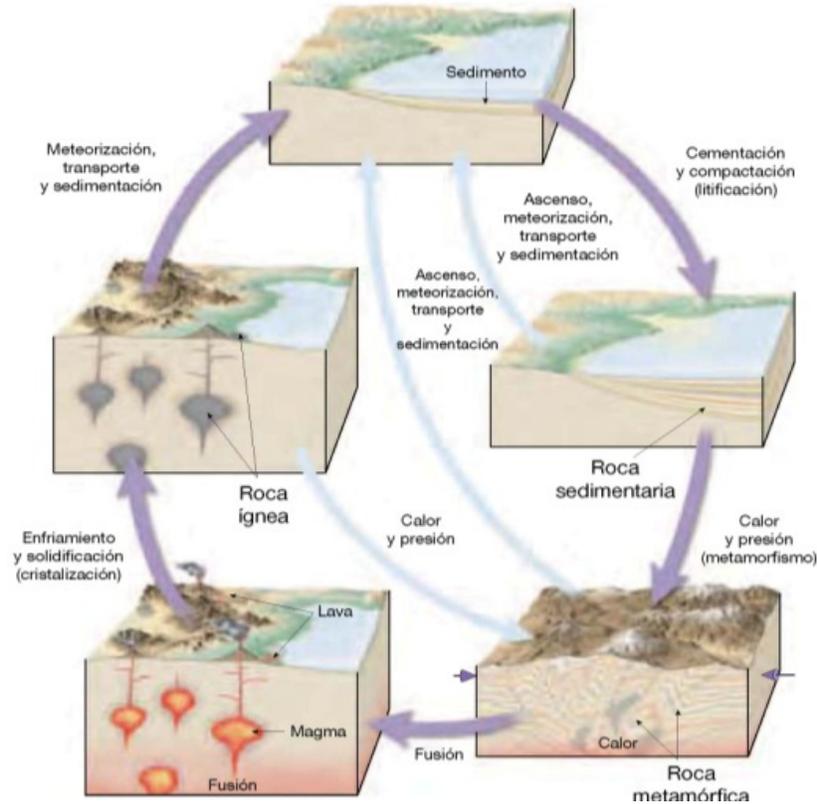


Figura 20. Ciclos de las Rocas.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física.

Las rocas sufren cambios y transformación a través de procesos como:

- Enfriamiento y solidificación (cristalización) en las rocas Ígneas.
- Meteorización, transporte y sedimentación para las rocas Sedimentarias.
- Presión y temperatura, con la recristalización en las rocas Metamórficas.

## 2.2. Morfología del territorio colombiano.

Colombia se encuentra localizada en la parte noroccidental de Sudamérica, limita con los océanos Pacífico y Atlántico. Dentro de este territorio se presentan particularidades climáticas, morfológicas y geodinámicas, como se presentan en la Figura 21. También se tienen zonas con diferentes rasgos fisiográficos en las zonas de montaña, llanura y valles del país y que se describen con más detalle a continuación.

- Zona de los llanos Orientales: Presenta una morfología plana a semiondulada, hacia la parte suroriental se encuentra el escudo de la Guyana, al occidente limita con la serranía de la Macarena y el piedemonte llanero; presenta una sísmica baja o nula.

- Zona Andina: Esta región tiene una morfología montañosa, con puntos volcánicos activos, se ramifica en las tres cordilleras, hacia la parte norte con morfologías de valles intramontanos y formando las cuencas del país (Magdalena y Cauca).

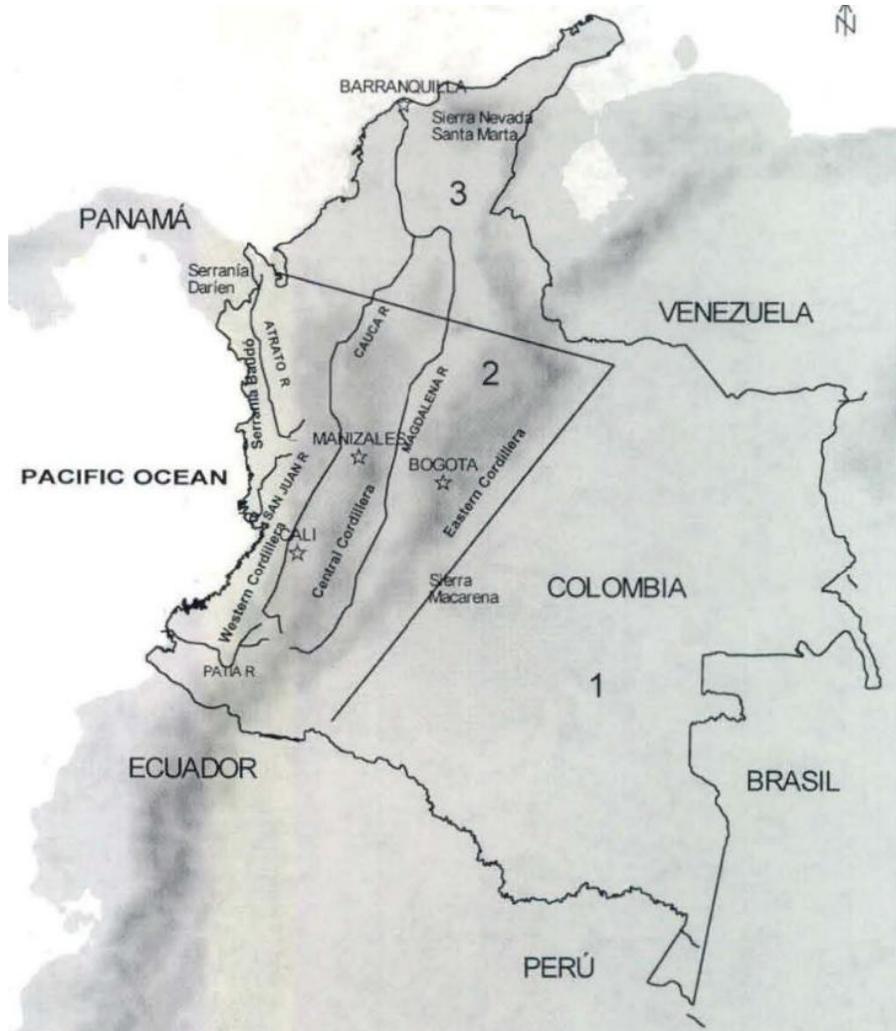


Figura 21. Aspectos Fisiográficos del territorio Colombiano. 1 - Llanos Orientales. 2 - Región Andina. 3 - Región Caribe. (INGEOMINAS, Proyecto: C01R01 - Investigación y Monitoreo de la Actividad Sísmica y Volcánica, 2001)

- Zona Caribe: Presenta una geomorfología plana, con la singularidad montañosa conocida como Sierra Nevada de Santa Marta, en esta zona se encuentra la confluencia y desembocadura de los principales afluentes hídricos del país (Cauca y Magdalena).

### 2.3. Evolución geológica de Colombia.

Colombia en su historia natural ha tenido procesos de transformación de sus ambientes geológicos; aún en la actualidad presenta un gran dinamismo, como lo demuestra la variedad de

paquetes rocosos y de materiales naturales (suelos, lagos y depósitos minerales), que se presentan a lo largo del territorio colombiano.

La geología del país ha evolucionado a través de ciclos orogénicos, con desplazamientos de la zona de subducción y choque de placas.

A continuación, se describen estos procesos a través del tiempo.

La primera etapa ocurre en el precámbrico, con la orogenia transamazónica, aproximadamente hace 2.200 millones de años INGEOMINAS (2001)<sup>1</sup>. En este ciclo se conforma el escudo de la Guyana con rocas de composición ígneo metamórficas, es el paquete litológico más antiguo del territorio colombiano.

Una segunda etapa geológica sucede hace aproximadamente 1.000 millones de años, en un ambiente dominado por la morfología del escudo guyanés; se establece un levantamiento fisiográfico importante de serranías, para las futuras cordilleras.

Posteriormente, en una tercera fase del ciclo geológico en el Paleozoico tardío se presenta un engrosamiento de la corteza terrestre, separación del continente americano con África, migración del agua y origen del océano Atlántico; hacia el cretácico temprano el mar se extiende en toda la zona norte andina e inicia un periodo de alta actividad tectónica, deformaciones de la corteza a lo largo de la fosa oceánica y zona de subsidencia del pacífico.

En esta última etapa denominada orogenia andina, predominaba un ambiente insular entre zonas de fosas oceánicas y bordes de rocas cratónicas precámbricas; las cuales se fueron fracturando, dividiéndose en bloques hundidos y separados, con grandes cuencas y cerros compuestos por rocas cristalinas, tal es el caso de la ciudad de Bogotá. Durante este periodo, la zona del arco insular volcánico ancestral de la cordillera presentaba un magmatismo activo, con depósitos intrusivos en rocas metamórficas del Paleozoico y Precámbrico.

Además, la morfología de arco presentaba un bajo relieve, quedando sumergido en las trasgresiones marinas del Cretácico Medio. Mientras, en la zona del macizo montañoso los depósitos contaban con características de materiales de detríticos. En el Cretácico temprano,

---

<sup>1</sup> INGEOMINAS. Informe Interno - Tomografía Sísmica Local y Q de Coda para el territorio Colombiano.

debido a procesos de subducción se formó una fosa próxima a la zona del arco insular (en la zona de Cauca y Patía), también se produjo una superposición y desprendimiento de una parte de la placa, la cual se hundió a lo largo de la fosa y conllevó a un aumento de la masa continental por los sedimentos superpuestos y metamorfoseados de este nuevo borde (zona de acreción), estos materiales formaron el basamento de la actual cordillera occidental.

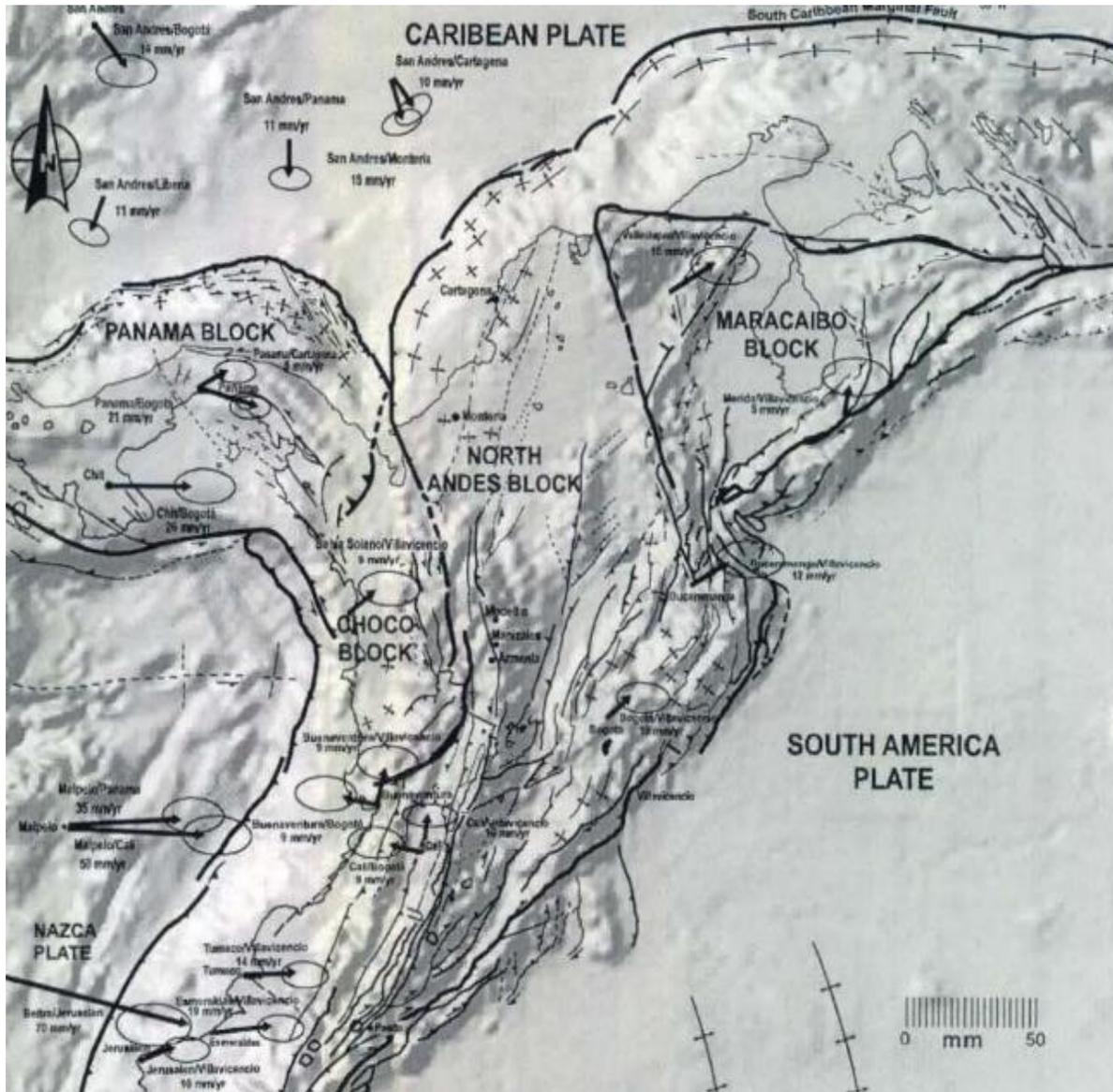


Figura 22. Vectores de deformación y desplazamiento placas tectónicas en el país. (INGEOMINAS, Proyecto: C01R01 - Investigación y Monitoreo de la Actividad Sísmica y Volcánica, 2001)

Posteriormente, hacia el cretácico medio tardío, la zona de subducción se desplaza hacia el occidente, generando el sinclinal de Bolívar donde corren los ríos Atrato y San Juan. Luego, la



Manizales hasta el norte de Ecuador, este tipo de estructuras volcánicas han evidenciado desplazamientos laterales de la falla de Romeral, zonas de tensión, cizallamiento y levantamiento de las cordilleras oriental, central y occidental, con el hundimiento de varias cuencas intramontanos. Los vectores de desplazamiento medidos a través de la corteza y la formación de las estructuras de cizallamiento demuestran este movimiento, como se representa en la Figura 22.

Hace 3.5 a 3.1 millones de años, se presentó la colisión entre América Central y Suramérica con interrupciones parciales del proceso de subducción en una parte de la fosa, debido a una hipotética falla de transformación a lo largo de la antigua zona de subducción de Panamá, que aceleró el proceso de levantamiento de la cordillera andina y activación de esta cadena volcánica montañosa.

Finalmente, durante el Plioceno y hasta la actualidad los procesos de subducción se han definido, conformando las zonas morfológicas de la cordillera central y oriental, serranía del Perijá y Sierra Nevada de Santa Marta, los sistemas estructurales de la falla de Romeral, Bucaramanga y otras fallas inversas de alto ángulo, el sumergimiento de la placa Caribe con la Suramericana y el levantamiento andino subsecuente.

De acuerdo con Vargas, (2.005), cerca del 20% del territorio colombiano está conformado por rocas ígneas y metamórficas, concentradas principalmente en la Cordillera Central, la Sierra Nevada de Santa Marta y el Escudo de la Guyana en la parte más oriental del país. Las cordilleras andinas Oriental y Occidental corresponden a secuencias sedimentarias mesozoicas y cenozoicas; las zonas planas y depresiones fueron rellenadas por sedimentos del terciario y el cuaternario.

Los depósitos sedimentarios dominan las zonas intramontañas de las cuencas sedimentarias, con aportes de materiales desde la cordilleras y zonas de mayor relieve, en las fosas y zonas de valles de las principales cuencas del país se han establecido materiales recientes conformados por clastos y depósitos finos, y con bajo grado de consolidación. La Figura 24 muestra la ubicación actual de los diferentes tipos de ambientes sedimentarios e ígneo – metamórfico en el subsuelo colombiano.

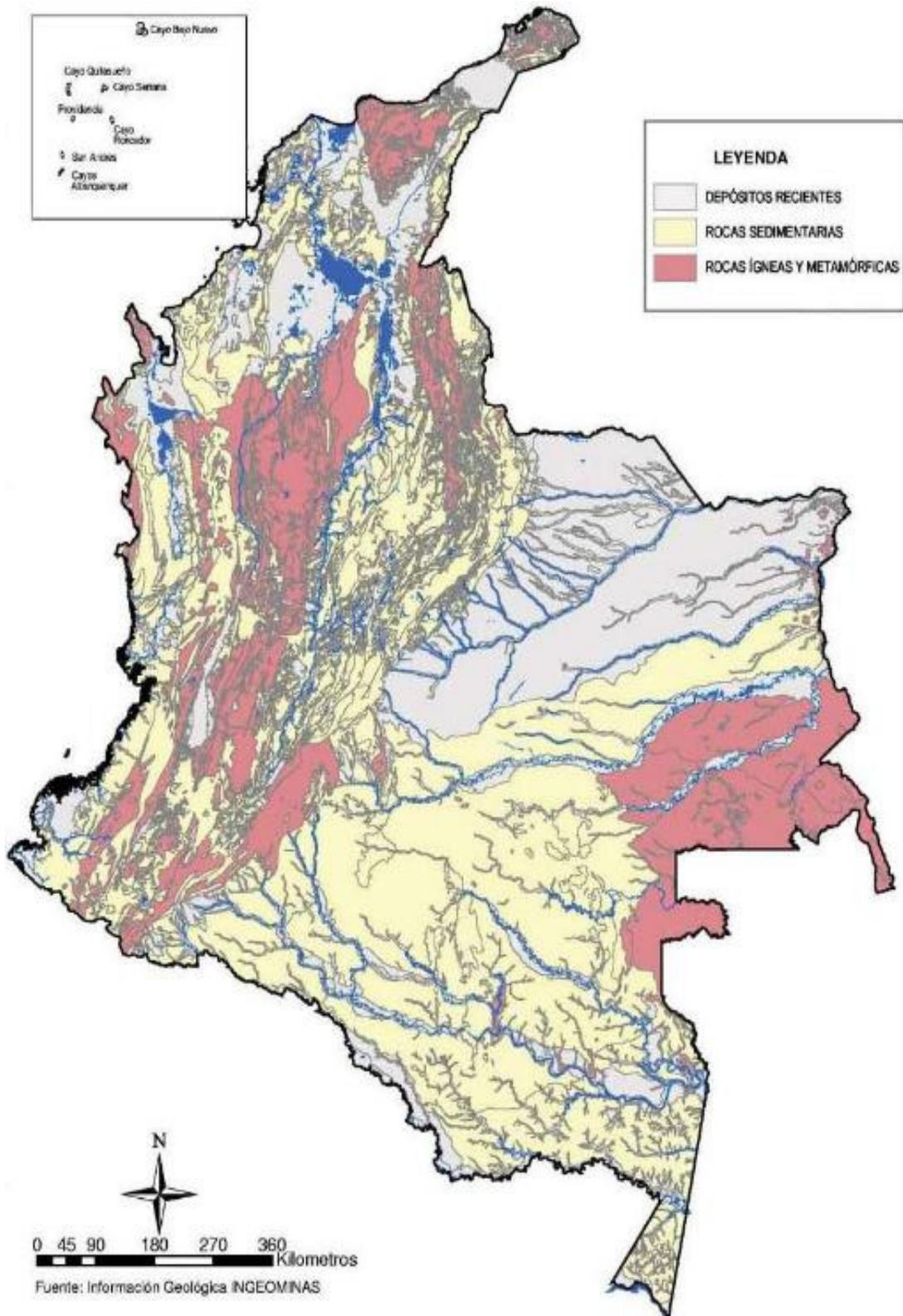


Figura 24. Mapa Geológico de Colombia con fines Hidrogeológicos. (INGEOMINAS, Programa de Exploración de Aguas Subterráneas, 2004)

#### 2.4. Sistemas hidrogeológicos.

La hidrogeología estudia los aspectos que intervienen en el estudio del agua subterránea, los medios geológicos, el flujo, almacenamiento y distribución en la naturaleza.

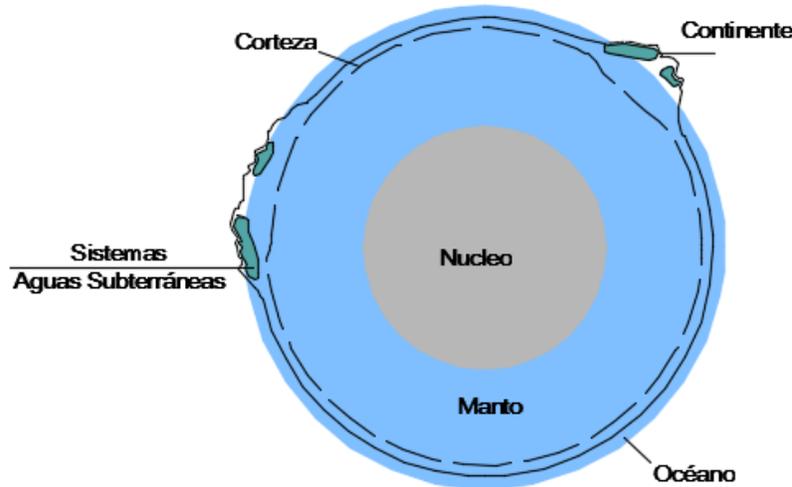


Figura 25. Aguas subterráneas en el sistema global  
Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hydrogeology. Pag 11.

Los sistemas acuíferos de aguas subterráneas se localizan en la parte externa de la corteza terrestre, en la Figura 25 se presenta de manera esquemática la ubicación del agua y sistemas hidrogeológicos, estos se basan en ciclos naturales climáticos, atmosféricos y de la misma corteza terrestre (subducción / zonas de convergencia y divergencia).

La hidrogeología estudia el movimiento del agua subterránea con respecto a los macizos naturales en los que los fenómenos atmosféricos tienen importancia, incluyendo el transporte del agua y su descarga en superficie, zonas de recarga y descarga, así como el estudio de la manera como el fluido va lavando elementos y transformando las propiedades del macizo.

En Colombia, las investigaciones lideradas por el servicio Geológico Colombiano e IDEAM, cuyos resultados se plasman en el Estudio Nacional del agua (IDEAM, 2014). En el subsuelo del país se han señalado 16 cuencas hidrogeológicas, donde los sistemas acuíferos presentan características homogéneas de capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.

A través del conocimiento geológico, la distribución geomorfológica del territorio, el tipo de roca y sus características hidráulicas (almacenamiento, transmisividad hidráulica), se delimitaron las cuencas y regiones hidrogeológicas homogéneas, (Vargas, 2005). Estas zonas que de mayor a

menor medida permitirían un almacenamiento y transmisión de agua subterránea, se encuentran en contacto con barreras impermeables, principalmente en basamentos ígneos – metamórficos.

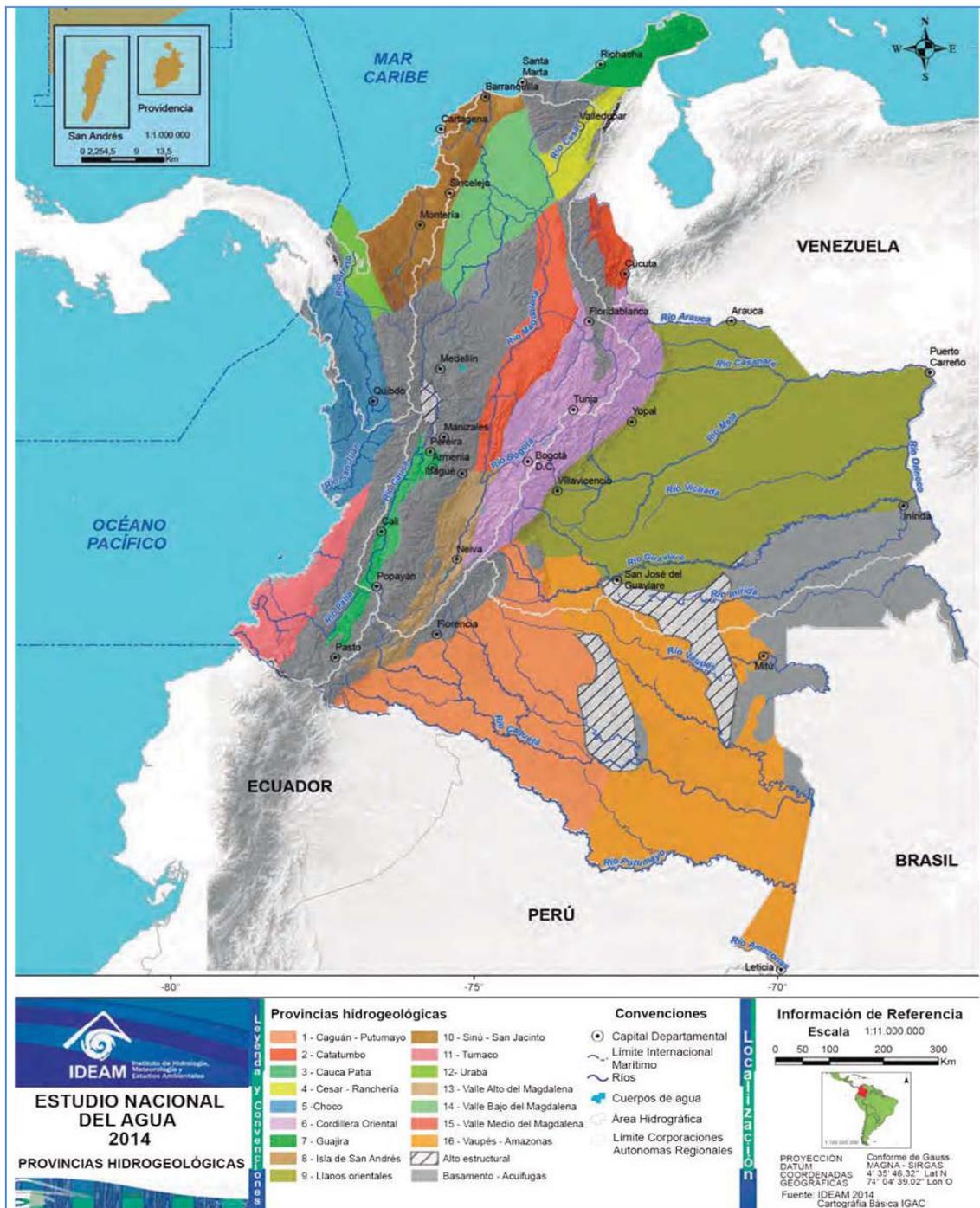


Figura 26. Provincias Hidrogeológicas de Colombia. Fuente: (IDEAM, 2014). Estudio Nacional del Agua.

#### 2.4.1. Zonas aptas para el almacenamiento del agua subterránea.

Los ambientes asociados a rocas sedimentarias son propicios para almacenar y transmitir el agua subterránea, se encuentran ubicados en zonas como: los llanos orientales, zonas volcánicas (depósitos piro clásticas), cuencas sedimentarias de los ríos Magdalena y Cauca. (Vargas, 2005)

Geomorfológicamente, se dividen en zonas de valles y planicies, delimitados por zonas de cordilleras o borde marino en la zona norte y occidental del país, como se representa en la Figura 26, donde se ubican las principales provincias hidrogeológicas del medio colombiano.

#### 2.4.2. Barreras y fronteras de los sistemas acuíferos.

Se ubican en zonas asociadas a basamentos y ambientes ígneos metamórficos, con una baja posibilidad de almacenar líquido debido a sus características hidrogeológicas, tienen una nula transmisividad y porosidad, el fluido se movilizaría a través de las discontinuidades, Estas regiones se localizan en los núcleos de las cordilleras central y occidental, las Serranías del Baudó, Darién, Perijá, escudo de la Guyana, Macizo Santander-Floresta al Norte de la Cordillera Oriental y Macizo de Garzón – Quetame.

Este tipo de ambiente litológico actúa como una barrera impermeable de los acuíferos y zonas de mayor potencial de almacenamiento. Sin embargo, es común encontrar acuíferos locales en zonas de alteración y cizalla, con propiedades secundarias propicias para el almacenamiento y transmisión del agua.

#### 2.5. El ciclo hidrológico.

Es el proceso que describe los cambios de estado del agua en la naturaleza, en la superficie e interior de la tierra. Se puede representar en un esquema básico de los diferentes estados y formas, como se presenta en la Figura 27. Sin embargo, este ciclo en la realidad no sigue este modelo idealizado, debido a los fenómenos y cambios climáticos actuales que presentan un gran dinamismo y variación.

Los procesos hidrológicos son continuamente renovados por procesos naturales como inundaciones que transportan el líquido a los lagos, lagunas, el mar o zonas artificiales como embalses.

Los regímenes hidrológicos establecen las características para el flujo del agua desde la atmósfera hacia los continentes, las relaciones entre las variables como: precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación, transpiración, se esquematizan en la Figura 31 y se describen en los siguientes párrafos.

Entre las ciencias que se ocupan del estudio de este ciclo, se encuentran:

- Meteorología y Climatología — agua en la atmósfera.
- Hidrología — aguas superficiales.
- Hidropedología (Edafología) — agua en los suelos.
- Hidrogeología — aguas subterráneas.



Figura 27. Ciclo Hidrológico.  
Fuente: (USGS, The water cycle, 2016).

En la naturaleza se observa como los procesos de condensación y evaporación se presentan principalmente en las zonas marinas y continentales, le siguen los procesos de precipitación en zonas de mayor altitud; los cuales conllevan a las formas de infiltración del agua hacia el subsuelo, escorrentía superficial, las diferentes formas de recarga y almacenamiento del líquido en el subsuelo o su distribución en superficie.

En la Tabla 2 se pueden apreciar las tasas de precipitación, evapotranspiración y escorrentía por Continente, se muestran altos valores de precipitación y evaporación para Sudamérica y en países como Colombia debido a su ubicación en el trópico, donde se acentúan los índices de alta pluviosidad.

Tabla 2. Tasas de precipitación, evapotranspiración escorrentía por continente.

Contiene	Precipitación (mm/ año)	Actual evapo- transpiración (mm/año)	Total escorrentía (mm/ año)
África	670	510	160
Asia	610	390	220
Europa	600	360	240
Norteamérica	670	400	270
Sudamérica	1350	860	490
Australia/ Nueva Zelanda	470	410	60

Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology. Pag 15.

## 2.6. Condiciones Climáticas.

El clima es una de las variables más importantes en el ciclo hidrológico, para un país como Colombia, ubicado en la zona ecuatorial, las condiciones meteorológicas están gobernadas por las corrientes Norte y Sur hacia los polos, además de un flujo hacia el este de los vientos Alisios.

La confluencia de estos movimientos con el mar genera unos cambios de temperatura en los océanos, lo que hace circular masas de agua cálida y descarga de precipitaciones hacia los continentes. En la Figura 28 se representan los vectores de movilización del viento, desde los polos hacia las zonas tropicales y dirección septentrional de los vientos hacia la parte ecuatorial de los continentes.

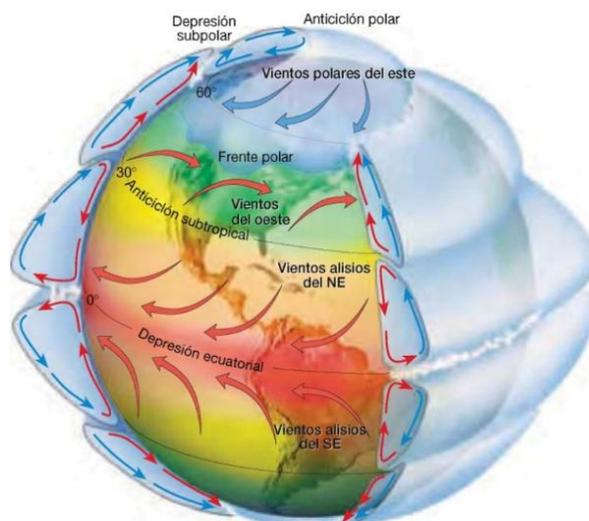


Figura 28. Diagrama idealizado de la circulación del aire en la superficie terrestre. Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física

Debido a los mecanismos de flujo y transferencia de calor entre los vientos Alisios y polares se posibilitan las lluvias en el sur este asiático, así como las precipitaciones en zonas tropicales.

En este ciclo del flujo el aire es constante, sin embargo, en los últimos años ha presentado variaciones, ralentizando o acelerando el movimiento en diferentes regiones del planeta.

Esto se ha evidenciado con la desaceleración y acumulación en el flujo de las masas de aire caliente de los vientos alisios en las costas del pacifico oriental (Perú - Chile), ocasionando un calentamiento de las masas de agua del mar, fenómenos de evaporación, condensación y precipitación en las costas suramericanas. Mientras tanto, hacia la parte de Oceanía y Asia, debido a que las aguas cálidas y las precipitaciones no llegan, se provocan fenómenos de sequía en lugar de altas lluvias en los conocidos Monzones.

A la par, hacia centro América y Colombia, las masas de aire que traerían agua y precipitaciones provenientes de las costas asiáticas no tienen lugar, por lo tanto, hay un fenómeno de sequía acentuada. A esta anomalía climática, pescadores peruanos le dieron el nombre de fenómeno del niño, debido a su aparición hacia la época de final de año.

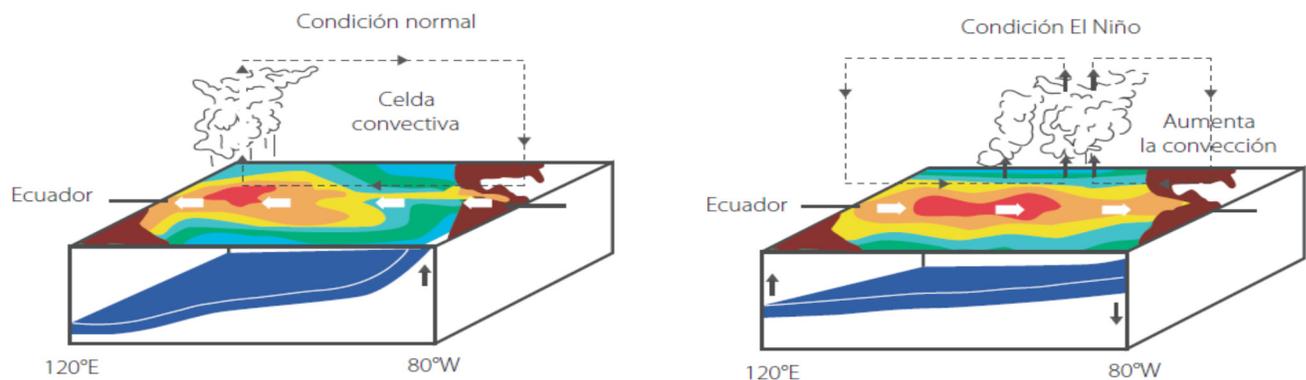


Figura 29. Transferencia de temperatura en condiciones Normales y debido al Niño. Fuente: (NOAA, 2016). What is the niño?

Por otro lado, un proceso meteorológico que genera también un fuerte desequilibrio en el país es el denominado fenómeno de la niña, que implica una afectación de los vientos Alisios, debido a un fuerte y rápido flujo de las masas de aire caliente hacia las costas del sur este asiático, con las consecuentes altas tasas de precipitación en esta región. Paralelamente, se producen sequias marcadas hacia las costas del pacifico oriental (Chile - Perú). En la zona de Centro América y Colombia se producen vientos polares y en zonas de baja presión Norte – Sur, que favorecen el flujo de las masas de agua y altas tasas de precipitación.

En investigaciones de estas variaciones climáticas se han propuesto diferentes indicadores para determinar y validar los fenómenos del Niño o Niña (IDEAM, 2014), el más aceptado es la variación de la temperatura superficial del mar, para el niño se caracteriza por un valor ONI (Índice Oceánico del Niño) mayor o igual a  $0.5^{\circ}$ , mientras que para el fenómeno de la niña esta variación será  $-0.5^{\circ}$ . Los valores deberán prolongarse mínimo tres meses, para poder ser catalogados como un fenómeno climático.

### 2.6.1 La temperatura

Es un factor vital en el ciclo hidrológico que interviene en todas sus fases y regula el factor de evaporación y transpiración del agua en sus diferentes etapas. El índice de temperatura presenta un gradiente vertical, disminuyendo hacia la troposfera. Debido a los cambios de temperatura se presentan fenómenos de convección y movimiento de las masas de aire. Sin embargo, se presentan fenómenos de inversión del gradiente de temperatura en algunas zonas altamente contaminadas, principalmente en horas de la mañana, donde la tierra se encuentra a baja temperatura por la transferencia del calor en horas de la noche.

La temperatura media diaria se calcula como la media aritmética de los registros máximos y mínimos en el día, a partir de los datos de las estaciones meteorológicas.

#### 2.6.1. Radiación solar.

El sol y su energía en forma de radiación es la principal fuente de procesos en el ciclo hidrológico, es un factor decisivo para los cambios de estado del agua, en los procesos de evaporación, presentándose como radiación directa a la atmósfera o la superficie terrestre. La radiación se debilita en las diferentes capas atmosféricas por dispersión de las moléculas de aire seco.

Se presenta otra forma de radiación difusa a partir de la dispersión de los rayos lumínicos en la atmósfera, incidiendo en los objetos en la superficie de la tierra, generando ondas y fenómenos ópticos de reflexión y refracción.

Además, la radiación activa los procesos biológicos de la fotosíntesis, con una transferencia de la energía lumínica a los procesos metabólicos de los organismos vegetales.

### 2.6.2. Humedad Atmosférica.

Se expresa como el contenido de vapor de agua en la atmosfera, debido a procesos de radiación, evaporación y transpiración en superficie; en hidrología es de suma importancia por ser el punto inicial del ciclo del agua, que se integra al ciclo hidrológico en forma de precipitaciones.

### 2.6.3. Los Vientos.

Es un factor decisivo en el ciclo hidrológico, ya que influye en la transferencia de calor en diferentes puntos de manera indirecta con la humedad y proceso de evaporación.

Los vientos están condicionados al relieve del terreno, con la velocidad y generación de ráfagas, desde vientos calmos hasta huracanes en zonas donde las condiciones climáticas y topografía son propicias.

### 2.6.4. Las precipitaciones.

Se definen como toda forma de humedad que cae desde puntos de mayor altitud y tiene origen en las nubes, existen diferentes formas de precipitación: llovizna, nieve, aguanieve y granizo. La principal fuente para las precipitaciones es la evaporación desde la superficie en los espejos de agua en el continente y en los océanos, se clasifican de la siguiente manera:

- Ligera, para tasas de caída de hasta 2.5 mm/h.
- Moderada, desde 2.5 hasta 7.6 mm/h.
- Fuerte, por encima de 7.6 mm/h.

El origen de este fenómeno está asociado a la diferencia en la temperatura de las masas de aire en las capas de la atmosfera, que presentan cambios del gradiente de temperatura y conllevan al movimiento del aire, su ascenso como vapor de agua y saturación en las nubes.

Estos procesos de formación del vapor de agua requieren la presencia de puntos de enucleación, resultado de productos de combustión, como: óxidos de nitrógeno, partículas de sal y hasta minerales arcillosos y caolinita; donde las gotas de agua empezaran a formar núcleos y estructuras mayores de finísimas estructuras, el esquema de este proceso se representa en la Figura 30.

Las características principales de los puntos de enucleación son:

- Atracción electrostática entre las gotas de agua.
- Turbulencias y cambios de aire, que diferenciara los materiales en la atmosfera.
- La acumulación de las gotas finas a núcleos de gotas mayores.
- La diferencia de temperatura entre gotas frías, que se engrosan y expanden hacia zonas más calientes, por fenómenos termodinámicos.

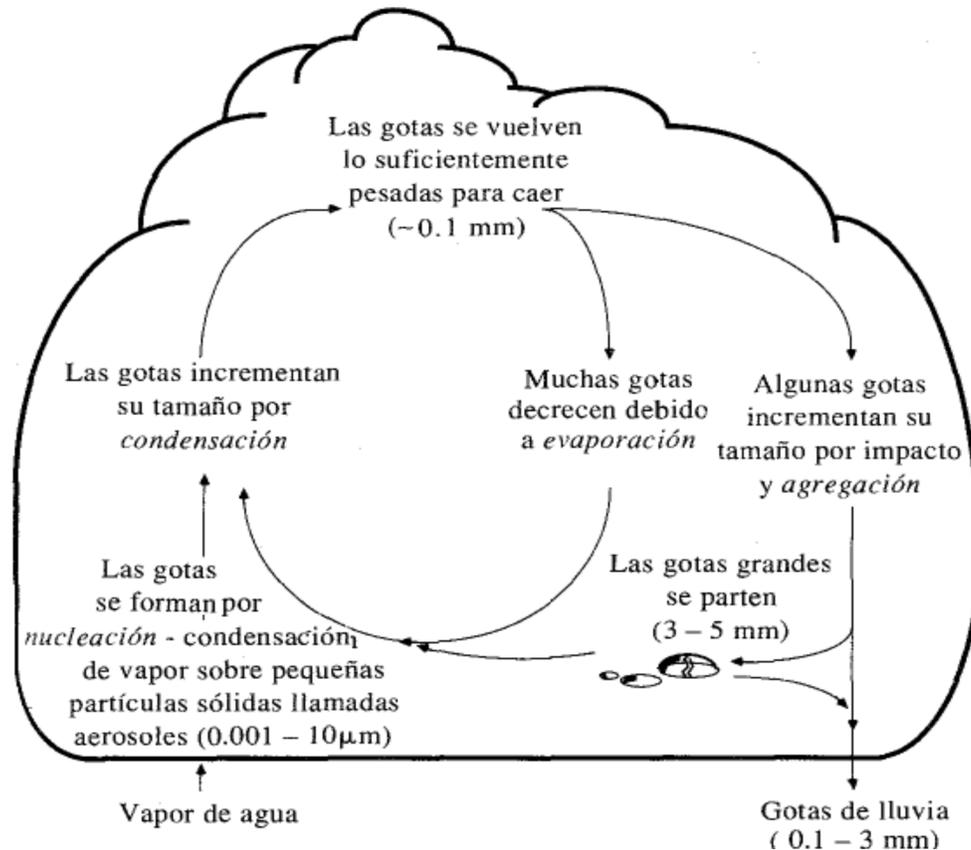


Figura 30. Generación y descarga de la precipitación.  
Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Hidrología Aplicada.

El agua de *precipitación* que alcanza la superficie terrestre (P) fluye parcialmente como *escurrimiento superficial* (R). Parcialmente se infiltra en el subsuelo y escurre como agua subterránea (*escurrimiento subterráneo* G). Las cantidades de escurrimiento dependen en alto grado de la precipitación; sin embargo, una gran parte de ella se pierde por la *evaporación* (E), que depende de la temperatura. El *interflujo* es la parte del escurrimiento superficial que se retarda por una vegetación densa y por su curso a través de los horizontes superficiales del suelo (horizontes A).

### 2.6.5. La Evapotranspiración.

Es un proceso constante en el ciclo hidrológico, producto de la radiación solar que genera un cambio de estado líquido y vapor. Otro tipo de evaporación está asociado a la actividad biológica de las plantas y sus procesos metabólicos, generando un fenómeno denominado transpiración.

Entre los factores dominantes en este proceso se encuentran: la radiación solar, temperatura del aire, presión de vapor, vientos y presión atmosférica. Además, el factor de evaporación varía con la latitud, época del año, hora del día y condiciones de nubosidad.

En las zonas no desérticas, la vegetación desempeña un papel importante en el ciclo hidrológico, el consumo de agua disminuye el escurrimiento superficial, la infiltración y el escurrimiento subterráneo. La transpiración de las plantas aumenta la evaporación, el total de la evaporación se llama evapotranspiración, proceso que se representa en la Figura 31.

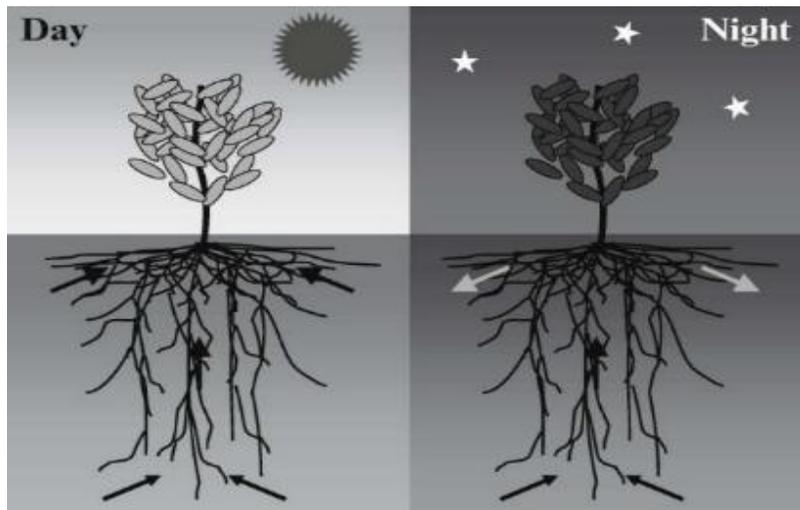


Figura 31. Procesos evapotranspiración, intercambio de agua a la atmósfera - suelo. (Taniguchi & Hiyama, 2014). Groundwater as a Key for Adaptation to Changing Climate and Society

### 2.6.6. La Escorrentía.

Durante las precipitaciones una parte del agua lluvia es retenida por la cobertura vegetal y depresiones del terreno que almacenan temporalmente el líquido, en la medida que la intensidad de lluvia y su duración es prolongada, en las capas de suelo más superficiales se presentan acumulaciones e inicio de un flujo que varía según la pendiente del terreno, activando los procesos de recarga hacia cauces y drenajes naturales, constituyendo la escorrentía superficial.

A su vez, debajo de la superficie se presenta la escorrentía sub - superficial, ambas conforman la escorrentía directa. Además, con la acción del agua se genera una disgregación de los

materiales, en la Figura 32, se muestran los valores de concentración de sólidos de acuerdo con el tipo de terreno donde fluye el líquido.

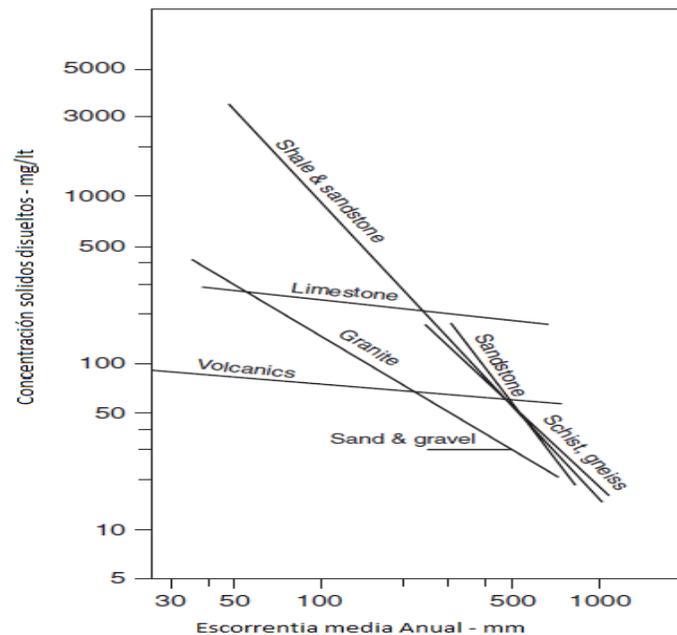


Figura 32. Diferencias de concentración de sólidos disueltos en la escorrentía superficial en función del tipo de roca (Walling, 1980). Fuente: (Appelo & Postma, 2005). Geochemistry, groundwater and pollution, pág. 55

### 2.6.7. La Infiltración.

Es producto del movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del subsuelo. La percolación es el movimiento del agua dentro del suelo y ambos fenómenos (la infiltración y la percolación) están íntimamente ligados. Cuando se presentan en exceso pueden formar depósitos de agua subterránea, que a su vez pueden formar zonas de descarga y alimentar cursos de agua superficiales.

Los fenómenos de infiltración son el punto de abastecimiento del agua en los almacenes naturales que se presentan en el subsuelo, que a su vez alimentan los drenajes naturales.

### 2.6.8. Aguas Geológicas.

En el ciclo hidrológico se presentan depósitos o almacenes en periodos de tiempo muy diferentes; a corto plazo los cauces de los ríos, la humedad del suelo y la atmósfera, en un periodo mayor (diez mil años o más) los glaciares o depósitos de acuíferos.

Con este almacenamiento en muchas ocasiones se presenta déficit o exceso en el balance hídrico, las aguas podrían surgir desde el manto terrestre, en el ciclo hidrológico o con cantidades despreciables denominadas aguas juveniles.

Las aguas geológicas se presentan en zonas de almacenamiento o rocas con propiedades para almacenar el fluido, con bajas propiedades de transmisividad, generando un *déficit* en el balance hídrico actual. Los diferentes tipos de almacenes para las aguas geológicas son:

- Aguas en sedimentos marinos.
- Aguas subterráneas en sistemas cerrados, entre capas impermeables.

### 2.7. La Molécula del Agua.

El agua es uno de los compuestos más importantes en los procesos físicos y biológicos de la naturaleza, está formado por una unidad de oxígeno y dos de hidrógeno. Descriptivamente es un líquido inodoro e insípido, en pequeña cantidad incolora y verdosa en grandes masas, refracta la luz, se solidifica por el frío, se evapora por el calor; forma la lluvia, las fuentes, los ríos y los mares, tiene propiedades de disolvente, características de expansión y solidificación a presión no excesivamente alta.

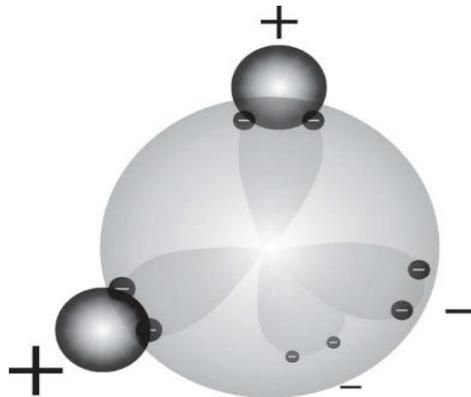


Figura 33. Configuración geométrica típica de la molécula dipolar del agua ( $H_2O$ ), con el átomo de oxígeno en un ángulo de  $105^\circ$ . (Clark, 2015).

Sus propiedades están relacionadas con la estructura molecular, ya que presenta un enlace covalente, con una característica de bipolaridad que requiere una energía alta para separar la molécula y generar altos valores de tensión superficial y energía de vaporización del agua.

La propiedad de bipolaridad de la molécula propicia su poder disolvente, conformando asociaciones complejas con sales y azúcares, estas combinaciones originan una neutralización de la partícula.

El agua en la naturaleza se presenta con diferentes isotopos, con una estructura molecular similar pero con diferencias en la masa, debido a cambios en las densidades atómicas-originales en

procesos radioactivos complejos, rayos cósmicos y variaciones atmosféricas, como se presenta en la Tabla 3 y Tabla 4.

### 2.7.1. Propiedades físicas del agua.

Los fenómenos climáticos y cambios de temperatura generan procesos de desplazamiento de la molécula en la naturaleza, acumulación desde las zonas polares y glaciares donde se presentan movimientos en función de la gravedad de las masas. También el vapor de agua genera una movilización y concentración en la atmosfera por fenómenos termodinámicos y gradientes de temperatura.

Tabla 3. Densidad del agua a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
0	999.87
4	1000
5	999.99
10	999.73
15	999.13
20	998.23

Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology, pag .37.

La viscosidad es otra de las propiedades de la molécula, varía de acuerdo con el ambiente, define la resistencia al paso del fluido a través de un medio y facilita la trasmisión del líquido en zonas como las fracturas de un macizo. En la Tabla 4, se presenta la variación de la viscosidad dinámica y cinemática del líquido a diferentes temperaturas.

Tabla 4. Viscosidad y temperatura del agua. (Verruijt, 1970).

Temperatura (°C)	Viscosidad Dinámica (kg/(m*day))	Viscosidad Cinemática (m <sup>2</sup> /day)
0	154.66	0.155
5	131.33	0.131
10	113.18	0.113
15	98.50	0.0986
20	87.26	0.0874

Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology, pág.39

Con los cambios en la presión y temperatura, se generan desplazamientos y variaciones en la distribución del líquido. Como se presenta en la Figura 34, en el planeta la proporción mayoritaria es ocupada por los mares y océanos, o agua salada; mientras que, en los continentes el líquido se presenta como hilos de agua, lagos, manantiales, cuerpos sólidos en capas de hielo y glaciares, en su mayoría agua dulce.

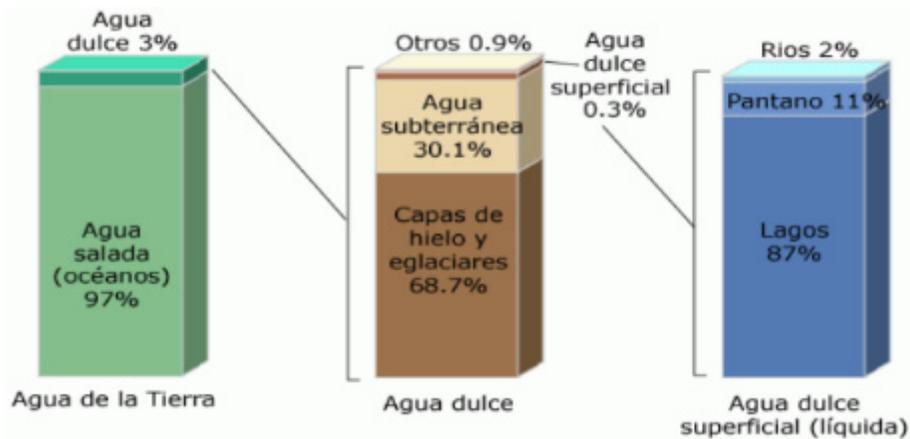


Figura 34. Distribución del agua en el planeta. (USGS, The water cycle, 2016)3

### 2.7.2. Tipos de agua.

Las cantidades de agua han permanecido constantes a través de la historia natural de la tierra; sin embargo, sus características y condiciones cambian rápidamente, debido a los ciclos y fuerzas naturales presentes en el planeta. A continuación, se resumen los diferentes tipos de agua.

### 2.7.3. Agua Meteórica.

Se da esta denominación al agua cuando se encuentra en estado gaseoso o como vapor de agua debido a los cambios de temperatura en la atmosfera; es la principal fuente de precipitación.

### 2.7.4. Agua Congénita.

Fluido que está ligado intrínsecamente a las rocas en su periodo de formación o en eventos posteriores a la génesis de los materiales, las cuales se almacenan en diferentes zonas vacías, poros de los grupos litológicos.

### 2.7.5. Agua Juvenil.

Esta forma de agua se origina con la condensación de los líquidos hidrotermales en zonas activas sísmicamente, proviene del interior de la tierra.

### 2.7.6. Agua Superficial.

Se denomina agua superficial al fluido que se encuentra sobre la extensión del terreno, esta almacenada o fluye libremente en ríos, lagos, océanos, en estado sólido como hielo, glaciares o nieve en picos nevados.

Tabla 5. Tiempo de residencia de agua diferentes estados y ambientes naturales.

<b>Tipo</b>	<b>Tiempo de almacenamiento</b>	
Agua marina	2,500	Años
Nieve y Hielo	1600 -9700	Años
Permafrost	10,000	Años
Agua subterránea	900 - 1400	Años
Agua en el suelo	1	Años
Agua de lagos	17	Años
Agua en humedales	5	Años
Agua en ríos	17	Días
Vapor	8	Días

Fuente: (Taniguchi & Hiyama, 2014). Groundwater as a Key for Adaptation to Changing Climate and Society, Pag 20.

### 2.7.7. Agua Subterránea.

Corresponde a la parte del fluido que se encuentra por debajo del subsuelo almacenada en poros, fracturas de la roca y cavidades dentro del macizo natural.

## 2.8. Minerales y calidad del Agua en la Naturaleza.

Las características como la presencia de elementos químicos en las rocas, la velocidad y dirección del agua permiten establecer parte de su historia y del grupo geológico que la contiene. Las aguas poseen materia sólida disuelta como: litio, sales, cloruros y otro tipo de sustancias minerales. A continuación, se reseñan las asociaciones más comunes entre el fluido y compuestos químicos.

### 2.8.1. Sólidos disueltos.

Se refieren a materiales en estado sólido que se pueden presentar en depósitos de agua, el total de sólidos contenidos en las aguas naturales puede oscilar dentro de una gama de valores que van en concentraciones de 10 ppm como es el caso de agua lluvia o nieve y, hasta más de 300.000 ppm en salmueras y en ambientes de depositación marina.

### 2.8.2. Sílice.

Es un material abundante en la corteza, presenta características de baja solubilidad en ciertos silicatos en el agua, en temperaturas y pH estable la Sílice en las aguas naturales se encuentra en forma de ácido ( $H_2SiO_4$ ). El grado de solubilidad de la sílice amorfa se encuentra en el orden de 50 a 400 ppm, las aguas del subsuelo a temperatura normal contienen entre 90 a 110 ppm de sílice, esta cifra que puede variar en aguas de depósitos volcánicos o graníticos.

Así mismo, una baja concentración de este elemento genera una nula solubilidad de minerales de arcilla, feldspatos, debido al cuarzo. En general, las aguas subterráneas presentan concentraciones entre 5 a 15 ppm de SiO<sub>2</sub>, y una baja influencia debido al pH de este tipo de aguas en comparación con otros minerales.

### 2.8.3. Hierro.

En la corteza se encuentran grandes fuentes de este elemento, es uno de los minerales más representativos, aportando compuestos como magnetita, biotita, piroxenos, anfíboles, granates. Se presenta en rocas ígneas, metamórficas con una composición intermedia a básica y también en depósitos sedimentarios. Los procesos de descomposición por el ambiente, generan oxidación, dando lugar a materiales disueltos estables e insolubles en el agua subterránea, la mayor parte del hierro disuelto se podría encontrar en forma ionizada, limitado por la solubilidad del carbonato ferroso y por su concentración total. En la Figura 35 se representan las reacciones oxido reducción y ambiente natural, así como las combinaciones con los iones de Hierro.

La reacción que representa el contacto del aire con agua subterránea que contiene iones ferrosos es:

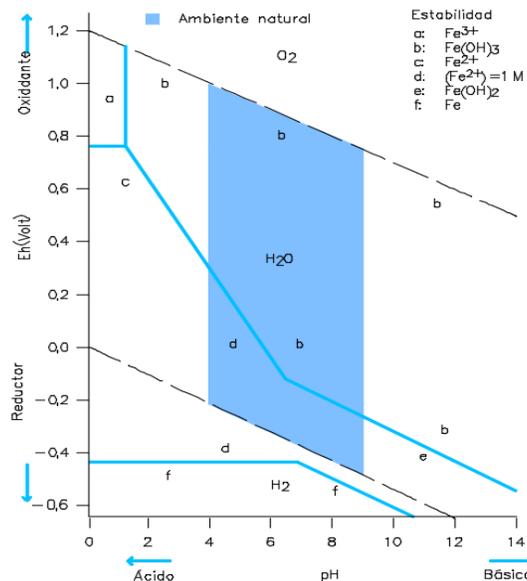
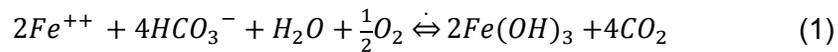
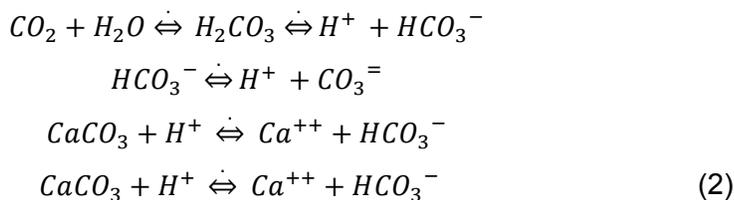


Figura 35. Reacciones oxido reducción en el agua, iones de Hierro Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hydrogeology, pág. 165

#### 2.8.4. Calcio.

Es un elemento abundante en la corteza terrestre, movilizado en los procesos naturales y biológicos de la hidrosfera, su principal aporte en las aguas subterráneas se presenta en rocas sedimentarias de origen marino a partir de minerales de Calcita, Aragonita, Dolomita, Anhidrita y Yeso. En las rocas ígneas y metamórficas se encontraría como una descomposición de calcio en minerales como: Apatito, Wollastonita, Fluorita y en el grupo de feldespatos, anfíboles y piroxenos.

El carbonato reacciona y se disuelve fácilmente con la molécula del agua, debido a su característica ionizante principalmente en aportes de  $H^+$ , disociándose la molécula de ácido carbónico  $H_2CO_3$ . Entre las reacciones más comunes de este compuesto se presenta como:



En las aguas naturales un factor que controla las reacciones es la cantidad de dióxido de carbono  $CO_2$ , que está dado por la aportación de gases con actividad ígnea, metamorfismo de los carbonatos y diagénesis en depósitos orgánicos.

Un aporte importante del calcio se encuentra en depósitos de salmueras de cloruros, se da principalmente por intercambio de mineral de magnesio.

#### 2.8.5. Magnesio.

Las fuentes naturales se encuentran asociadas a minerales de dolomita, en rocas sedimentarias en minerales de biotita, hornblenda, Augita, Serpentina, basaltos, Talco, Diópsido y Tremolina. En rocas ígneas y metamórficas se origina en depósitos de calcitas, donde presenta un intercambio y reacción con el Magnesio.

En compuestos del Magnesio, la solubilidad está controlada por su reacción con el dióxido de carbono como un agente catalizador que aumentará o disminuirá las cantidades de este elemento. Algunos de los minerales más comunes en la reacción con el Magnesio son sulfatos, carbonatos y cloruros.

El magnesio en el agua genera uniones ionizantes en un intercambio catiónico con otros compuestos, los iones de calcio o magnesio podrían precipitarse en las soluciones debido a la movilización y de este elemento a otros compuestos.

Las concentraciones más frecuentes de magnesio se encuentran en el orden de 40 a 100 ppm, aportes mayores se darían en zonas de salmueras o agua marina.

#### 2.8.6. Sodio.

Su aporte en las aguas subterráneas está ligado a depósitos de Plagioclasas, grupos de arcillas, Naftalinas, Sodalita, Stilbita, Natrolita y algunas rocas ígneas y metamórficas. En ocasiones las sales que forman el sodio tienen una baja reactividad y por tanto poca solubilidad; sin embargo, en áreas donde se presente una tasa elevada de concentración tal como depósitos de cloruro o bicarbonato de sodio se podría presentar una alta precipitación y disolución del sodio en el agua subterránea.

En general, los compuestos de este elemento presentan un alto grado de solubilidad, se concentran por fenómenos de evaporación en extensas llanuras y cuencas endorreicas de áreas desérticas.

Los procesos de aporte de este elemento en el agua natural se generan por intercambio iónico, movilizándolo o intercambiando iones de calcio a sodio en formaciones acuíferas, generando en algún momento reversibilidad en la reacción de acuerdo con las condiciones del medio de (evaporación).

#### 2.8.7. Potasio.

El origen más común de este elemento se encuentra asociado a Ortoclasas, Microclimas, Biotitas, Leucitas, Nefelinas en rocas ígneas y metamórficas; el agua subterránea en depósitos de evaporitas con grandes cantidades de potasio en un proceso de disolución de la Silvina y nitrato de Potasio.

El potasio presenta una baja movilidad, se descompone y fija en compuestos de arcillas, originados por procesos orgánicos donde haya vegetación.

En las sales, el potasio presenta una alta reactividad, cuando se disuelve en el agua el mineral es transportado por procesos de Intercambio iónico en aguas subterráneas y fenómenos de precipitación.

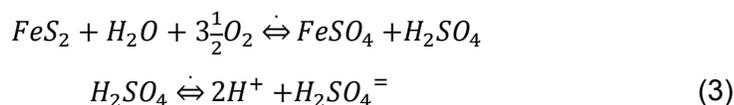
#### 2.8.8. Carbonatos y bicarbonatos.

En diferentes ambientes la alcalinidad de las aguas está controlada por iones de carbonato, hidróxidos de hierro, silicatos y compuestos de fosfatos. En los acuíferos y depósitos subterráneos los iones de carbonato están controlados por el dióxido de carbono en combinación con sodio, posiblemente por la evaporación del suelo en zonas desérticas o de alta radiación.

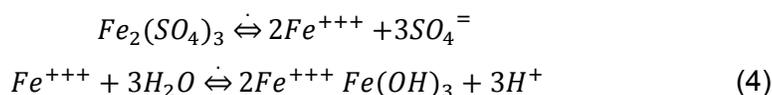
En el agua subterránea se presentan concentraciones promedio de 50 a 400 ppm de iones de carbonato, en limitadas ocasiones, con pH inferior a 4.5 se genera disolución de carbonatos en ácido carbónico.

#### 2.8.9. Acidez del agua subterránea.

La acidez en el agua se presenta en ambientes con pH menores de 4.5, originada por ácido clorhídrico, sulfúrico, sulfuros, la descomposición de material biológico, la reacción del hierro y aluminio, las ecuaciones de balance y transformación química típicas son:



Se presentan escenarios donde el sulfato ferroso  $FeSO_4$  reacciona, y genera hidróxidos, como los que se se representan en las siguientes ecuaciones.



Esto ultimo, evidencia la generación y concentración de hidrogeniones, por efecto de la disociación del ácido sulfúrico con la hidrólisis de iones férricos. La acidez está dada por la cantidad de ácido sulfúrico en una solución neutra. En manantiales naturales el valor de acidez en general presenta valores bajos, aunque en algunos manantiales podrían ser superiores cuando se tienen minerales de piritita, por ejemplo en depósitos sedimentarios.

#### 2.8.10. Sulfatos.

Los sulfatos están ligados a procesos ionizantes donde el azufre es el constituyente principal del compuesto, es un elemento relativamente abundante en rocas sedimentarias y en menor medida en rocas ígneas con contenidos asociados a fenómenos volcánicos. Un aporte considerable se presenta en depósitos de arcilla orgánica en procesos de oxidación de marcasita y pirita.

Este tipo de material se encuentra disperso en la atmosfera por la descomposición bacteriana y procesos volcánicos, la mayoría de compuestos sulfatados se disuelven fácilmente en el agua, como el sulfato de Bario o Estroncio. Los procesos de movilización más comunes se producen debido a la reducción de los sulfatos por acción bacteriana, generando procesos exotérmicos.

Además, en cavidades subterráneas de gas pueden formarse depósitos de sulfuro de hidrogeno que con la presencia de hierro podrían generar precipitaciones de sulfuro de hierro en soluciones acuosas, este proceso es activado y acelerado por la acción bacteriana.

En ambientes naturales, se encuentran concentraciones de aguas sulfatadas entre 0.2 a 100.000 ppm, extremos más altos se encontrarán en ambientes desérticos o depósitos de salmueras. En rocas ígneas y metamórficas, las aguas subterráneas han presentado concentraciones menores de 100 ppm, con procesos de acción bacteriana cerca de la superficie o cuando el acuífero infiltra capas con actividad biológica activa.

#### 2.8.11. Cloruros.

Su origen está asociado a minerales como: Sodalita y Apatito en rocas ígneas y metamórficas, se puede encontrar además en micas y hornblendas en zonas volcánicas. Los cuerpos intrusivos son otra fuente importante de cloruros.

El cloruro que se encuentra en el subsuelo se presenta en depósitos con ambientes marinos, enmarcados por procesos de transgresión en sedimentos, se produce por disolución de la halita (sal común) y otros minerales afines en depósitos de evaporitas,

Sin embargo, el origen principal de los cloruros en el agua subterránea se puede correlacionar con cloruro de la corteza terrestre proveniente de la atmosfera y precipitado a la superficie como agua lluvia y nieve. Las sales cloruradas son altamente solubles, necesitan procesos de evaporación y congelación intensa para su separación del líquido. Además, se pueden presentar concentraciones menores a 1 ppm en zonas poco profundas, en zonas desérticas son usuales

participaciones de 1000 ppm debido a percolación y asociación con salmueras de estratos y depósitos en superficie.

### 2.8.12. Nitratos.

El nitrógeno es uno de los elementos fundamentales en los procesos biológicos, más exactamente en el metabolismo de seres vivos; durante dichos procesos se generan aminoácidos, amoníaco, nitritos y nitratos. Estos compuestos infiltran a estratos infrayacentes, mientras sucede la recarga de formaciones acuíferas.

Su presencia está asociada a fenómenos biológicos y antrópicos de origen agrícola e industrial, una fuente natural también son las descargas eléctricas en fenómenos atmosféricos y formaciones de iones de este elemento en el aire. Es muy importante en fenómeno natural como el ciclo del Nitrógeno, en el cual se presentan intercambios de este elemento en reacciones con organismos y el carbono del subsuelo, para ser transformado en nitrógeno atmosférico y con esto producir óxido de nitrógeno a la atmosfera.

Los nitratos son altamente solubles y pueden entrar en procesos de reacción con materiales orgánicos y fenómenos de evaporación, en el agua se encuentran concentraciones promedio entre 0.1 a 300 ppm, llegando ocasionalmente a 600 ppm en zonas de abundancia de abonos o depósitos de desechos orgánicos de animales.

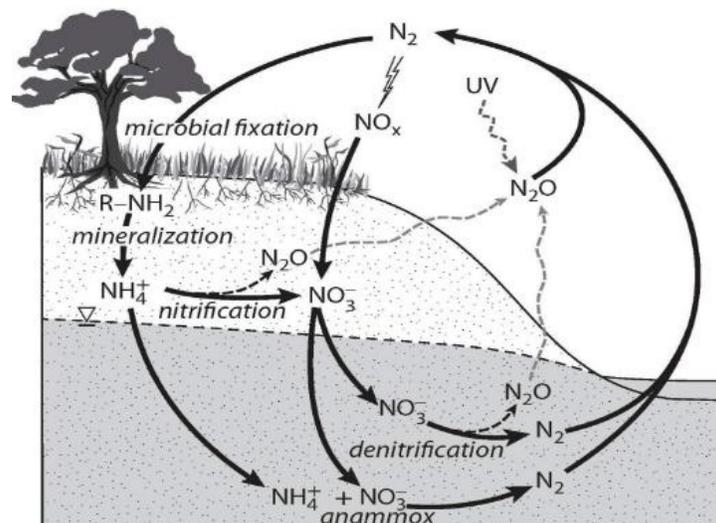


Figura 36. Ciclo del Nitrógeno.  
Fuente: (Clark, 2015). Groundwater Geochemistry and Isotopes, pág. 305.

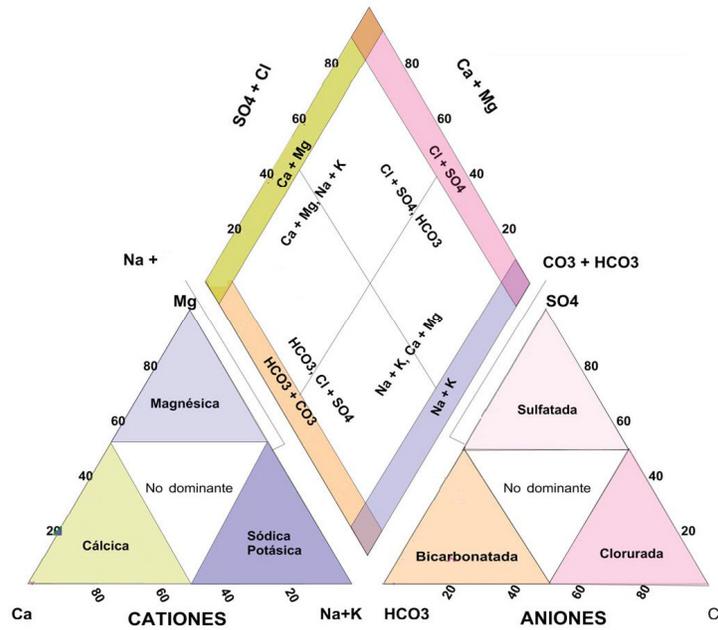


Figura 37. Diagrama Piper de los diferentes tipos de agua y sus iones asociados. Fuente: (Ramirez, 2013). Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos, pág. 77.

El esquema de la Figura 37, representa las proporciones de los diferentes iones y su denominación según los porcentajes de cationes y aniones principales en flujos subterráneos.

## 2.9. Parametros hidraulicos.

Los macizos rocosos presentan intersticios o espacios vacíos (poros) debido a las condiciones geológicas de formación (diagénesis), cobertura y compactación. Además, con los esfuerzos naturales (tectonismo) o artificiales como los generados por la excavación de un túnel se forman grietas e interconexiones que dan lugar a canales subterráneos en los que los fluidos podrán moverse.

Estos fenómenos definen la estructura de los cuerpos rocosos, como se muestra en la Figura 38, que además se encuentra condicionada por los minerales constituyentes de la roca.

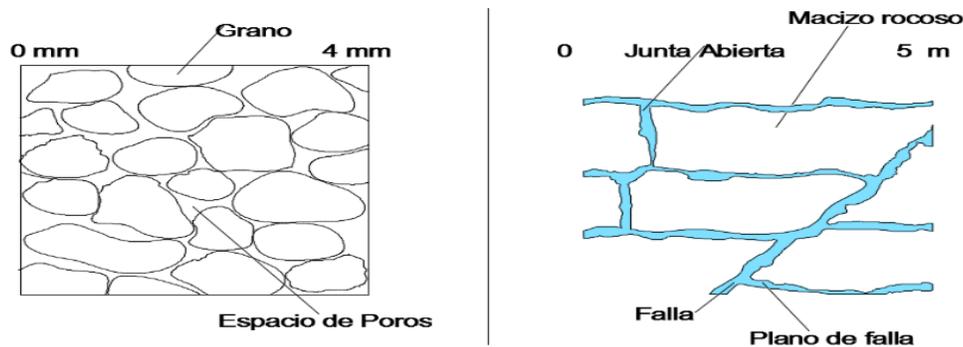


Figura 38. Espacios en la estructura de los cuerpos consolidados (derecha) y no consolidados (izquierda)  
Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hydrogeology. Pág. 40.

Las características hidráulicas en los macizos están condicionadas por el tipo de rocas que los conforman (consolidadas / no consolidadas). Los cuerpos rocosos consolidados son macizos generalmente compactos, compuestos de rocas como: granitos, basaltos, gneis, areniscas, limolitas.

Por otro lado, los cuerpos de roca con un grado de litificación bajo que no han tenido suficiente compactación forman los cuerpos disgregados de arenas, arcillas, gravas y materiales sueltos,

Para determinar y cuantificar las características del flujo del agua en los cuerpos rocosos se emplean términos como:

### 2.9.1. Carga Total - Teorema de Bernoulli.

El análisis de la energía de un fluido durante el paso por un medio, se realiza con base en las propiedades del líquido, posición y longitud de recorrido de la partícula teórica unitaria. Se debe evaluar su energía potencial, cinética, presión y el trabajo o gasto generado por el tránsito del fluido en el medio con la siguiente expresión:

$$H = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Dónde.

$h =$  Carga Total hidráulica.

$z =$  Altura geométrica del nivel, se evalúa desde un plano de referencia, componente potencial.

$u/\gamma_w =$  Altura de presión, donde  $u$  es la presión de agua en un punto conocido y  $\gamma_w$  es la densidad del agua.

$v^2/2g =$  Altura de velocidad, donde  $v$  es la velocidad de flujo de un punto evaluado y  $g$  la aceleración de gravedad, componente cinética.

Las condiciones del fluido en la naturaleza, en la profundidad difieren en temperatura, y movimiento del agua debido a que el medio rocoso presenta diferencias en su composición y grado de fracturas.

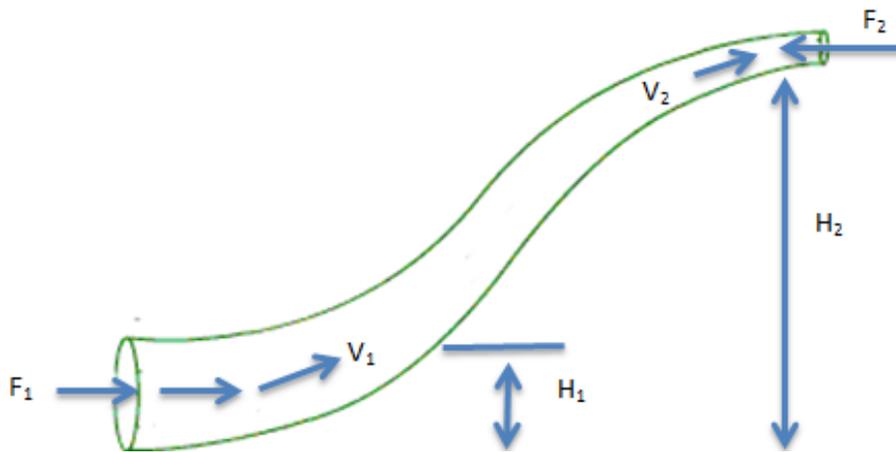


Figura 39. Esquema Teorema de Bernoulli

La energía se mantendrá aunque las restricciones del medio (tamaño de grano, fracturas, temperatura) generarán restricción y pérdidas de carga adicionales que deberán tenerse en cuenta para predecir el trabajo o energía total necesaria frente el paso del agua de un punto A hacia un punto B de menor cabeza de energía.

Como se presenta en la Ecuación 6, se puede analizar las condiciones del medio paralelamente para definir las pérdidas, características del flujo y otras condiciones del sistema hidrogeológico.

$$z_A + \frac{u_A}{\gamma_w} + \frac{v_A^2}{2g} = z_B + \frac{u_B}{\gamma_w} + \frac{v_B^2}{2g} \quad (6)$$

### 2.9.2. Nivel piezómetro.

Es la altura, nivel, cota o carga hidráulica, se mantendrá constante en un almacén de agua libre (presión atmosférica), o un medio permeable saturado si éste conserva sus propiedades. Como se representa en la Figura 40, el agua en superficie a presión atmosférica, se asocia con el nivel piezométrico que se obtiene a partir de la altura de presión y posición.

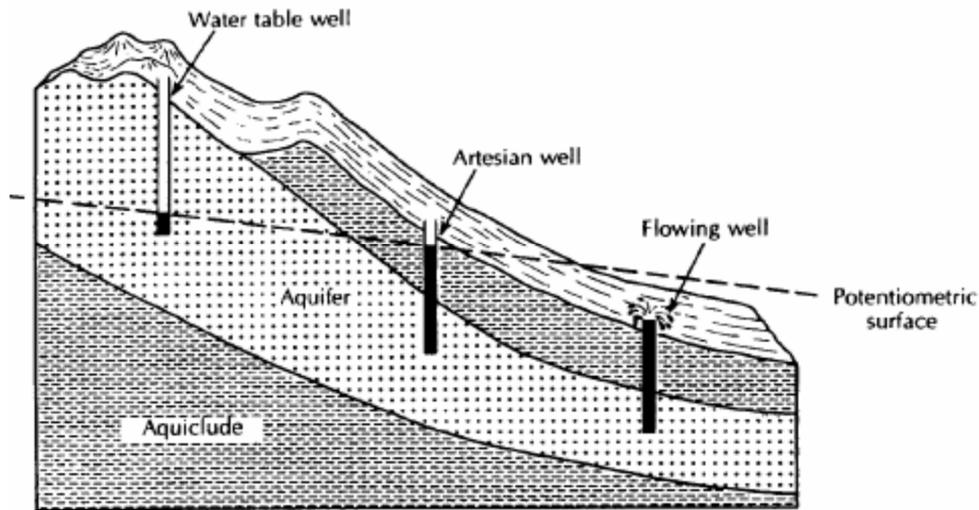


Figura 40. Nivel piezómetro  
Fuente: (Fetter, 2001). Applied Hydrogeology 4th Edición

La superficie piezométrica es la línea de igual nivel de presión hidráulica dentro del sistema hidrogeológico, para condiciones de saturación el agua se mueve de un punto de mayor nivel piezométrico a menor nivel; estas condiciones de energía determinan el flujo de agua en el acuífero, varía en los acuíferos libres y confinados. Su trazado se obtiene de ensayos de campo como pozos de bombeo, donde se podrán determinar las líneas de flujo del agua subterránea.

### 2.9.3. Agua en reposo - condiciones hidrostáticas.

En condiciones de alta continuidad, sellado de las fracturas, en cuerpos continuos y en macizos graníticos ígneos – metamórficos se pueden producir escenarios de un nulo movimiento o estanqueidad. Si la viscosidad del fluido y las características de las fracturas no permiten el paso constante del fluido, se tendrán condiciones hidrostáticas o de agua en reposo. Analíticamente, la expresión general de energía queda reducida en términos de posición o energía potencial; en donde  $H$  es la altura piezométrica.

$$H = z + \frac{u}{\gamma_w} \quad (7)$$

Por otro lado, si el medio es totalmente ocupado por el agua, como el caso de un depósito de agua, piscina, embalse o zonas completamente saturadas; se podría calcular directamente el valor de la presión de agua en cualquier punto. Sin embargo, este escenario en la naturaleza difiere, más en el caso de una evaluación hacia el interior de la tierra donde el medio y características de conductividad del fluido no son constantes.

#### 2.9.4. Permeabilidad - Conductividad Hidráulica.

En hidrogeología, se define la permeabilidad o conductividad hidráulica como la capacidad de transmisión del agua de un sistema acuífero, en función de propiedades del medio como: la textura, estructura, mineralogía y granulometría de la formación geológica.

También, tiene una relación con las características del fluido en cuanto a su densidad, viscosidad y características físico químicas. Las unidades de medida más comunes cm/s o m/día.

Por medio de las siguientes expresiones se puede estimar el valor de permeabilidad como la tasa de flujo en un tiempo determinado,

$$k = K * \frac{\gamma_w}{\mu} \quad (8)$$

O bien

$$k = K * \frac{g}{\eta} \quad (9)$$

- k= Permeabilidad efectiva (LT<sup>-1</sup>).
- k= Permeabilidad intrínseca.
- $\gamma_w$ = Peso específico del agua (ML<sup>-2</sup>T<sup>-2</sup>).
- $\mu$ = Viscosidad dinámica del fluido (ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>).
- $\eta$ = Viscosidad cinemática (L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>).
- g= Aceleración de la gravedad (LT<sup>-2</sup>).

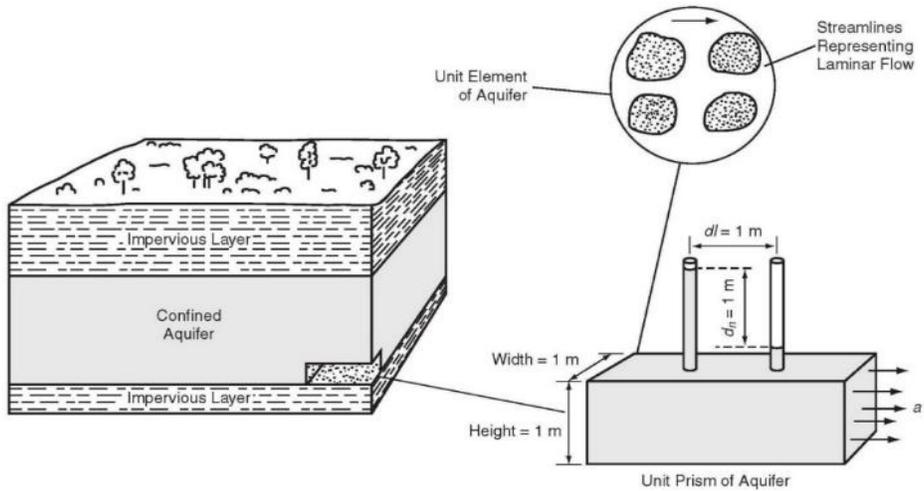


Figura 41. Definición de conductividad Hidráulica.  
 Fuente: (AWWA, 2014). Manual of Wáter Supply Practices. Groundwater. Pág. 58.

En la Figura 42, se presentan los valores de permeabilidad para diferentes paquetes litológicos, los valores más altos principalmente están en cuerpos sedimentarios, rocas carbonatadas y flujos de lava. Mientras que los materiales más impermeables se encuentran en rocas de tipo metamórfico e ígneo con baja fracturación.

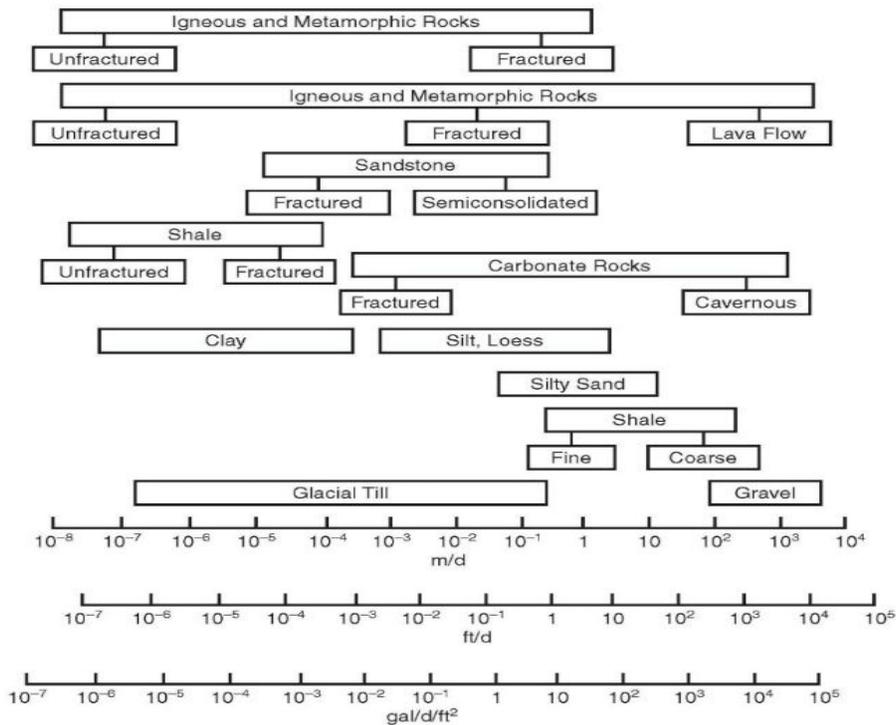


Figura 42. Conductividad hidráulica de diferentes paquetes rocosos.  
 Fuente: (AWWA, 2014).Manual of Wáter Supply Practices. Groundwater. Pág. 59.

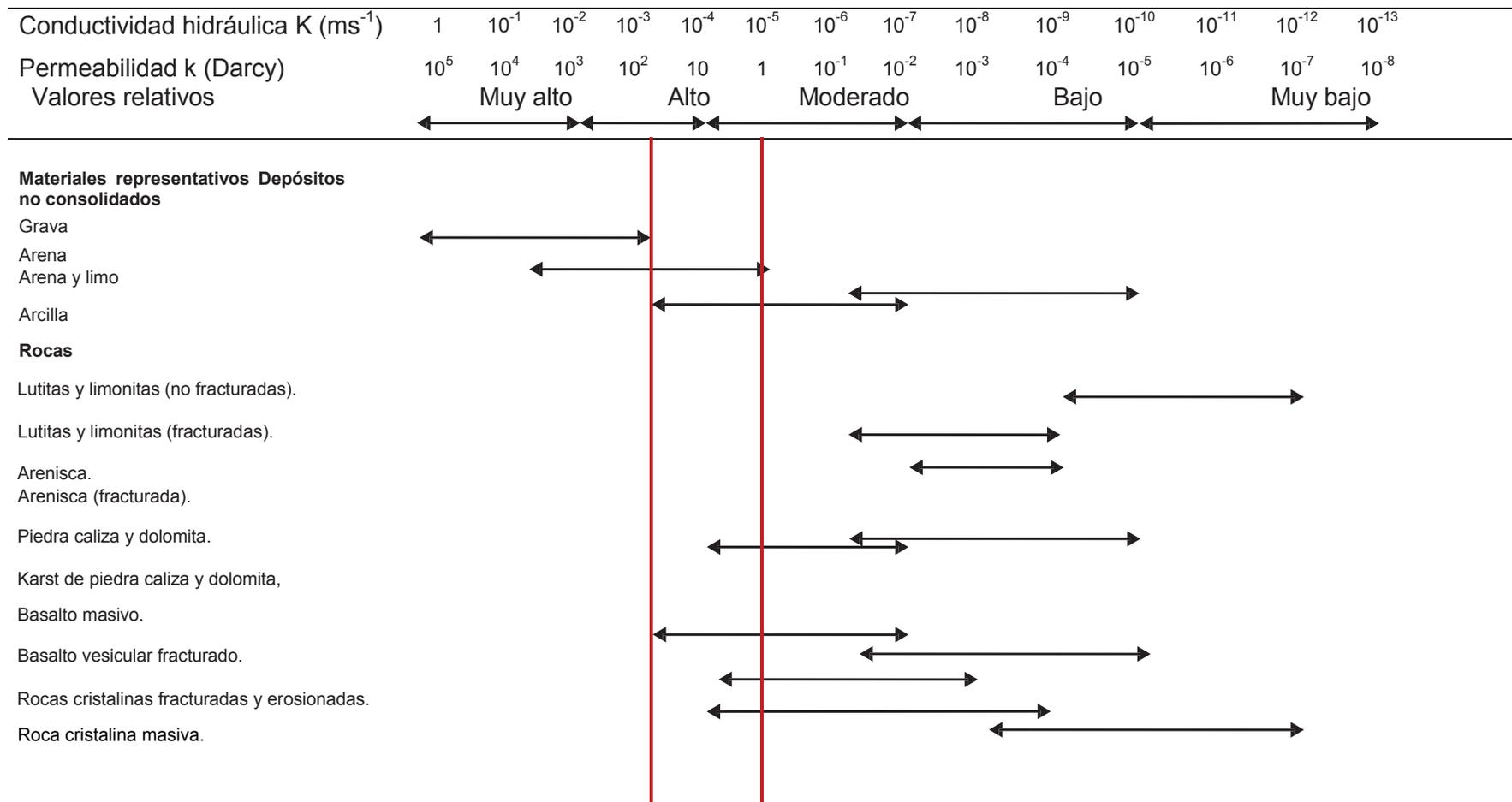


Figura 43. Valores de conductividad hidráulica para varios paquetes de Roca. Fuente. (Singhal & Gupta, 2010, pág. 149). Applied Hydrogeology of Fractured Rocks

El aumento de permeabilidad se debe a la cantidad y tamaño de las aberturas de la fractura, en la medida que el agua se mueve a través de las zonas libres los minerales pueden disolverse en la roca y los conductos naturales se pueden ampliar. Rocas químicamente activas (Caliza, Dolomita, Gipsita, Halita) son más susceptibles a procesos de disolución; sin embargo, las rocas ígneas también pueden ser afectadas.

#### 2.9.5. Porosidad.

La porosidad de los materiales naturales se define como el volumen de espacios vacíos con respecto al volumen total. Cuando los materiales naturales presentan espacios, su estructura se centra en el esqueleto sólido. Además, en zonas cercanas a la superficie ocurren con facilidad cambios físico - químicos, debido a condiciones de alteración y fracturamiento de la roca, que propician nuevas zonas vacías para el movimiento del agua.

Analíticamente, se calcula como:

$$n = \frac{\text{Volumen de poros (vacíos)}}{\text{Volumen total de la roca}} \quad (10)$$

En las rocas sedimentarias, macizos descompuestos o no consolidados, la porosidad depende de la distribución, tamaño del grano y la organización de las partículas dentro del grupo geológico, este comportamiento también es influenciado por los procesos de litificación, génesis, ambiente de formación (procesos de erosión y transporte) y la carga litoestática (cobertura). La Figura 44, representa la variación del empaquetamiento intergranular, cúbico (1) y romboédrico (2), distribuciones uniformes y poca heterogeneidad (3) mayores espacios vacíos y con estructuras heterogéneas (4). Los vacíos pueden rellenarse con materiales más finos que actúan como cementantes.

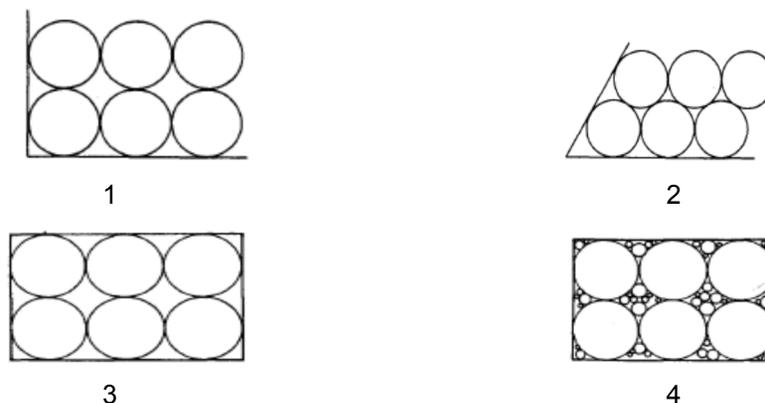


Figura 44. Empaquetamiento de granos y distribución granulométrica.  
Fuente: (Fetter, 2001), Applied Hydrogeology 4th Edition

Los cuerpos rocosos formados por materiales sedimentarios pueden presentar una gran heterogeneidad en sus granos y espacios. Además, su fábrica, orientación y esfericidad de las partículas influyen en los procesos de flujo de agua.

En los materiales ígneos metamórficos, los procesos de presión y temperatura son agentes que influirán la ocurrencia de espacios vacíos, siendo habitual encontrar espacios en zonas de juntas, cambios de material o zonas de contactos de rocas con otros paquetes geológicos.

La porosidad varía en cuerpos volcánicos, como en lavas o depositos piroclasticos, donde se presentan un enfriamiento rápido y múltiples zonas de fracturas y espacios vacios, similares a las rocas sedimentarias.

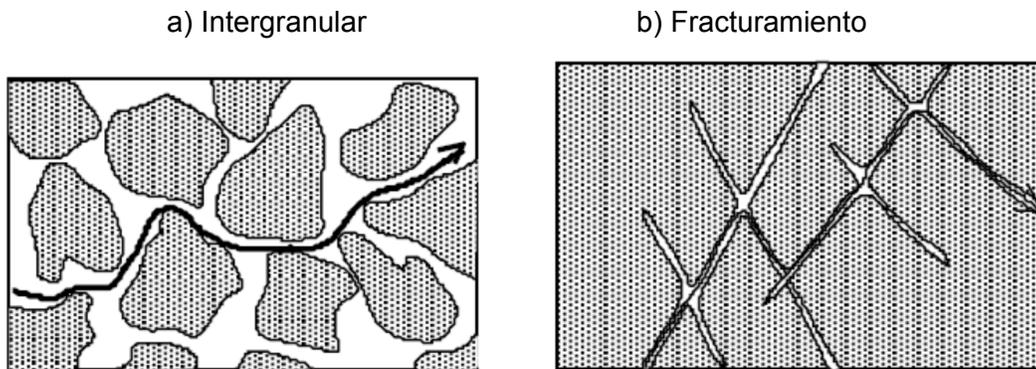


Figura 45. Tipos de porosidad para los paquetes de roca.  
Fuente: (Espinoza, 2004). Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento

Los cuerpos ígneos – metamórficos que presentan un alto grado de solidificación y continuidad, cuentan con zonas puntuales donde puede penetrar el fluido, principalmente hacia la zona de juntas y contactos litológicos. En su mayoría son cuerpos que actúan como barreras impermeables de otros paquetes geológicos que sí tienen las características para almacenar y transmitir el fluido.

#### Porosidad Primaria y secundaria.

Los aspectos intrínsecos de la estructura del material y mineralogía, además de los eventos y ambientes de diagénesis establecerán las propiedades primarias (porosidad, permeabilidad, etc.) u originales de los materiales geológicos.

También, los procesos geodinámicos de la tierra, como los fenómenos tectónicos, generan una respuesta en los macizos rocosos y nuevas características de compactación, disolución y fracturación de los materiales y propiedades secundarias de los materiales.

Su evaluación es muy importante desde el punto de vista Geotécnico, ya que el entendimiento de este comportamiento es una pieza clave para evaluar y determinar las características de los sistemas Hidrogeológicos.

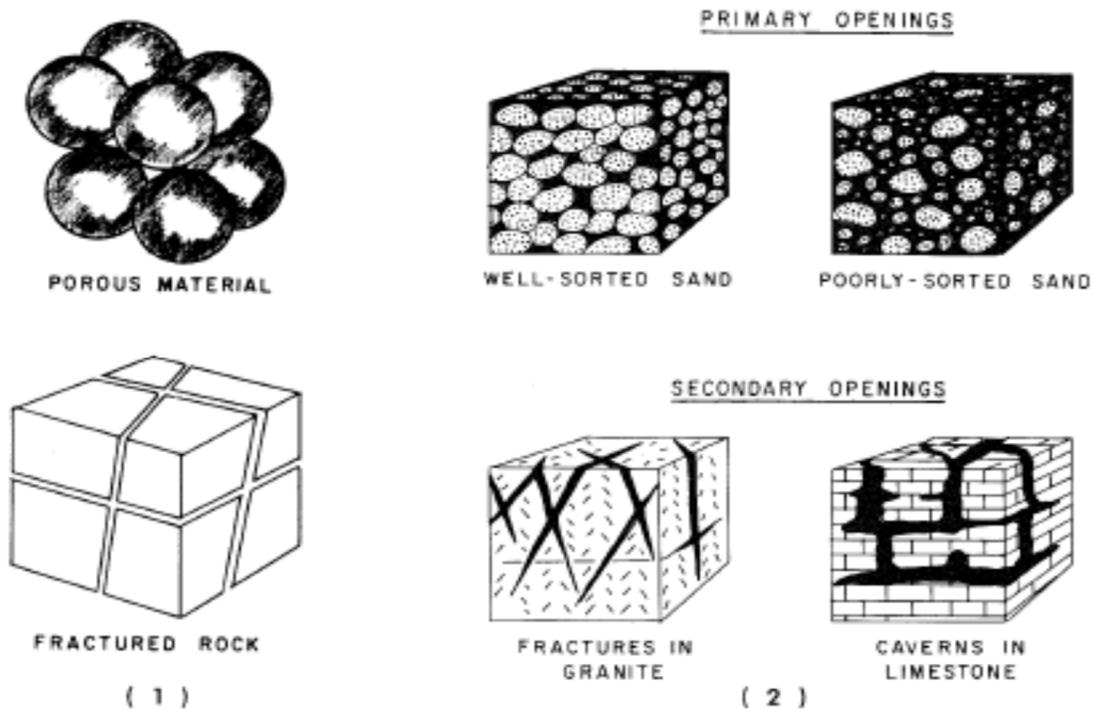


Figura 46. Características primarias y secundarias de las rocas  
 Fuente: (USGS, Basic Ground Water Hydrology, 1987)

### Porosidad Efectiva.

La porosidad efectiva está definida como la relación entre el volumen de poros interconectados y el volumen total de la roca, así:

$$n_e = \frac{\text{Volumen de poros interconectados}}{\text{Volumen total de la roca}} \quad (11)$$

### 2.9.6. Gradiente Hidráulico.

Esta variable está determinada por la diferencia de nivel de agua en una longitud dada, en la cual una partícula podrá fluir desde un punto A hacia punto B de menor altura, debido a la diferencia posición  $\Delta h = h_A - h_B$  del fluido.

Análíticamente se encuentra expresado como:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (12)$$

### 2.9.7. Transmisividad o transmisibilidad.

Concepto muy importante en hidrogeología, corresponde a la cantidad de agua por unidad de ancho (potencia del estrato o formación acuífera), puede ser transmitida horizontalmente a través de un espesor saturado de un sistema acuífero con un gradiente hidráulico igual a 1 (unitario).

Como expresión numérica, es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero:

$$T = b \cdot K \quad (13)$$

Donde  $T$  es la transmisividad ( $L^2/T$ ),  $b$  es el espesor saturado del acuífero ( $L$ ) y  $K$  es la conductividad hidráulica ( $L/T$ ).

Para un acuífero intercalado por capas de roca, la transmisividad total es la suma de la transmisividad de cada estrato.

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (14)$$

Donde;

$n =$  Número total de estratos

$T_i =$  Transmisividad del estrato  $i$ .

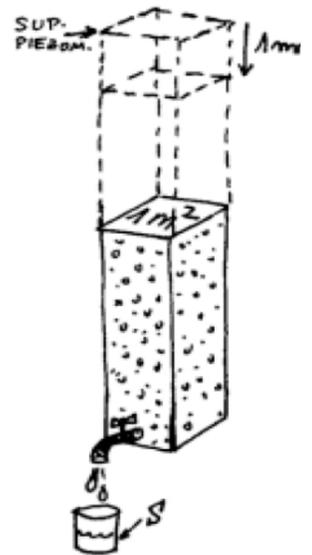
Las unidades para evaluar esta propiedad serán  $L^2/T$ .

### 2.9.8. Coeficiente de almacenamiento.

Con esta variable se puede estimar la cantidad de agua que un sistema acuífero libera desde su almacenamiento, como se muestra en la Figura 40, donde la altura del nivel del agua en la muestra representa el volumen que podrá contener el sistema y libera de acuerdo a las características de conductividad del medio; es una cantidad adimensional.

Si se presenta un escenario de reducción de la carga hidráulica, el esqueleto mineral tendrá toda la carga geostática, se inician procesos de contracción, cerrando los vacíos y liberando el agua almacenada. Este proceso se conoce como almacenamiento específico ( $S_s$ ), está definido como la cantidad de agua

Figura 47. Coeficiente de almacenamiento. (Espinoza, 2004)



por unidad de volumen, la cual será almacenada o liberada debido a la compresibilidad del cuerpo litológico.

El almacenamiento específico está dado por la siguiente expresión:

$$S_s = \rho_w * g * (\alpha + n * \beta) \quad (15)$$

Donde,

- $\rho_w$ = Densidad del agua (M/L<sup>3</sup>).
- $g$ = Aceleración de gravedad (L/T<sup>2</sup>).
- $\alpha$ = Compresibilidad del esqueleto del acuífero (1/(M/LT<sup>2</sup>)).
- $n$ = Porosidad (L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>).
- $\beta$ = Compresibilidad del agua (1/(M/LT<sup>2</sup>)).

En un acuífero confinado, la carga hidráulica puede disminuir pero el nivel piezométrico puede permanecer en el sistema, en este escenario el coeficiente de almacenamiento (S) es el producto del almacenamiento específico ( $S_s$ ) y del espesor del acuífero (b):

$$S = S_s * b \quad (16)$$

En caso de sistemas no confinados, los cambios en el nivel freático oscilan con la cantidad de agua almacenada, a medida que el nivel disminuye el agua de poros se drena hacia el sistema acuífero, este almacenamiento o liberación de agua se debe a la capacidad específica de la unidad ( $S_y$ ).

Para un acuífero no confinado el coeficiente de almacenamiento, S, se calcula como:

$$S = S_y + h * S_s \quad (17)$$

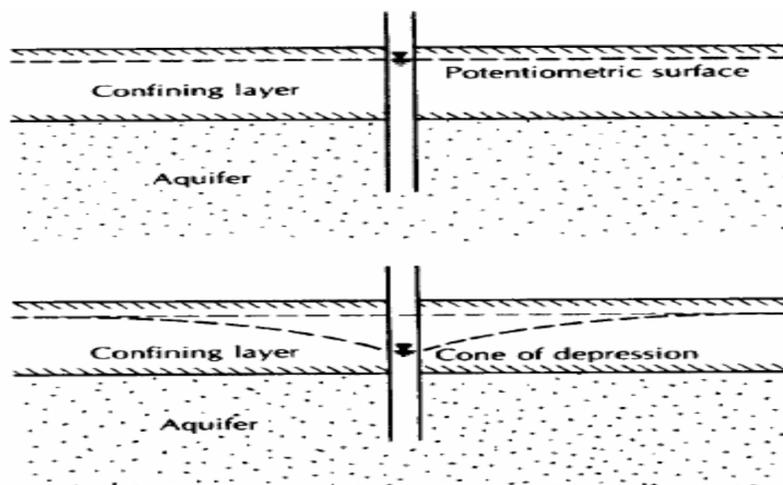


Figura 48. Liberación de agua en un sistema acuífero confinado.  
Fuente: (Espinoza, 2004). Hidráulica de aguas subterráneas.

### 2.9.9. Homogeneidad e isotropía.

En los estudios de hidrogeología se deberá evaluar la homogeneidad e isotropía del macizo, es decir; la continuidad de sus propiedades en el espacio o similares características del material en todos los puntos dentro de la unidad geológica. Evalúan parámetros como la porosidad, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento y otras propiedades inherentes al material.

En paquetes geológicos heterogéneos se presenta un cambio de las propiedades, algunos ejemplos típicos se presentan a las Figura 49 y Figura 50.

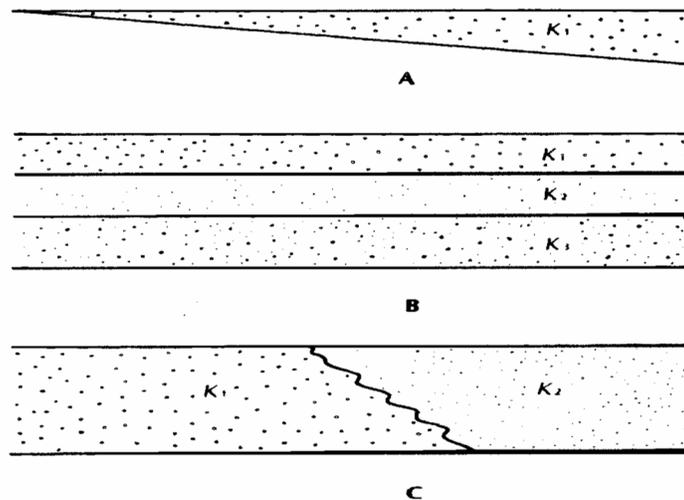


Figura 49. Formaciones no homogéneas.  
Fuente: (Fetter, 2001). Applied Hydrogeology 4th Edition, Pág. 105.

La Figura 48, muestra casos comunes de formaciones no homogéneas, donde pueden presentarse cambios de espesor debido a diferenciación en los periodos de depositación o discordancias generadas por un cambio litológico (A). También es posible encontrar mineralogías diferentes debido a cambios en la energía de depositación que hacen que los diámetros de las partículas del paquete varíen y con esto los valores de porosidad (B).

Así mismo, las propiedades podrían cambiar debido a cambios longitudinales en la mineralogía y densidad de los cuerpos, erosión y variación en la carga litoestática de sistemas estratificados (C).

Para un medio clástico donde los gránulos de material presentan la misma geometría y agrupación dentro del paquete, los vacíos serán los mismos en cualquier dirección y tendrán valores hidráulicos similares, es decir, contarán con propiedades isotrópicas. Sin embargo, si se llevaron a cabo eventos de diferenciación en la energía de depositación, esfuerzos geodinámicos o erosión, se hace posible la variación de la geometría de los vacíos y granulometría del material.

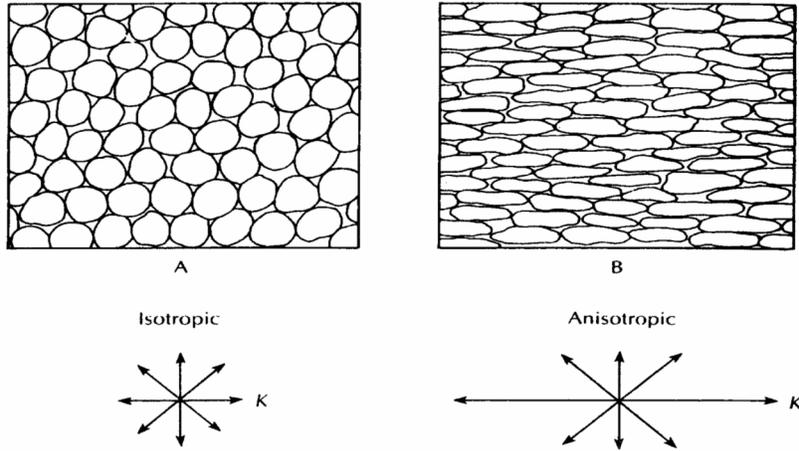


Figura 50. Sistemas hidrogeológicos homogéneos y anisotrópicos. Fuente: (Fetter, 2001). Applied Hydrogeology 4th Edition, Pág. 105.

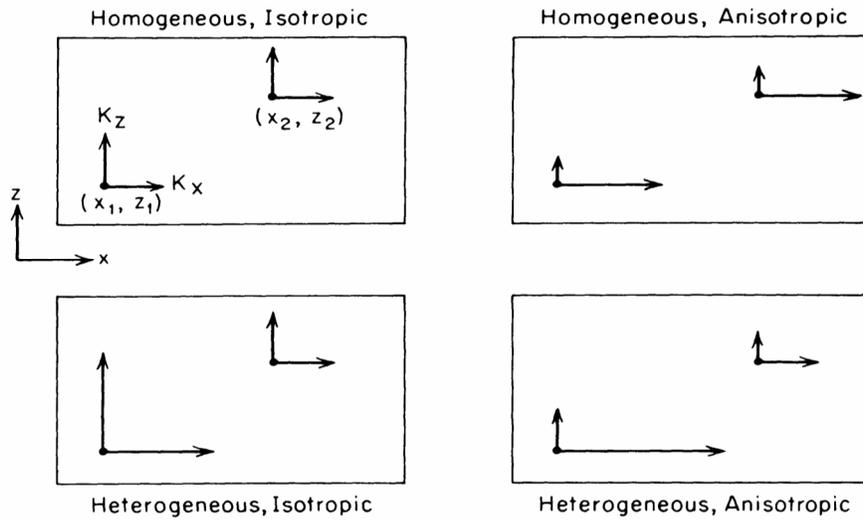


Figura 51. Configuraciones de los sistemas acuíferos. Fuente: (Espinoza, 2004). Hidráulica de aguas subterráneas.

## 2.10. Expresiones teóricas en el análisis del flujo del agua.

### 2.10.1. Ley de Darcy.

Enunciada por el científico francés Henry Darcy en 1856, establece que el caudal de agua que podría atravesar un medio está condicionado por el área de paso del medio, es normal al flujo y depende del gradiente de los niveles piezométricos en la entrada y salida del sistema. La velocidad corresponde a una velocidad de la partícula llamada velocidad de flujo o velocidad de Darcy, a través del medio acuífero. Para esta idealización la permeabilidad del medio se asume constante.

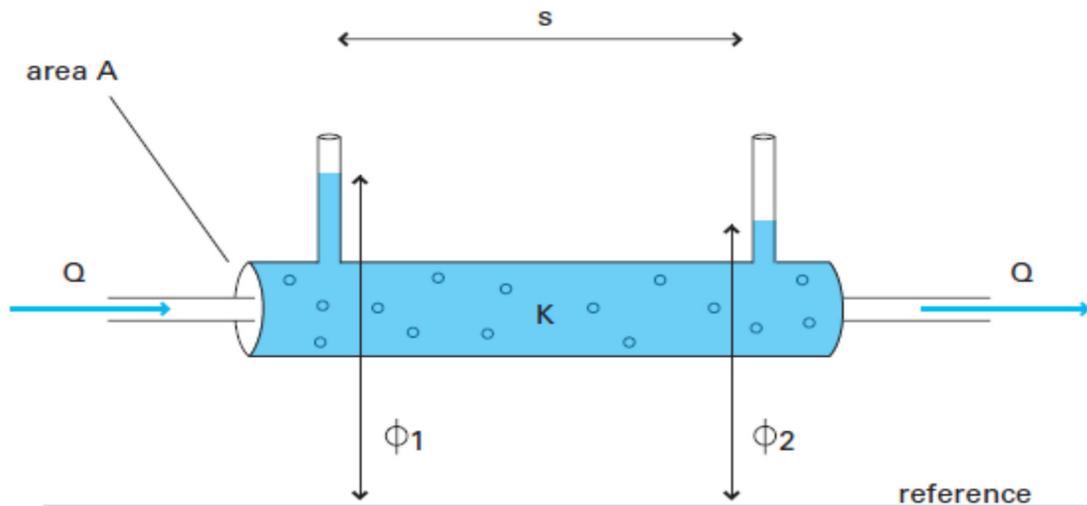


Figura 52. Experimento de Darcy  
Fuente (NONNER, 2003). Introduction to Hydrogeology, pag 69

$$Q = -A * K * \frac{\phi_2 - \phi_1}{s} \Rightarrow v = -k \frac{dh}{dx} \quad (18)$$

Donde,

Q= Flujo de agua a través del medio rocoso o suelo ( $L^3T^{-1}$ ).

K= Permeabilidad de Darcy ( $LT^{-1}$ ).

s = Distancia entre las columnas de agua evaluadas (L).

A= Sección que atraviesa el fluido ( $L^2$ ).

$\Phi_1, \Phi_2$  = Niveles de agua en las columnas de referencia (L).

Debido al movimiento del agua en un punto de mayor a menor nivel, se define la dirección del flujo y características del gradiente.

Esta ley es válida en el caso de un flujo laminar (A), no en flujo turbulento (B), como las situaciones que se presentan en la Figura 53.

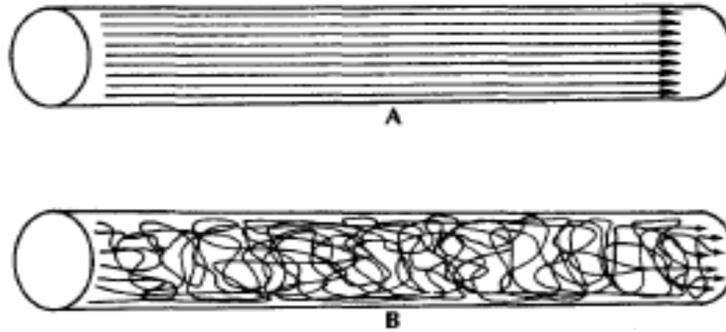


Figura 53. Flujos de agua en un medio  
Fuente: (Fetter, 2001), Applied Hydrogeology 4th Edition.

La expresión de Darcy se presenta de una forma diferente para el cálculo de aguas subterráneas en sistemas acuíferos reales. Los niveles del fluido en el tubo se representan por la cabeza hidráulica, la velocidad de flujo en la sección transversal de la columna de roca o suelo y se evalúa como una región unitaria, por medio de la siguiente expresión:

$$v = -K * \frac{dh}{dx} \quad (19)$$

Donde,

v = Flujo de agua a través de un área unitaria 1m<sup>2</sup>, o específica descarga (LT<sup>-1</sup>).

k = Coeficiente de permeabilidad del macizo rocoso (LT<sup>-1</sup>).

x = Distancia entre las columnas de agua evaluadas (L).

h = Cabeza hidráulica (L).

La cantidad de agua que atraviesa el medio rocoso perpendicularmente a la sección, es linealmente proporcional al gradiente hidráulico; en un mayor gradiente circulará mayor cantidad de agua.

Debido a las condiciones del macizo se puede presentar una variación de los caudales en las diferentes direcciones cartesianas. Las expresiones que representan el flujo se pueden resumir como:

$$v_x = -K_x * \frac{dh}{dx} \quad (20)$$

$$v_y = -K_y * \frac{dh}{dy} \quad (21)$$

$$v_z = -K_z * \frac{dh}{dz} \quad (22)$$

Donde,

$v_x, v_y, v_z =$  Flujo de agua a través de un área unitaria  $1m^2$ , o específica descarga ( $LT^{-1}$ ), en la dirección  $x, y, z$

$K_x, K_y, K_z =$  Coeficiente de permeabilidad del macizo rocoso ( $LT^{-1}$ ), en la dirección  $x, y, z$ .

Para un medio isotrópico y homogéneo podría reducirse la expresión a:

$$v = -k * \overline{grad} h \quad (23)$$

Siendo,

$$v = (v_x, v_y, v_z) \quad (24)$$

$$grad h = \left( \frac{dh}{dx}, \frac{dh}{dy}, \frac{dh}{dz} \right) \quad (25)$$

En un medio anisótropo la permeabilidad es un tensor de segundo orden, donde se establece la orientación de las componentes vectoriales y escalares así:

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Las componentes vectoriales de flujo serian;

$$v_x = -k_{xx} \frac{dh}{dx} - k_{xy} \frac{dh}{dy} - k_{xz} \frac{dh}{dz}$$

$$v_y = -k_{yx} \frac{dh}{dx} - k_{yy} \frac{dh}{dy} - k_{yz} \frac{dh}{dz}$$

$$v_z = -k_{zx} \frac{dh}{dx} - k_{zy} \frac{dh}{dy} - k_{zz} \frac{dh}{dz}$$

Coicidiendo los ejes principales del medio y las componentes escalares del tensor, la matriz quedaría como:

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Finalmente, las componentes del flujo quedarían expresadas como:

$$v_x = -k_{xx} \frac{dh}{dx}, v_y = -k_{yy} \frac{dh}{dy}, v_z = -k_{zz} \frac{dh}{dz} \quad (28)$$

La clásica expresión matemática de Darcy para la predicción del flujo del agua subterránea aplica para rocas poco consolidadas y suelos. Sin embargo, para los paquetes litológicos duros donde los poros no controlan el flujo, los parámetros a evaluar estarán asociados a las discontinuidades, fracturas, los contactos de planos geológicos, el factor de escala y los valores de permeabilidad, para la unidad transversal del bloque. El flujo de agua está definido como la sumatoria de los caudales a través de los contactos del cuerpo litológico duro agrupados en un 1 m<sup>2</sup>.

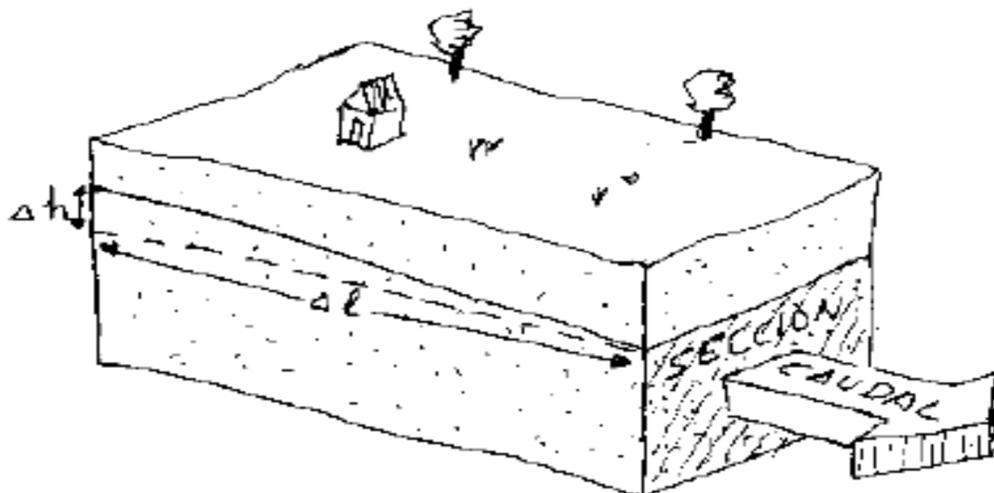


Figura 54. Representación del paso del agua en un modelo hidrológico  
Fuente: (Sanchez, 2014) Conceptos fundamentales hidrogeología.

### 2.10.2. Número de Reynolds.

En la naturaleza es difícil que se presente un flujo laminar – lineal como infiltración en las rocas, mientras que un flujo sinuoso (turbulento) y localizado es más común. Para la determinación de este tipo de movimiento es común utilizar el denominado número de Reynolds, definido como ( $R_e$ ), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R_e = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\mu} \quad (29)$$

Donde:

- v = Tasa de flujo por unidad de área (1 m<sup>2</sup>), (m /día).
- d = Tamaño medio de las partículas, se considera el  $d_{50}$  en medios granulares y  $2e$  en medios fisurados, siendo  $e$  el ancho medio de las fisuras. (m).
- $\rho$ = Densidad del agua subterránea. (Kg/m<sup>3</sup>).
- $\mu$  = Viscosidad dinámica. (Kg / (m\*día)).

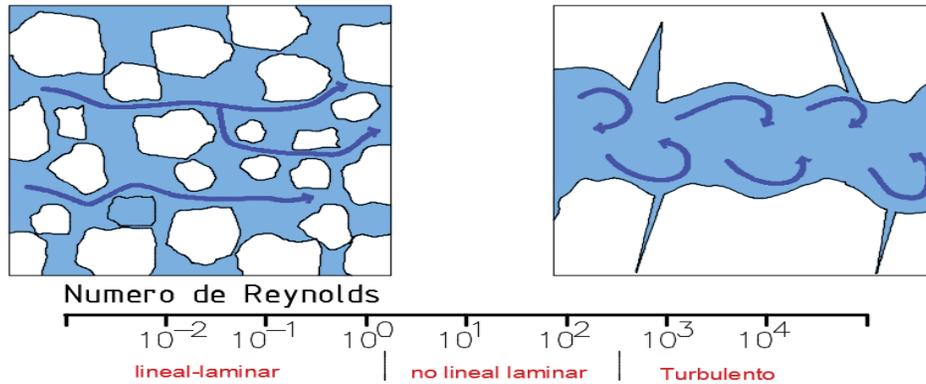


Figura 55. Características de flujo de agua de acuerdo al número de Reynolds.  
Fuente (NONNER, 2003). Introduction to Hydrogeology, pág. 85.

### 2.10.3. Ecuación de continuidad para estado estacionario.

La ley de Darcy representa una aproximación del flujo de agua en el subsuelo, sin embargo, deberá combinarse con otras expresiones para resolver todas las incógnitas en un medio real; para esto, se apoya en la expresión general de continuidad y conservación de la energía, la cual se presenta en la Figura 56, donde se muestran los flujos de entrada y salida del agua en cada una de las caras del volumen de control.

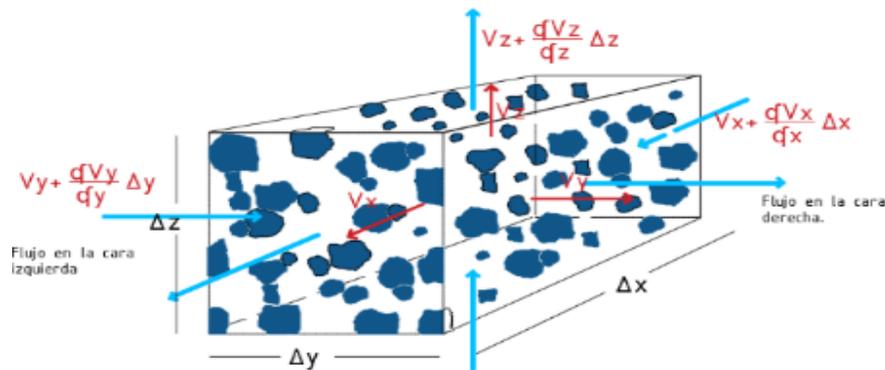


Figura 56. Volumen de control y flujo de agua en medio poroso.  
Fuente: Adaptado. (Vallejo, Ferrer, M., & Ortuño, L., 2002). Ingeniería Geológica, pág. 277.

El objeto de control se encuentra definido por unas dimensiones  $\Delta y$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta z$  que corresponden a la longitud de cada cara en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , donde se filtrará un caudal  $Q$ , definido como caudal unitario (caudal por unidad de área) por cada una de las direcciones evaluadas.

La hipótesis considera que se presenta un flujo unitario en cada una de las caras del objeto de control, el cual pasa el medio poroso y sale por la cara opuesta, dirección determinada por cada eje y a una tasa de velocidad que dependerá el medio, situación que se representa en la Figura 56.

El caudal de agua que atraviesa el medio poroso se podrá predecir por medio de series de Taylor, despreciando los infinitésimos de orden superior y sumando los componentes de caudal unitario (flujo) para cada orientación; como se representa en las siguientes expresiones:

$$\text{Cara}_{yz} \left[ V_x + \frac{dV_x}{dx} \Delta x - V_x \right] \Delta y \Delta z \Rightarrow \frac{dV_x}{dx} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (30)$$

$$\text{Cara}_{xz} \left[ V_y + \frac{dV_y}{dy} \Delta y - V_y \right] \Delta x \Delta z \Rightarrow \frac{dV_y}{dy} \Delta y \Delta x \Delta z \quad (31)$$

$$\text{Cara}_{xy} \left[ V_z + \frac{dV_z}{dz} \Delta z - V_z \right] \Delta x \Delta y \Rightarrow \frac{dV_z}{dz} \Delta z \Delta x \Delta y \quad (32)$$

Con base en la ley de conservación de la energía, el fluido que entra en el volumen de control es el mismo que sale; si conserva el nivel piezométrico, la suma de los caudales entrantes será la misma que los salientes.

$$\frac{dV_x}{dx} \Delta x \Delta y \Delta z + \frac{dV_y}{dy} \Delta y \Delta x \Delta z + \frac{dV_z}{dz} \Delta z \Delta x \Delta y = 0$$

Esto conlleva a que las expresiones anteriores tienen que ser iguales a cero. La ecuación general de continuidad en flujo estacionario deberá ser:

$$\frac{dV_x}{dx} + \frac{dV_y}{dy} + \frac{dV_z}{dz} = 0 \quad (33)$$

#### 2.10.4. Ecuación de Laplace.

Combinando las expresiones de continuidad flujo estacionario y la ley de Darcy, se establece otra expresión, donde se supone que el macizo es homogéneo:

$$V_x = -K_{xx} \frac{dh}{dx}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{dh}{dy}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{dh}{dz} \quad (34)$$

Sustituyendo los términos en la ecuación de continuidad general, tenemos:

$$\frac{d}{dx} \left( -K_{xx} \frac{dh}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( -K_{yy} \frac{dh}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left( -K_{zz} \frac{dh}{dz} \right) = 0 \quad (35)$$

Si la roca presenta características isotrópicas, la ecuación podrá reducirse a la expresión de Laplace para flujo constante, es decir:

$$K_{xx} = K_{yy} = K_{zz} = K \quad (36)$$

$$\frac{d^2 h}{dx^2} + \frac{d^2 h}{dy^2} + \frac{d^2 h}{dz^2} = 0 \quad (37)$$

Expresión que define la ecuación de Laplace para régimen permanente con ausencia de nuevas entradas y salidas, requiere de metodologías analíticas y en el caso de problemas complejos el uso de métodos numéricos.

#### 2.10.5. Ecuación de Poisson.

Esta expresión tiene en cuenta nuevas fuentes o entradas de agua en los sistemas acuíferos, como bombeos, nacimientos y sumideros, que son comunes en la naturaleza. Se representan con la recarga  $R(x, y)$  por unidad de área y de tiempo, definida como:

$$\frac{dV_x}{dx} \Delta x (b \Delta y) = \frac{dV_y}{dy} \Delta y (b \Delta x) = R(x, y) \Delta x \Delta y \quad (38)$$

En condiciones isométricas se tiene:

$$K_{xx} = K_{yy} = K_{zz} = K \quad (39)$$

Además:

$$T = K * b \quad (40)$$

Combinando las expresiones se obtiene la expresión de Poisson para régimen permanente con recargas de manantiales, fuentes superficiales y sumideros, en condiciones homogéneas del macizo.

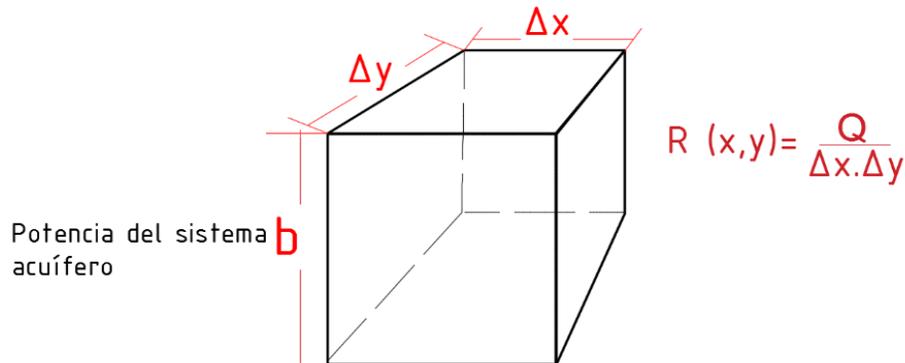


Figura 57. Bloque esquemático en la deducción de Poisson.  
Fuente: (Vallejo, Ferrer, M., & Ortuño, L., 2002). Ingeniería Geológica, pág. 278.

$$\frac{d^2 h}{dx^2} + \frac{d^2 h}{dy^2} = - \frac{R(x, y)}{T} \quad (41)$$

Se presentan algunas consideraciones para la validez de la expresión:

- Si  $R(x, y) = 0$ , coincide con la expresión formulada.

- Si  $R(x, y) =$  positiva, se presenta recarga del sistema acuífero.
- Si  $R(x, y) =$  negativa, se presenta descarga o bombeo del sistema.

### 2.10.6. Ecuación de flujo para régimen transitorio.

Cuando los niveles varían y se presentan cambios del almacenamiento de agua en el sistema acuífero se presentará un régimen transitorio, es decir:

Volumen Salida = Volumen entrante – volumen que emigra del sistema, (para un intervalo de tiempo).

En la Figura 58, se representan los cambios en el nivel  $\Delta h$  para un intervalo de tiempo dado, lo cual se podrá expresar como  $s. \Delta h. \Delta x. \Delta y / \Delta t$ .

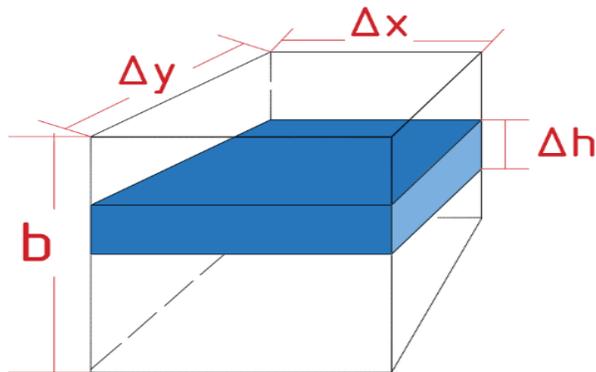


Figura 58. Bloque esquemático en la posición de un flujo transitorio.  
Fuente: Adaptado. (Vallejo, Ferrer, M., & Ortuño, L., 2002). Ingeniería Geológica, pág. 279.

Reemplazando esta expresión en la ecuación de continuidad para descargas y recargas del sistema acuífero se tendrá:

$$\frac{dV_x}{dx} \Delta x (b \Delta y) = \frac{dV_y}{dy} \Delta y (b \Delta x) = R(x, y, t) \Delta x \Delta y - S \frac{dh}{dt} (\Delta x \Delta y)$$

Combinando las expresiones de continuidad, flujo estacionario y la ley de Darcy, se tiene:

$$V_x = -K_{xx} \frac{dh}{dx}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{dh}{dy}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{dh}{dz}$$

Y en condiciones isotrópicas:

$$K_{xx} = K_{yy} = K_{zz} = K$$

Asumiendo condiciones isométricas  $\Delta x = \Delta y$ , en la ecuación de transmisividad para un sistema hidrogeológico  $T = kb$ , se puede deducir que:

$$\frac{d^2h}{dx^2} + \frac{d^2h}{dy^2} = \frac{S}{T} \frac{dh}{dt} - \frac{R(x, y, t)}{T} \quad (42)$$

La cual representa la ecuación general de flujo para régimen transitorio, en condiciones de recarga y descarga del sistema, permeabilidad homogénea e isotrópica, donde se establecerán las condiciones de frontera. Esta ecuación es de uso extendido en la ingeniería geotécnica.

Donde,

$\frac{d^2h}{dx^2} + \frac{d^2h}{dy^2}$  Suma caudales entrantes por las caras del sistema acuífero.

$\frac{S}{T} \frac{dh}{dt}$  Volumen que sale del sistema en la unidad del tiempo evaluada.

Si se iguala la expresión a 0, es decir, no se presenta volumen que emigra del sistema; se obtiene la ecuación de Poisson en régimen permanente con fuentes y sumideros.

$-\frac{R(x,y,t)}{T}$  Entradas y salidas de los sistemas acuíferos en la unidad del tiempo.

Anulando la expresión y si no presenta volumen que sale del sistema la expresión se convierte en la ecuación de Laplace.

### 2.10.7. Ley de Fick.

En ocasiones el movimiento del agua subterránea cuenta con un patrón discernible, siguiendo la porosidad efectiva en el cuerpo litológico; también puede presentar diferencias en la velocidad del flujo, con un patrón de tortuosidad, resistencia y turbulencia, en este caso se ha establecido un modelo para evaluar las características de flujo.

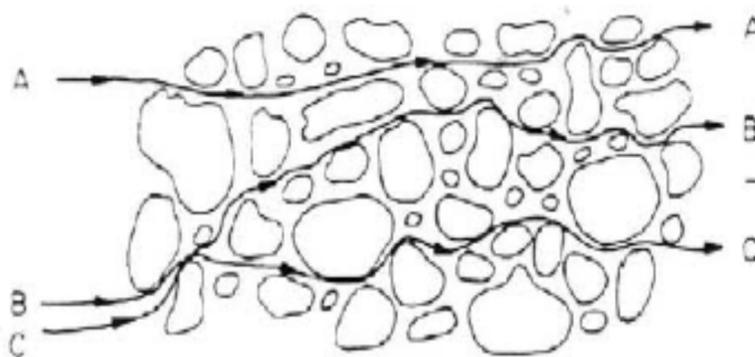


Figura 59. Transporte por dispersión, el agua fluye por un medio poroso como el suelo.  
Fuente: (Oyarzún, 2007). Transporte de contaminantes en aguas subterráneas.

Se utiliza para describir las características del flujo con una difusión turbulenta, se expresa como  $J = -D (dC / dx)$ , donde  $J$ : densidad de flujo [M/L<sup>2</sup>T],  $D$ : coeficiente de transporte de masa de Fick [L<sup>2</sup>/T],  $C$ : concentración del elemento o compuesto químico [M/L<sup>3</sup>] y  $x$ : distancia sobre la cual se consideran cambios en la concentración [L].

La primera ley de Fick puede ser también expresada en 3 dimensiones usando notación vectorial en la forma  $J = -DV$ , donde  $V$  es el operador gradiente y  $D$  es similar en todas las direcciones.

Este modelo es utilizado con trazadores químicos, en los que la tortuosidad del medio poroso provoca una mezcla y transporte del químico desde zonas de alta concentración a puntos de menor proporción del químico en el fluido.

Este mecanismo de conducción del químico en el fluido se denomina dispersión y puede ser análogo a los que se generan en escenarios totalmente turbulentos.

#### 2.11. Aspectos estructurales que controlan los sistemas acuíferos en rocas duras.

Los sistemas estructurales de los macizos rocosos representan los eventos de depositación, los procesos de diagénesis de los materiales en la historia geológica, en función de la carga litoestática y esfuerzos in situ.

Los paquetes geológicos más profundos generalmente presentan condiciones de litificación mayor, mientras que los materiales más cercanos a la superficie tenderán a ser sueltos, blandos, meteorizados y poco consolidados.

Cuando los macizos rocosos en su historia geológica han soportado procesos de esfuerzos y presiones laterales, tienden a estrecharse y ondularse, conformando estructuras con diferentes geometrías y características, como se representa en la Figura 60. Los sistemas de discontinuidades son los canales del agua subterránea, sus propiedades, de relleno, orientación, densidad y persistencia repercutirán de manera directa en el grado de irrupción del agua en una estructura subterránea.

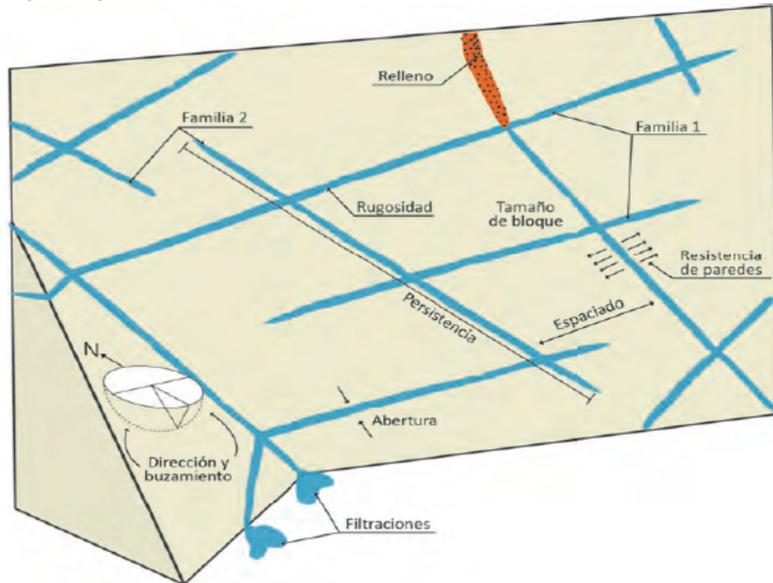


Figura 60. Características de las discontinuidades frente a la infiltración de agua.  
Fuente: (Vallejo, Ferrer, M., & Ortuño, L., 2002). Ingeniería Geológica

Los sistemas de discontinuidades más comunes en la naturaleza son:

- Estratificación.
- Foliación.
- Estratificación esta repetida
- Fallas.
- Diaclasas.
- Discordancias.
- Cambios mineralógicos.

Además, una obra subterránea como un túnel podría incrementar la fisuración, generar cambios en las propiedades de las discontinuidades e incidir en las condiciones de filtración del agua hacia el túnel.

### 2.12. Zonas Impermeables.

Geológicamente, se presentan en franjas de rocas de una granulometría muy fina (materiales tipo arcillas) o de una litología y textura cristalina, ya que debido a su distribución geométrica muy compacta presenta pocos intersticios y regiones selladas al paso del agua.

Excepcionalmente, debido a fenómenos geodinámicos se pueden presentar fracturas, nuevos conductos y pasos del agua subterránea, con filtraciones a diferentes zonas del macizo.

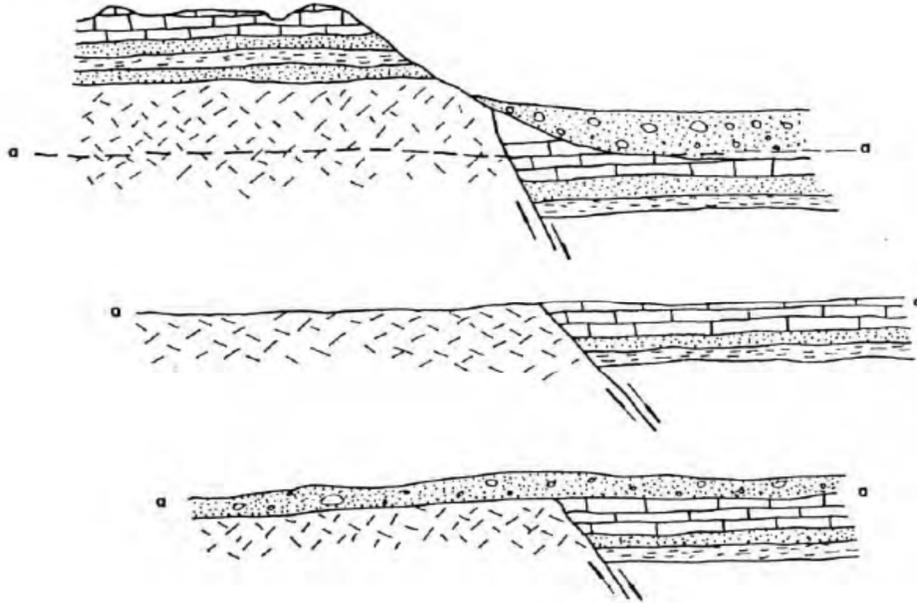


Figura 61. Acuíferos formados por la erosión  
Fuente; (Velez, 1999). Hidráulica de aguas subterráneas.

### 2.13. Recarga Hidrogeológica.

En los sistemas subterráneos, las zonas de recarga se localizan en áreas donde el agua puede percolar, infiltrar o ingresar al sistema hidrológico. Estos puntos son cuerpos litológicos que tienen características de alta permeabilidad y comunicación hacia sistemas de acuíferos con propiedades de almacenamiento.

Dentro del ciclo hidrológico, estas zonas son alimentadas por la precipitación y drenajes superficiales que podrían saturar e infiltrar los cuerpos rocosos. En la Figura 62, se representa la manera como un sistema lagunar realiza el aporte de agua por infiltración, desde la zona no saturada del terreno hacia el subsuelo, estableciendo el flujo de agua y proceso de recarga hidrogeológica.

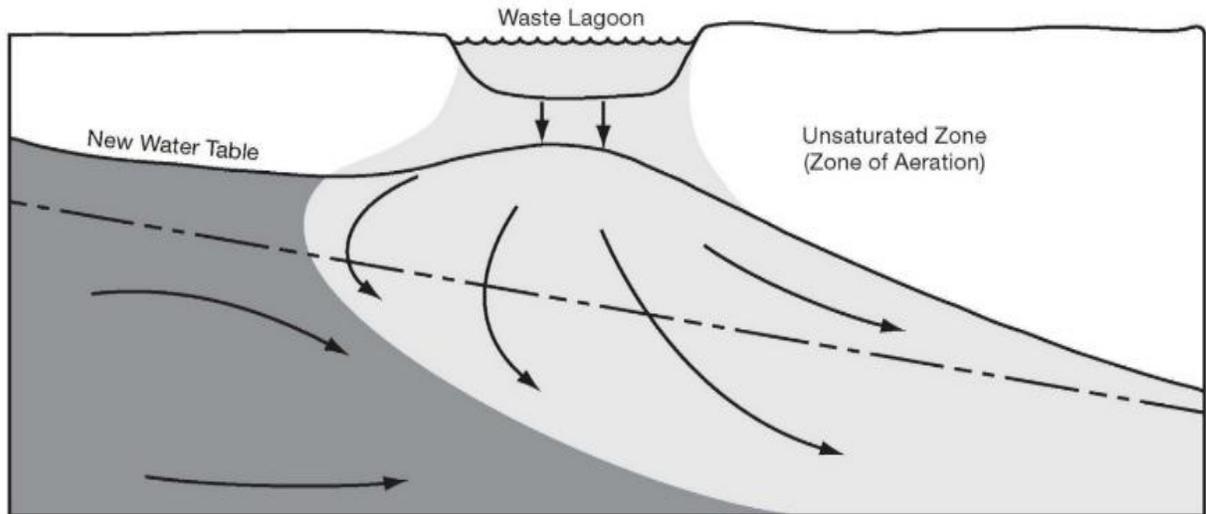


Figura 62. Esquema de flujo de agua subterránea y zonas de recarga  
Fuente: (AWWA, 2014). Manual of Wáter Supply Practices. Groundwater. Pág. 204.

Los valores de la recarga dependerán de fenómenos climáticos como la precipitación, evapotranspiración y escorrentía, para alimentar los cuerpos superficiales y a su vez los sistemas subterráneos; cualquier desequilibrio en los sistemas superficiales repercutirá en el descenso o variaciones del nivel freático y alimentación de los sistemas acuíferos.

#### 2.14. Descarga Hidrogeológica.

Corresponde al flujo de agua que emigra a puntos de almacenamiento en el subsuelo en sistemas acuíferos o en superficie como: lagos, lagunas, pantanos, represas, entre otras.

Las zonas que se encuentran en superficie están sometidas a la presión atmosférica, mientras que en los macizos el agua puede estar contenida en acuíferos confinados a una mayor presión, debido a la carga litoestática y esfuerzos in situ de la roca y cuando se presenta la comunicación por conductos, fracturas o exposición de la roca en superficie el agua tenderá a fluir e irrumpir como manantiales o goteos surgentes, que afloran en superficie como manantiales, como se muestra en la Figura 63 numeral a y b.

Otra situación se expone en la Figura 63 - c y d, cuando el macizo presenta zonas de cizallamiento, la cuales permiten el flujo desde los sistemas acuíferos a zonas en superficie, aun cuando se presentan barreras impermeables.

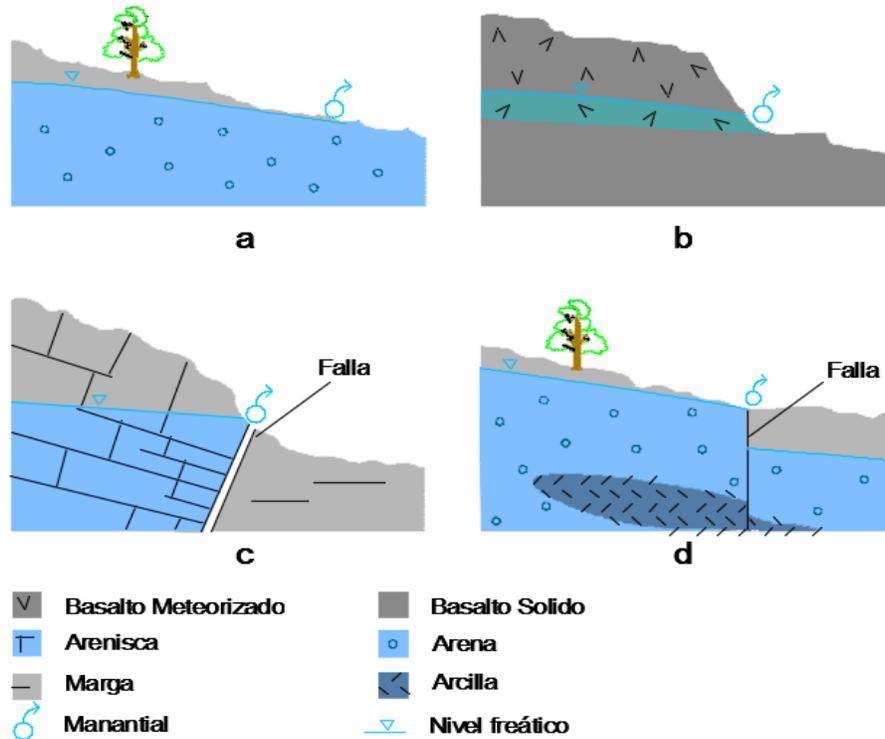


Figura 63. Esquema de descarga hidrogeológica en los macizos naturales  
 Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology. Pag 33.

Meczer definió una clasificación de acuerdo con la cantidad de agua subterránea aportada al sistema, la cual se expone en la Tabla 6, los valores dependen de las características de la roca, medio natural y meteorológico del área.

Tabla 6. Clasificación Meinzer para recarga subterránea

Orden	Descarga (m <sup>3</sup> /día)
Primer	Mayor a 250,000
Segundo	25,000 a 250,000
Tercero	2,500 a 25,000
Cuarto	500 a 2,500
Quinto	50 a 500
Sexto	5 a 50
Séptimo	0.75 a 5

Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology. Pag 34.

Las formas de descarga más comunes ocurren cuando el nivel piezométrico intercepta la superficie del terreno, en zonas de depresión o cuencas hidrográficas, alimentado cuerpos de agua (lagos, lagunas, pantanos, embalses, entre otras), con líneas de flujo que siguen la dirección del terreno; este tipo de descarga se presenta en la Figura 64.

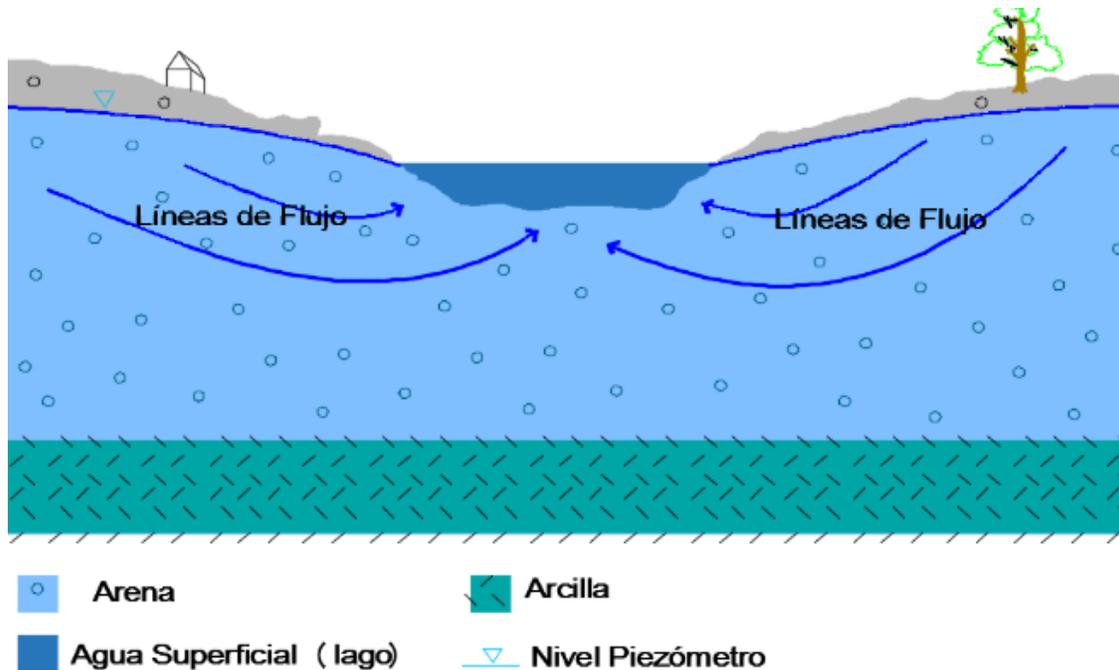


Figura 64. Líneas de flujo y recarga superficial  
 Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology. Pag 35.

## 2.15. Flujo del agua en los Macizos rocosos y subsuelo.

El agua presenta diversos comportamientos en profundidad de acuerdo al medio litológico y materiales que encuentre a su paso. A continuación se describen las características del flujo, zonas de macizos y subsuelo durante el tránsito del agua.

### 2.15.1. Flujo de agua en el subsuelo y superficie.

Se encuentra en la parte más superficial de la corteza en contacto con la atmósfera. Es la zona biológica activa para los sustratos de suelo orgánico, se encuentra en la zona húmeda y se caracteriza por la alta porosidad. El flujo de agua en esta región se encuentra gobernado por los procesos de almacenamiento, evaporación y transpiración, como reserva de agua de las plantas. Con los fenómenos de precipitación el agua meteórica va rellorando la reserva y genera una excedencia y saturación del sistema, lo que provoca la salida de agua por escorrentía superficial o en profundidad hacia la zona saturada infrayacentes a esta región.

En caso de ausencia de lluvia, el material vegetal puede consumir parte del agua, lo que genera un déficit en el sistema y descenso en los niveles piezométricos.

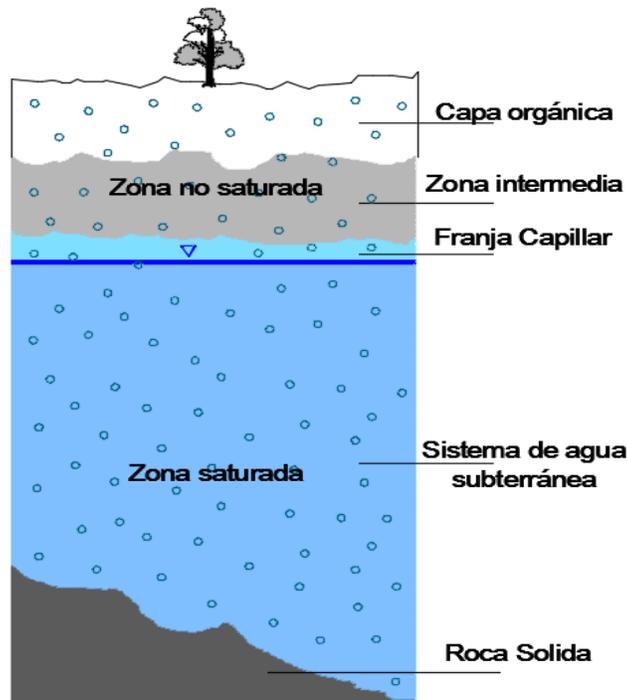


Figura 65. Zonas de un terreno donde puede fluir el agua.  
Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology. Pág. 26.

#### 2.15.2. Flujo del agua en la zona no saturada.

El flujo del agua en esta región está controlado por la componente gravitatoria, dependiendo de la posición dentro de esta zona, se podrían presentar componentes horizontales, al igual que fuerzas de absorción y presión negativa; su localización dentro zonas superficiales del agua se puede observar en la Figura 65.

#### 2.15.3. Flujo del agua en la zona capilar.

La zona capilar es la frontera entre las zonas saturadas y no saturadas, hacia la parte superior de estas zonas pueden existir bolsas de aire que podrían obstaculizar y taponar el paso del agua a niveles inferiores. Cuando traspasa la franja capilar, el agua tiene un comportamiento similar al de la zona saturada. De acuerdo con las propiedades de absorción, el nivel piezométrico es inferior a la altura de posición.

#### 2.15.4. Flujo de agua en la zona saturada.

Esta región se encuentra totalmente colmatada o llena de agua, el nivel piezométrico se encuentra siempre a mayor altura de posición, en la medida que se profundiza, el nivel piezométrico es constante. Hay un equilibrio entre las pérdidas de posición con el incremento de

la altura de presión, en esta zona el agua se mueve de puntos de mayor a menor nivel piezométrico, en flujos horizontales y verticales.

Este escenario ocurre en zonas donde se presentan materiales como arenas y limos, en cuerpos confinantes aledaños a cauces y depósitos poco consolidados de gravas y guijarros. En general, el agua subterránea se mueve a través de un estrato confinado hacia zonas libres pero a una tasa muy reducida, en función del medio y ventanas de descarga que se presenten.

## 2.16. Clasificación de los sistemas Acuíferos Subterráneos.

### 2.16.1. Formaciones acuíferas.

Es una unidad natural que podría almacenar y transmitir agua en las cantidades suficientes. En regiones áridas es un cuerpo natural apto para suplir las necesidades de poblaciones humanas, presenta un valor típico de permeabilidad intrínseca superior a  $10^{-2}$  Darcy. Los materiales sedimentarios de grano grueso tales como arenas y gravas no consolidadas, los Limos, Dolomita y Basaltos, en formaciones geológicas metamórficas y plutónicas fracturadas o alteradas son ejemplos de unidades litológicas consideradas como acuíferos.

### 2.16.2. Estrato confinante.

Esta característica hidrogeológica se presenta para macizos con características de baja a nula permeabilidad, menor a  $10^{-2}$  Darcy. Aunque las condiciones de flujo podrían ser relativas ya que dependen de aspectos locales y los estratos adyacentes o respaldos.

### 2.16.3. Acuícludo.

Formación geológica que no permite que circule el agua a través de ella, aun con buenas características de almacenamiento; ejemplos como limos y arcillas pueden contener en su estructura un porcentaje considerable de agua, pero no podrá salir por gravedad y circular en el subsuelo en condiciones normales.

### 2.16.4. Acuitardo.

Este sistema hidrogeológico, se presenta en materiales de baja permeabilidad que podría contener y almacenar cantidades apreciables de agua y transmitir a una tasa lenta desde un sistema a otro. Ejemplos de estos sistemas son: arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración y/o fracturación moderadas. Se suelen denominar capas semipermeables, sin

embargo, debido a su baja capacidad de drenaje, no representan interés como zonas de abastecimiento para suplir necesidades de agua.

En la naturaleza representan un papel importante como transmisores de agua en zonas de recarga vertical en grandes superficies.

#### 2.16.5. Acuifugo.

Son unidades hidrogeológicas incapaces de almacenar y transmitir agua debido a la poca y nula existencia de vacíos, está representado por materiales litológicos compactos, tales como: granitos, gneis y calizas muy compactas. Presentan características de barreras impermeables, con la excepción de que se evidencien fracturas que permitan el flujo del agua, como en el caso de Macizos de composición granítica o esquistos inalterados y poco fracturados.

Tabla 7. Características de los sistemas acuíferos frente al agua.

CLASE	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	CAPACIDAD DRENAJE	CAPACIDAD DE TRANSMICION	LITOLOGIA CARACTERISTICA
ACUIFEROS	ALTA	ALTA	ALTA	Gravas, arenas, calizas
ACUITARDOS	ALTA	MEDIA / BAJA	BAJA	Limos, arenas limosas, arcillas
ACUICLUDOS	ALTA	MUY BAJA	NULA	Arcillas
ACUIFUGOS	NULA	NULA	NULA	Granitos, Gneis, Mármoles

Fuente: (Vallejo, Ferrer, M., & Ortuño, L., 2002). Ingeniería Geológica.

#### 2.17. Tipos de Acuíferos y su comportamiento.

Los acuíferos constituyen sistemas multicapas que permiten la filtración y almacenamiento del agua, presentan conexiones con zonas de recarga y descarga hacia otros puntos del sistema hidrológico, otros acuíferos o drenajes en superficie.

La Figura 66, expone las características de los sistemas acuíferos de acuerdo con el flujo o almacenamiento del agua.

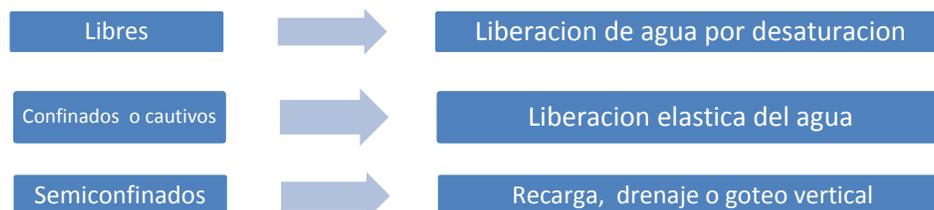


Figura 66. Características de los acuíferos según su estructura y funcionamiento.

Fuente: (Vallejo, Ferrer, M., & Ortuño, L., 2002). Ingeniería Geológica.

A continuación, se describen las características para los diferentes tipos de acuíferos expuestos.

### 2.17.1. Acuíferos Porosos.

Se encuentran constituidos por materiales detríticos, tales como: gravas y arenas. Sus propiedades están relacionadas con la granulometría y el relleno entre el esqueleto mineral. Se encuentran compuestos por granos de rocas que facilitan el almacenamiento y transmisión del agua hacia zonas infrayacentes, manantiales y otros sistemas acuíferos capaces de contener el agua.

### 2.17.2. Acuíferos Fisurados.

A este grupo pertenecen los sistemas acuíferos con características de almacenamiento o conducción del agua, están en función de las grietas o fisuras provenientes de la génesis del material o por esfuerzos geostáticos, también por procesos de reacción y disolución de la roca.

Esto es común en minerales del grupo de carbonato y rocas que se presentan como materiales homogéneos continuos tales como: las calizas, dolomita, granitos, basaltos y cuerpos ígneos metamórficos.

### 2.17.3. Acuífero Libre.

Son sistemas en los que el nivel de agua está condicionado por formaciones permeables, liberan el agua lateralmente por de saturación, los volúmenes del líquido almacenados son importantes.

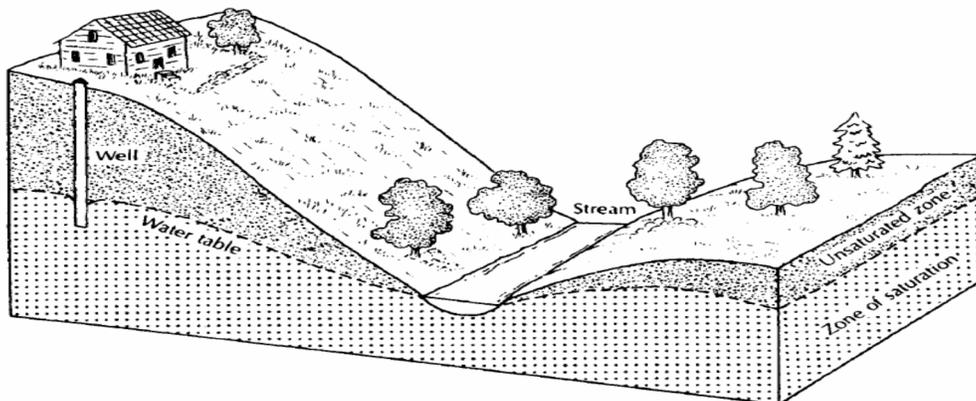


Figura 67. Acuífero no confinado o libre.  
Fuente: (Espinoza, 2004). Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento.

En la Figura 67, se presenta un escenario para un acuífero libre, su localización es cercana a la superficie, con una recarga por la infiltración vertical desde zonas saturadas. Se representan

flujos laterales o desde estratos inferiores y que recargan a drenajes superficiales en la zona inferior de la cuenca.

#### 2.17.4. Acuífero Confinado.

Son sistemas que se encuentran aislados en todos sus contactos, rodeados por barreras impermeables, presentan la lámina de agua en el techo de la formación, la cual genera un efecto adicional de carga estática. La descompresión y transmisión del fluido sucede a puntos superiores del sistema y pueden aflorar lateralmente, escenario como el que se expone en la Figura 68.

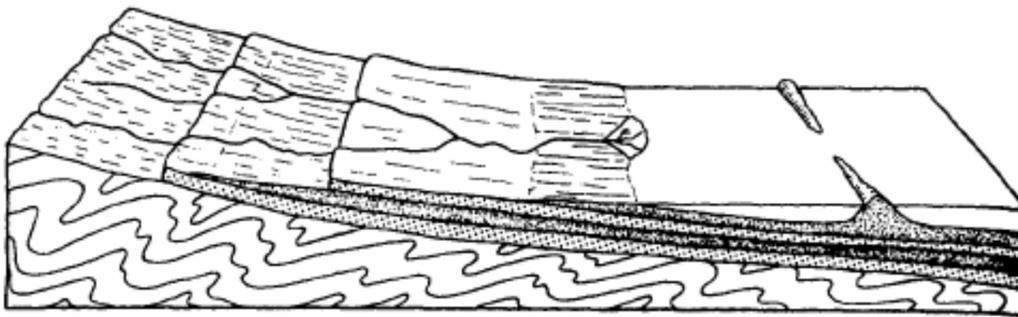


Figura 68. Acuífero confinado o artesiano.  
Fuente: (Espinoza, 2004). Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento.

Las recargas de estos acuíferos ocurren a través de una zona de recarga superior en la cual los estratos afloran a la superficie de terreno, o a través de una infiltración vertical muy lenta.

En la Figura 69 se representa un acuífero confinado, por la alternancia de capas de lava, Basaltos impermeables, intercalados con sedimentos, y depósitos de arena, y gravas, limos, materiales permeables y arcillas. Morfológicamente, generalmente corresponde a zonas de piedemonte en las que por procesos de erosión presentan ventanas de recarga lateral del sistema acuífero de arenas y gravas.

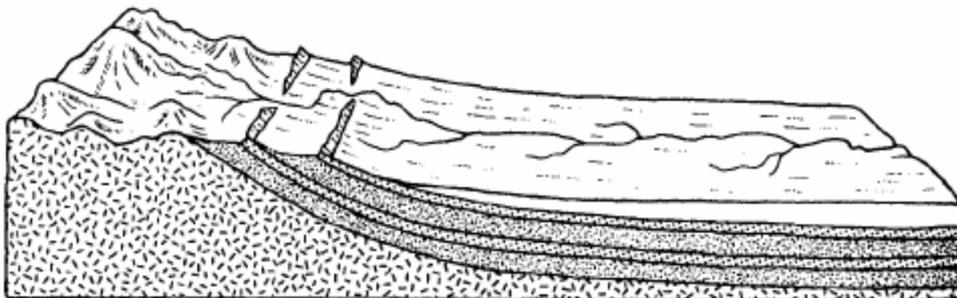


Figura 69. Acuífero en zonas coladas de lava  
Fuente: (Espinoza, 2004). Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento.

En la Figura 70, se presentan sistemas acuíferos confinados, conformados por levantamiento de coladas de intrusión, en capas intercaladas de estratos y sistemas de diferente conductividad hidráulica.

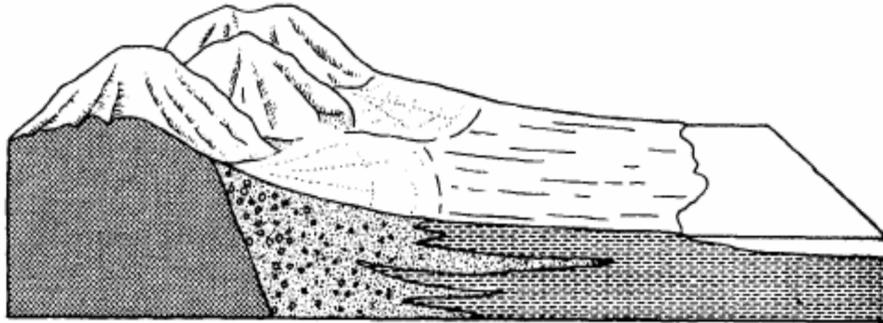


Figura 70. Acuífero confinado cuenca intermontana  
Fuente: (Espinoza, 2004). Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento.

En ocasiones, una capa de baja permeabilidad se encuentra intercalando zonas de mayor permeabilidad que permiten la acumulación del agua, de acuerdo con las capacidades de drenaje y transmisión del agua de acuíferos de mayor permeabilidad hacia las zonas adyacentes a estos Acuíferos colgados; donde se podrán establecer flujos verticales descendentes desde la zona no saturada, escenario que se muestra en la Figura 71.

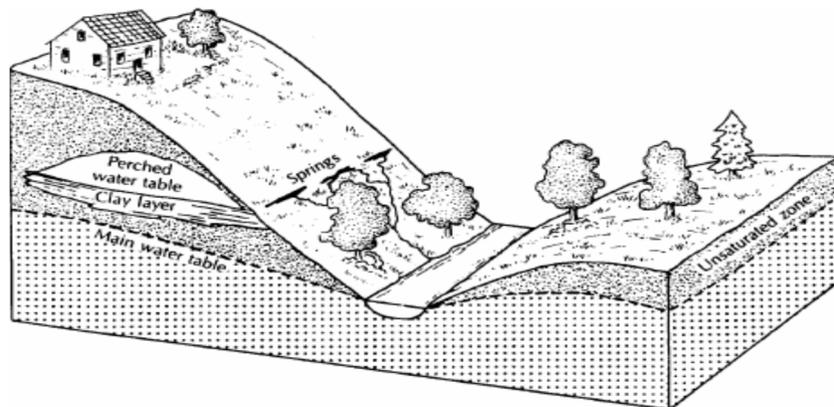


Figura 71. Acuífero Colgado  
Fuente: (Espinoza, 2004). Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento.

#### 2.17.5. Acuífero semiconfinados.

En este tipo de acuíferos los contactos son materiales semipermeables, que permiten el paso del agua hacia los sistemas hidrogeológicos; están integrados por un acuífero superior bien alimentado, un paquete semipermeable o Acuitardo y un acuífero inferior semiconfinado.

## 2.18. Geología asociada al potencial acuífero.

El agua del ciclo hidrológico que se infiltra hacia el interior de la tierra va saturando los medios por donde circula, lo que genera almacenes subterráneos, con capacidad para retener de forma transitoria o definitiva el líquido. La libertad del flujo del agua está controlada por la apertura y relleno de las fracturas, los constituyentes de las rocas, el espesor de las diferentes secuencias de materiales y la carga hidrostática hacen posible el movimiento constante, para almacenar o represar el líquido.

Cada ambiente litológico presenta singularidades propias de sus constituyentes. A continuación, se describen los principales elementos geológicos en el almacenamiento y transmisión de agua en la naturaleza.

### 2.18.1. El agua subterránea en las rocas ígneas y metamórficas.

Los materiales ígneos – metamórficos presentan características masivas, con pocas zonas de debilidad y alta resistencia, tienen baja porosidad primaria, que representan condiciones para restringir el paso del agua.

En estos sistemas se aumentarían los valores de infiltración si los cuerpos están afectados por procesos de cizalla, o descomposición de la roca, que podrían representar cambios significativos en sus propiedades.

Estos fenómenos pueden configurar ventanas de recargas a otros cuerpos de roca o manantiales en superficie. El efecto de la alteración y meteorización de las rocas cristalinas presenta variaciones, llegando a presentarse valores de porosidad del orden del 50% en materiales tipo saprolito, de acuerdo a (NONNER, 2003, p. 44)

#### Rocas Metamórficas.

Los cuerpos metamórficos son materiales producto de procesos de presión y temperatura que generan cambios y recristalización de minerales de otros grupos de rocas, estos paquetes geológicos presentan variedad de texturas y grados de alteración.

Las cizallas son una de las particularidades de los ambientes metamórficos, las cuales pueden exponerse en superficie debido al agua subterránea, generando procesos de desintegración y meteorización, propiciando nuevas aperturas y conductos donde el agua podrá circular y almacenarse.

Además, el agua también puede cambiar la mineralogía ocasionando la desintegración de la roca, relajación en los esfuerzos y desintegración del macizo. Las fisuras de la roca fresca dan lugar a materiales sueltos como arenas, gravas, limos y variedades de productos granulares finos y gruesos, con un aumento de los índices de permeabilidad y porosidad de la roca.

Lo anterior conlleva a que las características hidráulicas como la permeabilidad presenten valores muy bajos, mientras que en paquetes metamórficos alterados, pueden tener un aumento en los índices, vacíos y conductividad hidráulica del macizo, debido a la conexión de la red de discontinuidades por la presencia de nuevas fisuras, reportándose valores de permeabilidad hasta de 10 m/día, de acuerdo a (NONNER, 2003, p. 44).

Los macizos metamórficos son considerados como acuíferos pobres, calificados como sistemas acuífugos; pero si las rocas presentan un alto grado de alteración o zonas de fracturas, podrían ser sistemas hidrogeológicos con altas capacidades de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.

### Intrusivos.

Estos cuerpos de roca están conformados por materiales magmáticos provenientes del centro de la tierra que se han solidificado antes de salir a superficie. Se componen de una estructura densa y compacta; generalmente compuestos por minerales de hierro, olivino, piroxeno, además de compuestos básicos y ultra básicos.

En la Figura 72 se expone un escenario frecuente para este grupo de rocas. Debido a fenómenos de erosión y levantamiento del terreno, un bloque intrusivo queda expuesto en la superficie a la acción del ambiente, que ocasiona su alteración y degradación. Sin el peso de la cobertura se presenta una relajación en los esfuerzos, con fracturas y zonas abiertas dentro de la roca.

La proximidad de este tipo de rocas con zonas de falla, al igual que la ocurrencia de fenómenos de levantamiento y subducción pueden conllevar a la aparición de fracturas donde el agua podrá moverse hacia la superficie.

En este tipo de rocas los valores de porosidad y permeabilidad son nulos; sin embargo, se han reportado tasas de 0.4 m/hora en zonas con fenómenos de cizallamiento, similares a materiales clásticos y muy permeables.

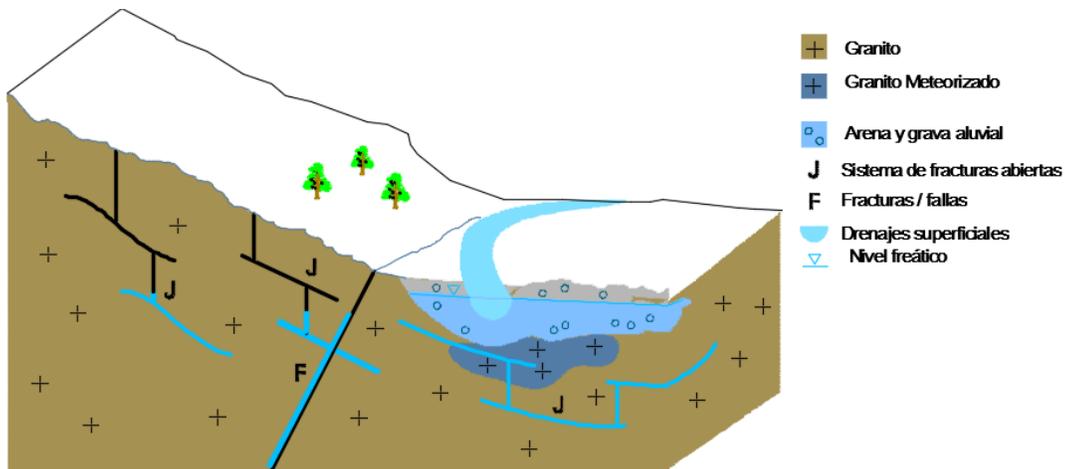


Figura 72. Basamentos intrusivos aflorando en superficie y recargan sistemas aluviales  
 Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology. Pág. 52.

Al igual que las rocas metamórficas los cuerpos intrusivos son considerados como barreras de otros acuíferos, que se denominan sistemas acuífugos.

### Flujos volcánicos y el agua subterránea.

Este tipo de depósitos se encuentran asociados a procesos volcánicos, cuando el magma sale a superficie en forma líquida se esparce por laderas y faldas del volcán, se enfría y conforma capas de materiales con estructuras estratificadas y depósitos de roca; debido a su rápida exposición en la superficie presentan estructuras porosas.

Con la exposición de la roca se inician procesos de meteorización y desintegración de materiales clásticos tipo arenas o gravas, la formación de los horizontes de suelos, saprolito y roca, escenario que se expone en la Figura 73.

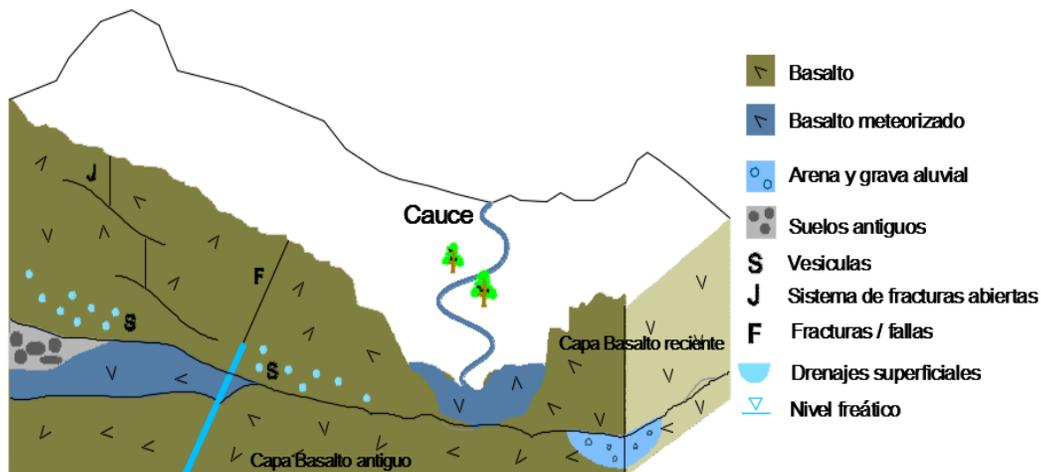


Figura 73. Estratos y flujos de lava interacción con las recarga subterránea.  
 Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology. Pág. 54.

Este tipo de rocas presentan índices bajos de porosidad (<0.01) cuando son densas y se encuentran poco fracturadas. Sin embargo, donde se han presentado fenómenos de desintegración y cizallamiento se pueden encontrar valores entre 0.05 a 0.1.

Del mismo modo, los valores de permeabilidad presentan cambios, debido a la historia geológica de la roca, en la Tabla 8, se presentan los valores y propiedades de los materiales piroclásticos en algunas zonas de los Estados Unidos.

#### Agua subterránea en cuerpos piroclásticos.

Los materiales que salen al ambiente después de una erupción volcánica, conforman nubes y gases que rodean la estructura volcánica, luego se precipitan en la superficie donde conforman capas y estratos.

Este tipo de rocas presentan características heterogéneas, desde materiales muy finos y granulares, hasta bloques de gran tamaño. Los valores de porosidad y permeabilidad son variables debido a las condiciones de confinamiento, fracturación y alteración del macizo.

Los procesos de dinamismo en la corteza generan un incremento significativo en los valores de porosidad y permeabilidad de las rocas, las cuales se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Propiedades de rocas piroclásticas en rocas de Nevada, USA. (Keller, 1960).

Características del depósito	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Porosidad	Permeabilidad (m/día)
Tobas Almohadilladas, Zeolíticas	1500	0.39	$3.5 * 10^{-5}$
Tobas almohadilladas, Pumiceas	1370	0.4	$1.0 * 10^{-2}$
Tobas friables	1500	0.36	$1.2 * 10^{-3}$
Tobas selladas	2180	0.14	$2.8 * 10^{-4}$

Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology, pág. 56

La permeabilidad puede presentar bajos valores debido a que la matriz de ceniza rodea la estructura de roca, compactando y sellando los conductos internos del material. Sin embargo, los procesos de meteorización y erosión conllevan cambios en la fisuración y fracturamiento del material, aumentando los valores de las propiedades hidráulicas.

Este cambio en las propiedades, puede generar sistemas acuíferos colgados o sistemas encerrados, limitados por sistemas acuífugos y acuitardos de materiales de lava y basalto, que sellarán el acceso y descarga del fluido.

### 2.18.2. El agua subterránea en las rocas sedimentarias.

Los cuerpos sedimentarios como areniscas, arcillolitas o limolitas pueden presentar características de porosidad y permeabilidad poco significativas; sin embargo, los espacios y fracturas podrían ser relevantes en ambientes donde se han presentado fenómenos de tectonismo, conformando nuevas estructuras que facilitan el contacto e interacción entre la roca y el agua.

En la Tabla 9, se presentan valores de permeabilidad y porosidad para algunos paquetes de roca sedimentaria en Estados Unidos y otros lugares donde se tienen registrados valores nulos debido a la escasa fracturación y desintegración de la roca.

Por el contrario, en zonas donde se presentan una alta meteorización y exposición de la roca a agentes naturales, se podrían encontrar valores de permeabilidad en rangos de 25 a 50 m<sup>3</sup>/día.

Tabla 9. Coeficientes de permeabilidad y porosidad para rocas sedimentarias (Davis, 1967).

Tipo de roca	Porosidad	Coefficiente de permeabilidad (m/día)
Shale, Cretacico / USA	–	3.5*10 <sup>-6</sup>
Shale, USA	0.11	–
Shale, USA	0.25	–
Shale, Precámbrico	0.02	–
Arenisca, Tawilah/Yemen	–	0.2
Arenisca, Berea/USA	0.19	0.3
Arenisca, Ordovícico /USA	0.07	3.5*10 <sup>-3</sup>
Arenisca, shaley/USA	0.15	2.6*10 <sup>-4</sup>
Caliza compacta con algunos poros /USA	0.10	3.5*10 <sup>-3</sup>
Caliza, chalky/USA	0.30	3.3*10 <sup>-2</sup>
Caliza, Oolítico	0.22	0.3

Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology, pág. 56

### Sedimentos Consolidados.

Materiales como arenas o gravas en su condición original pueden estar cementados con otros más finos, como limos, arcillas o materiales calcáreos. Cuando hay infiltración del agua en los diferentes estratos, pueden ampliarse los conductos por la disolución y socavación gradual de los espacios e incrementar las propiedades hidráulicas de los elementos.

Estas redes internas donde el agua subterránea fluye a través de los macizos naturales con el paso del tiempo pueden convertirse en verdaderos almacenes y sistemas acuíferos, si los materiales presentan una alta degradación.

En el estudio de este tipo de sistemas se deberán tener en cuenta las propiedades hidráulicas primarias y secundarias, las condiciones estructurales del macizo, estratos, mineralogía y características de recarga del sistema hidrogeológico.

Sedimentos no Consolidados.

Los materiales sedimentarios que no cuentan con procesos de compactación y litificación, están dispersos en forma irregular en depósitos aluviales en la parte baja de las cuencas sedimentarias y como depósitos coluviales en zonas de media ladera, en formas de clastos, con una granulometría variable.

Las características de porosidad y permeabilidad, condicionadas al grado de empaquetamiento y distribución de las partículas de acuerdo con los procesos de transporte y depositación.

En la Tabla 10, se describen los coeficientes hidráulicos más representativos para este grupo de rocas, los más bajos índices de permeabilidad se encuentran en el grupo de las arcillas en rangos  $>1.4 \times 10^{-5}$  m/día representando materiales impermeables que a su vez tienen índices de porosidad elevados asociados a la estructura laminar de los silicatos de alúmina  $>0.48$ .

Los valores más altos en los índices hidráulicos se presentan hacia la parte gruesa de la fracción granulométrica de los materiales, es decir gravas y arenas, que en la naturaleza representan los materiales con las condiciones más apropiadas para establecer sistemas acuíferos de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.

Con las condiciones de recarga constantes, se presentan tasas de flujo entre 400 a 4000 m<sup>3</sup>/día, conformando drenajes subterráneos, sistemas complejos de redes internas que abastecen manantiales y cuerpos superficiales de agua en forma permanente.

Tabla 10. Valores de porosidad y permeabilidad en materiales no consolidados (Davis, 1967).

ID	Origen	Tipo de roca	Porosidad	Coefficiente de permeabilidad (m/día)
1	Marino	Arcilla	0.48	$1.4 \times 10^{-5}$
2	Pantano	Limo	0.49	0.19
3	Pantano	Limo	0.51	0.28
4	Aluvión	Arena fina	0.45	11.4
5	Aluvión	Arena fina	0.52	4.7
6	Marino	Arena media	0.42	33
7	Aluvión	Arena gruesa	0.33	164
8	Aluvión	Grava	0.25	975

Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology, pág. 65

En la Figura 74, se representa la morfología característica de este tipo de ambientes de materiales poco consolidados, donde se encuentran fenómenos de erosión y carcavamiento continuo de sedimentos y cuerpos de roca por los drenajes que interceptan.

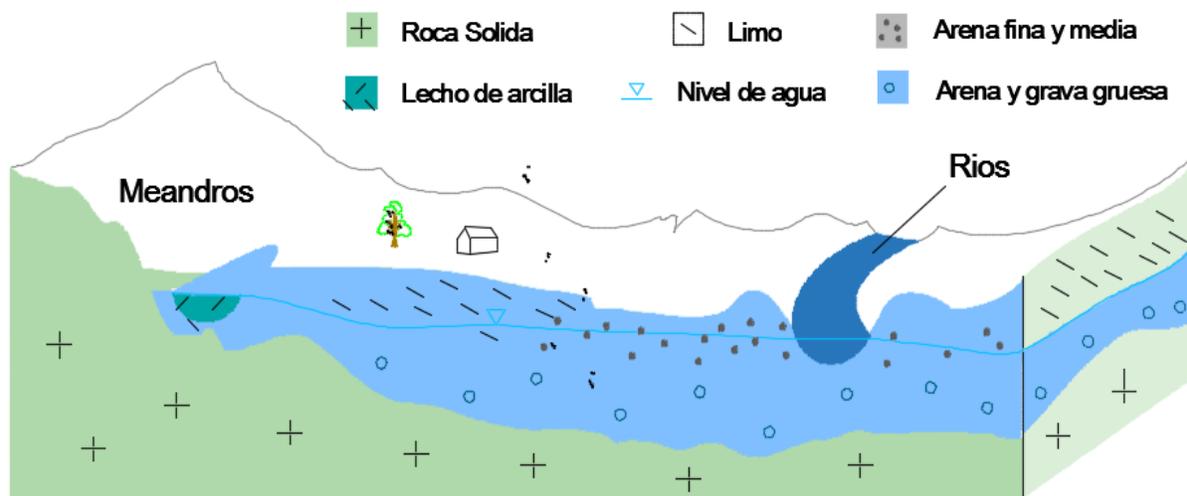


Figura 74. Depósitos no consolidados sobre lechos de roca erosionados.  
Fuente: (NONNER, 2003). Introduction to Hidrogeology. Pág. 66.

### Rocas Carbonatadas.

Uno de los escenarios de estudio más complejos para la hidrogeología son depósitos de roca carbonatada como la dolomita y yeso, provenientes de organismos vivos con estructuras óseas de calcio, como cochas y caparzones.

En este tipo de ambientes, las fracturas y espacios vacíos se presentan en las zonas de contactos geológicos, zonas de cizallamiento (propiedades secundarias), en la que dominan los procesos de disolución y karstificación por las características químicas de la roca cuando se encuentra en contacto con el agua, donde se presentan escenarios extremos que han reportado valores de caudal de infiltración mayor a 2000 m<sup>3</sup>/día.

#### 2.19. Problemática del agua subterránea.

Debido al crecimiento y uso de los recursos se ha presentado un desequilibrio entre la población humana y el medio natural. En la actualidad, el recurso agua tiene efectos negativos como inundaciones y desastres. De acuerdo (Taniguchi & Hiyama, 2014) - Figura 75, este proceso se puede evaluar por tres modelos relacionados con los problemas medioambientales globales (Moss et al., 2010).

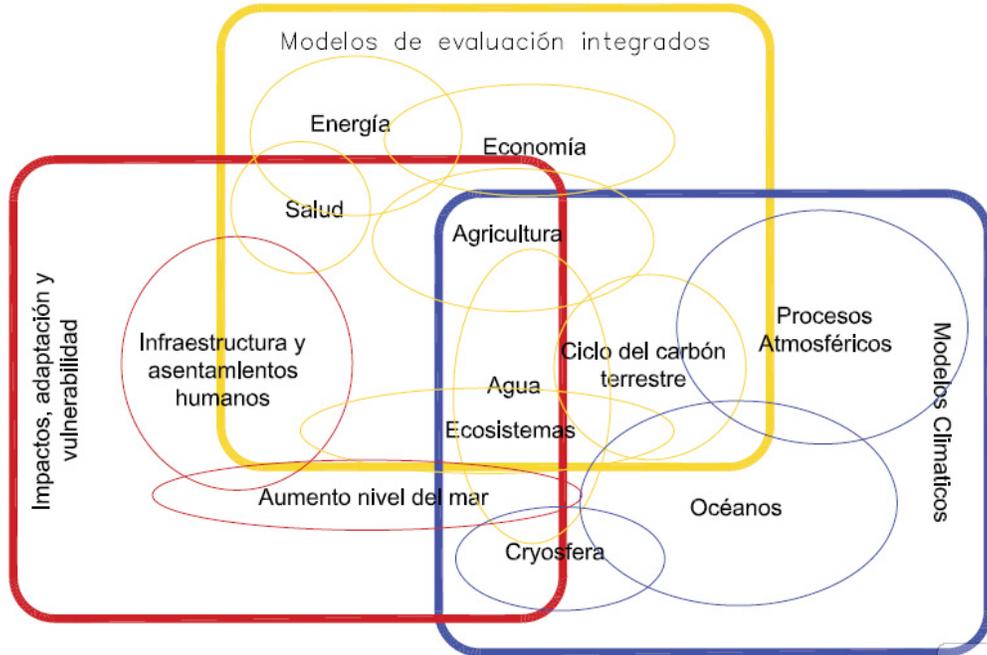


Figura 75. Problemática ambiental global. (Taniguchi & Hiyama, 2014)  
 Fuente: Groundwater as a Key for Adaptation to Changing Climate and Society, Pág. 18

Cada uno de los modelos evalúa procesos del medio natural como en el ciclo del agua, carbono y los ecosistemas naturales. Un grupo analiza aspectos importantes del desarrollo humano en cuanto a las obras e infraestructura, salud, requerimientos agrícolas y económicos.

Esta metodología integra los aspectos del clima y ambiente, relacionados con los fenómenos atmosféricos y del océano, como se presenta en la Figura 75. Cada uno de los elementos de estos modelos se cruza para evaluar el grado de incidencia del desarrollo humano en los procesos naturales y fenómenos medio ambientales.

Bajo las consideraciones de (Taniguchi & Hiyama, 2014), el agua tiene un papel primordial, se evalúa su cantidad como un recurso limitado y su exceso o escases frente a la cantidad de individuos; además se evalúa la distribución de este recurso natural en el espacio y el tiempo, para definir el impacto de las sociedades y presión a los ecosistemas naturales.



Figura 76. Estimación de recarga de agua subterránea (mm/año) (Doll et al. 2002)

Fuente: (Taniguchi & Hiyama, 2014). Groundwater as a Key for Adaptation to Changing Climate and Society, Pag 21.

La relación de cada uno de los aspectos evaluados por la metodología de (Taniguchi & Hiyama, 2014), se describen en la Tabla 11; donde se incluyen las relaciones entre el desarrollo humano, los procesos naturales, los fenómenos climáticos, la presión y consecuencia por cada actividad analizada.

Tabla 11. Causas y consecuencias de los problemas con el agua subterránea.

Causa	Presión	Consecuencia	Impacto
Incremento de la Población	Incremento en la demanda del agua	Incremento en el bombeo del agua subterránea	Decrecimiento de las reservas de agua subterránea
Cambio Climático	Cambio en los patrones de precipitación	Decrecimiento de volumen de recarga de agua subterránea	
Urbanizaciones	Cambios en uso del territorio	Disminución de la calidad del agua.	
Incremento de poblaciones en zonas de costa	Incremento en la demanda del agua	Intrusión de sales en el agua	Salinización del agua subterránea
Calentamiento global	Aumento del nivel del mar	Intrusión de sales en el agua	
Incremento de la Población	Incremento de carga de materiales	Administración inadecuada del recurso agua	Contaminación del agua subterránea
Urbanizaciones	Focos de calor	Riesgos en el subsuelo	Efectos desconocidos en los ecosistemas
Globalización	Capitalismo	Traslado del líquido con más consumo de energía	Uso no sustentable del recurso líquido

Fuente: (Taniguchi & Hiyama, 2014). Groundwater as a Key for Adaptation to Changing Climate and Society, Pag 21.

Frente a desarrollos de tunelería, los impactos más significativos se encuentran en:

- Cambios o disminución del nivel piezométrico en el flujo y red subterránea del agua, debido a la apertura del túnel donde el agua podría emigrar hacia la excavación.
- Variaciones en la dinámica e hidráulica superficial de las corrientes, en las cuencas y micro cuencas superficiales de abastecimiento, con variaciones en el nivel piezométrico, altura, afectación en las zonas de recarga y descarga de las diferentes fuentes de agua.
- Cambios en la calidad química del agua subterránea, con la incorporación de sustancias y elementos constructivos o derivados de los trabajos, mezcla o combinación de materiales naturales del ambiente de trabajo de las obras subterráneas.

### Capítulo III - Exploración Hidrogeológica

Uno de los pasos más importantes en el diseño y construcción de túneles, es el conocimiento y predicción del comportamiento del macizo frente a las variables que afectan los procesos esfuerzo - deformación, así como las propiedades hidráulicas del material.

El conocimiento del subsuelo se fundamenta en la exploración geotécnica, determinando las características del flujo y régimen de las aguas subterráneas, además de propiedades en las estructuras litológicas. Siguiendo los criterios de (INGEOMINAS, Programa de Exploración de Aguas Subterráneas, 2004), los aspectos más relevantes son:

- Tipo de litología.
- Textura de las rocas.
- Cambios de facies.
- Ambientes de deposición.
- Estructuras tectónicas y geomorfológicas.
- Composición mineralógica de los sedimentos y rocas.
- Heterogeneidad de los materiales.
- Tipos y características de las discontinuidades. (relleno, apertura, persistencia, rugosidad, entre otras).
- Grado de alteración del macizo en los sectores del futuro proyecto.
- Zonas de cizallas y estructuras geodinámicas asociadas al macizo.

El análisis se fundamenta en herramientas de fotointerpretación de imágenes, áreas satelitales, y de radar, estratigrafía, palinología, sedimentología, vulcanología, geología estructural e hidráulica.

En la Tabla 12, se presentan los criterios para identificar y caracterizar zonas potenciales de ocurrencia de agua subterránea, donde se evalúan elementos del entorno natural y características de las rocas, para evaluar la probabilidad de ocurrencia y productos que se generan en esta etapa de prospección hidrogeológica.

Tabla 12. Criterios técnicos para identificar zonas potenciales de ocurrencia de agua subterráneas.

CRITERIO	INDICADOR	INSUMOS
Génesis y edad de rocas y sedimentos.	Principales estructuras hidrogeológicas: macizos, cuencas artesianas y depósitos recientes.	Atlas geológico digital, mapa metamórfico.
Litología.	Textura y porosidad.	Atlas geológico digital, mapas geológicos departamentales, planos geológicos, imágenes de satélite.
Fracturamiento y alteración de rocas.	Densidad y tipos de fracturas y grado de meteorización.	Mapas geológicos departamentales, planchas geológicas, mapa de red hidrográfica, imágenes de satélite y radar fotografías aéreas Atlas sísmico.
Tipo de estructura geológica.	Zonas favorables para acumulación del agua.	Planchas geológicas. Atlas sísmico.
Geometría de estructuras hidrogeológicas.	Espesores Profundidades Extensiones Cambios litológicos.	Atlas sísmico, planchas geológicas. Estudios hidrogeológicos existentes.

Fuente: (INGEOMINAS, Programa de Exploración de Aguas Subterráneas., 2004)

Los resultados obtenidos en esta fase deben tener una interpretación ajustada a la escala del proyecto y características hidráulicas de la formación geológica. Para un macizo natural pueden presentarse cambios significativos de varios órdenes de magnitud en los índices de permeabilidad y almacenamiento de la unidad geológica analizada.

En macizos duros, las características hidráulicas están gobernadas por las juntas y estructuras asociadas, mientras que para terrenos blandos y poco consolidados, los valores de permeabilidad y almacenamiento del acuífero están en función del tipo de roca, mineralogía, grado de consolidación y heterogeneidad del medio rocoso.

### 3.1. Evaluación cartográfica

A partir de estudios generales de caracterización geológica de superficie, se puede estimar la potencialidad de infiltración y almacenamiento del agua subterránea, esto para definir las especificaciones de las actividades exploratorias posteriores.

### 3.2. Evaluación hidrológica.

La identificación y valoración del agua subterránea deberá tener en cuenta mediciones meteorológicas, hidrológicas, recarga y descarga. Así como la disponibilidad del recurso en superficie (balance hídrico), definiendo aspectos como:

- Niveles piezométricos.

- Espesores de la zona saturada.
- Estimar parámetros de porosidad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento de la unidad rocosa.
- Cambios estructurales y orden de fracturación del macizo.
- Características físico químicas del agua subterránea.

### 3.3. Exploración Geofísica – métodos indirectos.

El conocimiento del subsuelo fundamenta la modelación del macizo identificando las diferentes estructuras y propiedades de los materiales. Análisis que se fundamenta en mediciones directas e indirectas al terreno, es un análisis muy preciso.

Los materiales naturales como rocas y suelos presentan propiedades tales como: conductividad eléctrica y resistividad; varían debido a las condiciones de litificación, saturación, fracturación. Podrán utilizarse para caracterizar y cuantificar el potencial acuífero del macizo.

A continuación se reseñan las metodologías más utilizadas para la evaluación del agua subterránea.

- Resistividad.
- Gravimetría.
- Sísmica.
- Magnetometría y electromagnetismo.
- Registros geofísicos de pozos y nuevas técnicas como la resonancia magnética de protones o nuclear.

#### 3.3.1. Geoeléctrica.

Esta técnica que se basa en la ley de Ohm, evalúa la resistencia de los materiales al paso de la corriente, los cuales variarán de acuerdo con las condiciones de litificación y naturaleza de la unidad geológica. En la Figura 77 se presentan los valores más representativos para diferentes paquetes rocosos.

Durante la medición se instalan equipos en la superficie del terreno para emitir y recibir ondas y con esto evaluar la velocidad y características de propagación de las señales enviadas.

Los procesos exploratorios que utilizan este tipo de técnicas son:

- Sondeos eléctricos verticales.
- Calicata eléctrica.
- Tomografía Eléctrica.
- Registros de perforaciones (SP –Resistividad).

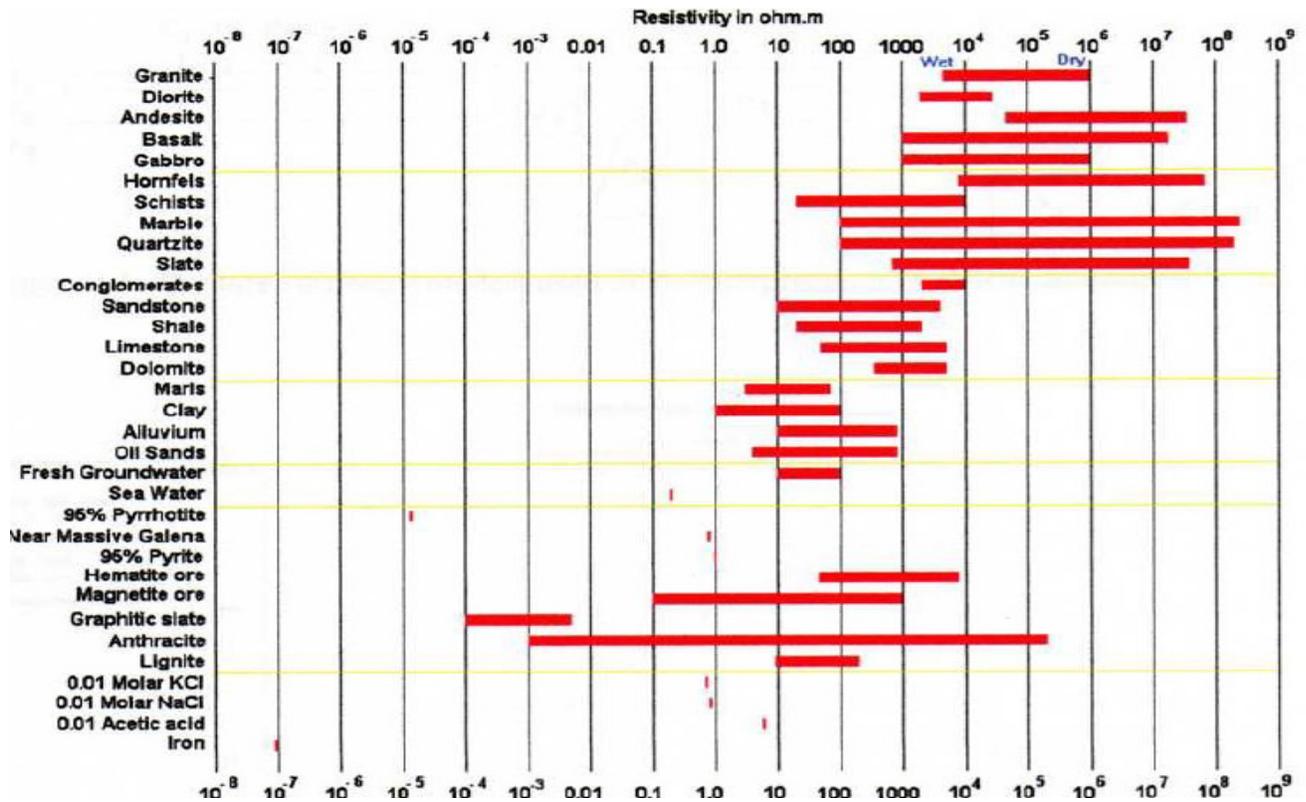


Figura 77. Características de resistividad de diferentes grupos de roca  
Fuente: (Ulloa, 2014). Presentación. Métodos Indirectos de Exploración Geotécnica.

### 3.3.2. Sísmica – Refracción, reflexión de ondas superficiales.

Esta técnica utiliza el principio de Huygens, el cual establece que un frente de ondas genera un nuevo frente al cambiar de medio. Se fundamenta en la ley de Snell (refracción y difracción), esta técnica se aplica en el subsuelo cuando se presentan cambios estratigráficos, como se describe en la Figura 78.

Cuando se tienen estratos de materiales blandos intercalados en materiales duros se presentan errores en la detección, ya que dichas variaciones no pueden ser detectadas.

Esta técnica se apoya en el hecho de que las ondas viajan a través de la profundidad de la tierra presentando cambios en su longitud y frecuencia y están caracterizadas por:

- Ondas P: Con un movimiento paralelo a las partículas (compresión y dilatación).
- Ondas S: Tienen un movimiento de las partículas perpendicular al plano vertical (corte).

Las ondas superficiales que viajan en el subsuelo cerca de línea del terreno, se clasifican en:

- Ondas Rayleigh: Las las ondas retroceden elípticamente, corte vertical.
- Ondas Love: Las partículas se desplazan perpendicular al plano horizontal, corte horizontal.

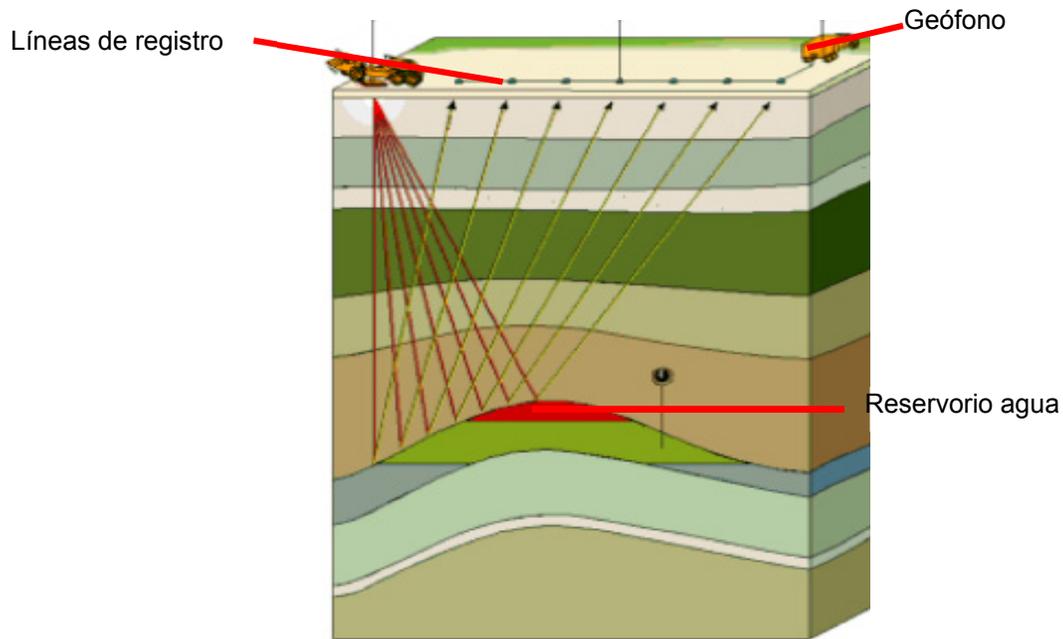


Figura 78. Sísmica de reflexión en unidad estratificada  
Fuente: (Ulloa, 2014). Presentación. Métodos Indirectos de Exploración Geotécnica.

### 3.3.3. Ensayos Downhole y crosshole.

Utilizan técnicas directas e indirectas para la medición de los parámetros geofísicos del terreno como se observa en la Figura 79. Dentro de las perforaciones se instalan dispositivos Packer, transductores y equipos geófonos para evaluar las diferencias de velocidad de ondas primarias y secundarias a lo largo de la columna perforada, permite estimar parámetros como:

- Densidad.
- Módulos de velocidad.
- Estratigrafía.
- Sistemas estructurales.

Los usos más comunes para este tipo de técnicas se enfocan en la investigación de hidrocarburos, yacimientos minerales y agua subterránea.

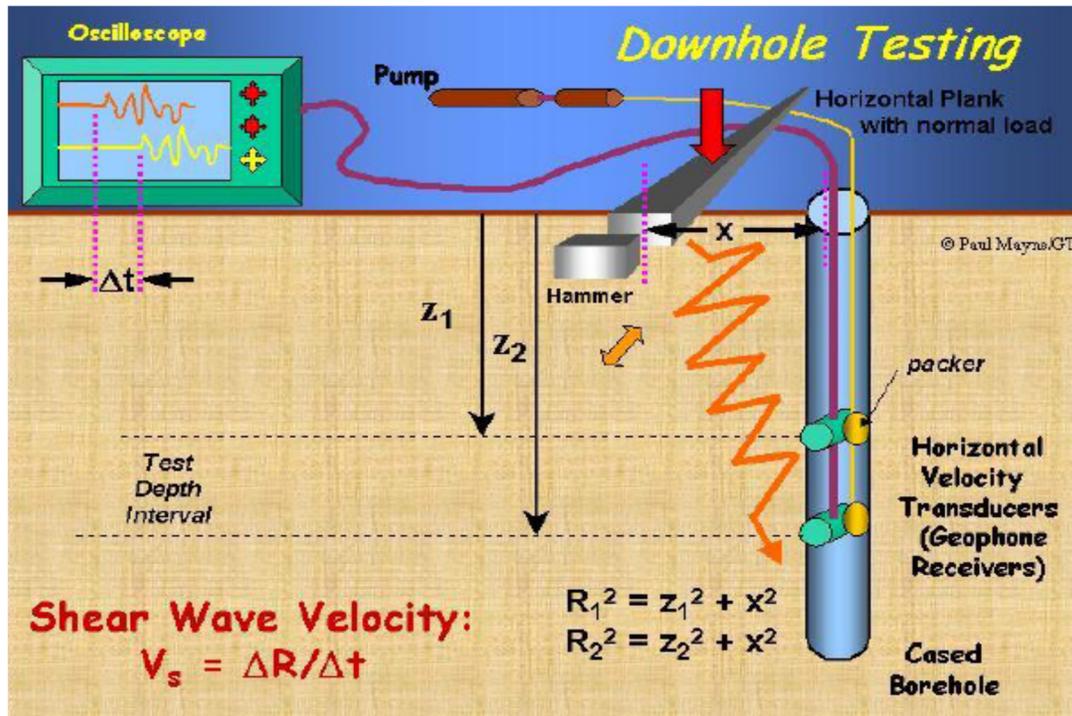


Figura 79. Características de resistividad de diferentes grupos de roca  
Fuente: (Ulloa, 2014). Presentación. Métodos Indirectos de Exploración Geotécnica.

Con las mediciones de conductividad eléctrica se pueden identificar zonas de debilidad a lo largo de las perforaciones, debido a los cambios en la resistividad de los cuerpos litológicos y que se pueden relacionar a cambios a las propiedades de los materiales.

#### 3.3.4. Técnica de inspección de la perforación.

Utilizan tecnología de fibras ópticas integradas en cámaras de video las cuales se introducen en un pozo o sondeo, con diámetros de 70 - 160 mm, identificando de manera visual el tipo de roca, orientación y características de las estructuras, en imágenes de 360° de la pared del pozo.

Este tipo de herramientas de TV pueden registrar las frecuencias, profundidad, apertura de las diferentes estructuras y calidad del macizo en la perforación, es una técnica complementaria a las perforaciones y puede representar ventajas importantes en cuanto para interpretación de los macizos evaluados, las características estratigráficas y anomalías geológicas.

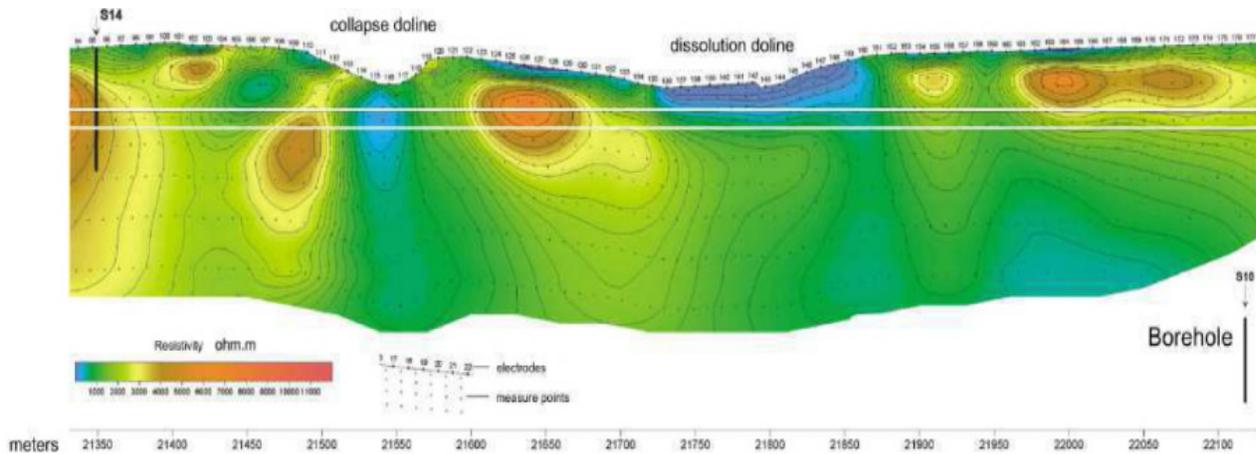


Figura 80. Perfil de tomografía ferrocarril. (ITALFERR y GEOINVEST, 2005)  
Fuente: (Pinillos, 2013). Túnel en macizos calcáreos Karstificados. Pág. 262.

### 3.3.5. Técnicas geofísicas Aéreas.

Las técnicas magnéticas, radiométricas, electromagnéticas y VLF (muy baja frecuencia) electromagnética se pueden realizar a través de equipos aéreos (Helicópteros, avionetas, drones), los cuales viajan en una línea de vuelo establecida. Para todos estos métodos, las fallas y zonas de debilidad en el lecho de roca pueden aparecer como anomalías lineales o curvilíneas, afloramientos rocosos, zonas con sedimentos y vegetación.

La confirmación de las diferentes estructuras se realiza por geólogos en campo y cartografía geofísica, generado un eficiente método para la cartografía de las estructuras regionales que pueden influir en la excavación del túnel.

### 3.3.6. Técnicas de exploración directa.

Para validar los diferentes modelos propuestos en las fases iniciales se deberá realizar la recolección y análisis de los datos directamente en campo, en aspectos como:

- Establecer un programa de exploración de aguas subterráneas.
- Inventario de datos de campo en de puntos de agua, discriminados en manantiales, aljibes, pozos y humedales.
- Planificar y ejecutar una red de monitoreo para validar el modelo conceptual.

Para determinar parámetros hidráulicos como la permeabilidad, transmisividad, porosidad y coeficiente de almacenamiento se han establecido una serie de técnicas de campo y laboratorio,

que cuantifican y establecen valores para las diferentes propiedades evaluadas, y que serán utilizados en el análisis del modelo hidrogeológico, que a continuación se reseñan:

### 3.3.7. Perforaciones.

Para continuar la validación de los modelos propuestos en las fases iniciales, se deberán ejecutar mediciones directas del subsuelo. La ubicación de los puntos de perforación se fundamenta en las características hidrogeológicas evaluadas, constituyéndose en una etapa de comprobación y ajuste de los parámetros evaluados.

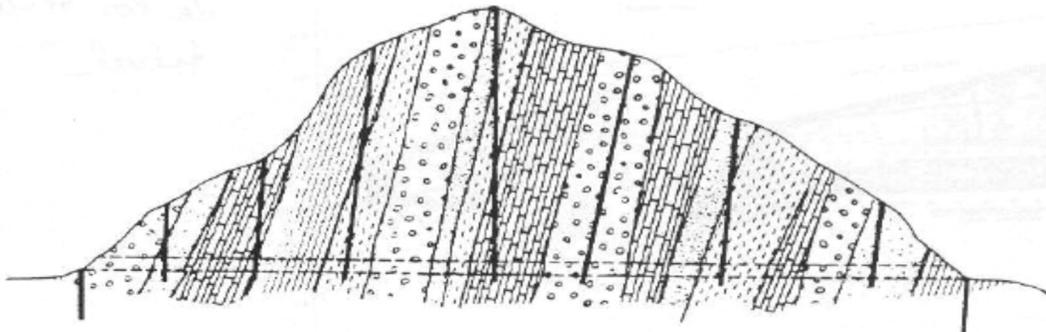


Figura 81. Disposición de sondeos exploratorios poco correcta.  
Fuente: Tunnel Engineering Handbook. (Bickel, Kuesel, & King, 2004, p. 63).

Las Figura 81 y Figura 82, representan la disposición correcta e incorrecta de las perforaciones de acuerdo a la geometría de los macizos evaluados, las cuales deben ejecutarse de forma que los datos y disposición de los estratos sean verídicos y no se tomen datos sesgados.

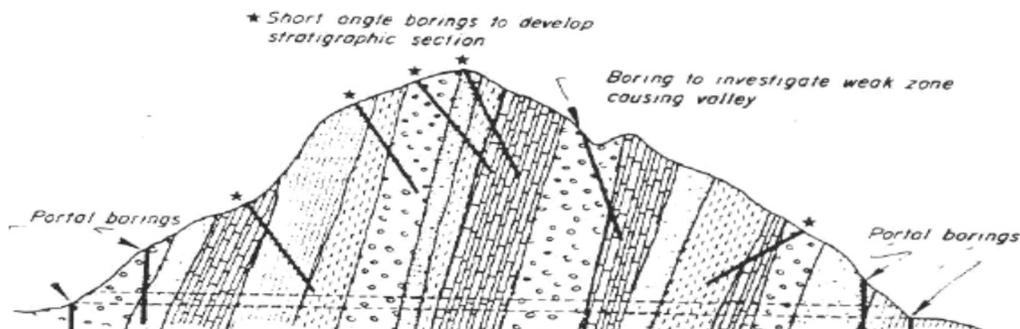


Figura 82. Disposición de sondeos exploratorios correcta.  
Fuente: Tunnel Engineering Handbook. (Bickel, Kuesel, & King, 2004, p. 63).

### 3.3.8. Ensayos de Bombeo.

Este tipo de ensayo evalúa el descenso de los niveles piezométricos después de haber bombeado agua en un pozo o grupo de pozos a un caudal constante. Existen dos tipos de ensayos de bombeo: en régimen permanente y en régimen transitorio.



## Ensayos Lugeon.

Es un test de inyección a presión constante, se ejecuta normalmente en tramos aislados de un sondeo mediante uno o dos obturadores, en periodos de 10 minutos. Se mide la presión y el volumen de agua inyectado.

En los primeros periodos se calibra una presión creciente, mientras que en los dos últimos la presión va decreciendo, la presión máxima durante el ensayo ( $P_{max}$ ) no debe superar la tensión de confinamiento, y se calcula generalmente en función de la profundidad de la zona de ensayo.

Los registros obtenidos de la presión de agua y volumen en cada periodo se usan para determinar el valor de permeabilidad, expresada en unidades *Lugeon*.

El ensayo requiere un manómetro y un contador que permitirá tomar las medidas de presión y caudal a presión constante, se toma la medida del caudal inyectado durante un tiempo de 10 minutos, se comparan los resultados con la expresión en términos de absorción unitaria y definida como la cantidad de agua absorbida en litros por minuto por un metro de sondeo y bajo la presión de un bar.

$$Absorcion\ unitaria = \frac{Q}{ep} \quad (44)$$

Dónde.

- Q= Caudal en litros por minuto.
- He= Altura del tramo en metros (entubado).
- P= Presión en bars.

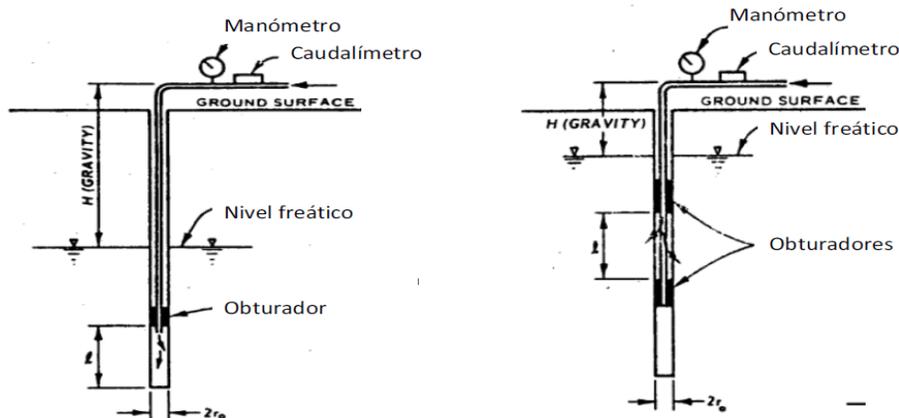


Figura 84. Configuración para ensayos Lugeon con uno (izquierda) y dos obturadores (derecha)  
Fuente: (Rocca & Flores, 2015). Integrating Innovations of Rock Mechanics. Pag 401.

El *Lugeon* es la conductividad hidráulica requerida para inyectar un caudal de 1 Lt/min por metro de intervalo de acuífero, bajo una presión de referencia de 1 MPa (10 Kg/cm<sup>2</sup>), en la Tabla 13 se relaciona el orden de permeabilidad y su grado de clasificación.

Tabla 13. Permeabilidades asociadas a los diferentes valores *Lugeon* y su precisión

Valor <i>Lugeon</i>	Clasificación	K (m/s)	Precisión ( <i>Lugeons</i> )
<1	Muy Bajo	<1e-7	< 1
1 s 5	Bajo	1e-7 – 6e-7	± 0
5 s 15	Moderado	6e-7 – 2e-6	± 1
15 s 50	Medio	2e-6 – 6e-6	± 5
50 s 100	Alto	6e-6 – 1e-5	± 10
>100	Muy alto	>1e-5	>100

Fuente: (Rocca & Flores, 2015). Integrating Innovations of Rock Mechanics. Pag 401.

Evaluación de la permeabilidad para terrenos estratificados.

Las características de la permeabilidad están definidas con el movimiento del agua, las características perpendiculares y transversales del macizo evaluado, se puede evaluar de forma global  $K_v$  de acuerdo a cada uno de los paquetes geológicos encontrados, realizando una evaluación discriminada por cada estrato o unidad geológica. La descarga o flujo de agua a través de una serie de rocas estratificadas por unidad de ancho y normal a la sección, se calcularía como:

$$Q = K_v A \frac{\Delta h}{l_1 + l_2} \quad V = \frac{Q}{A} = K_v \frac{\Delta h}{l_1 + l_2} \quad (45)$$

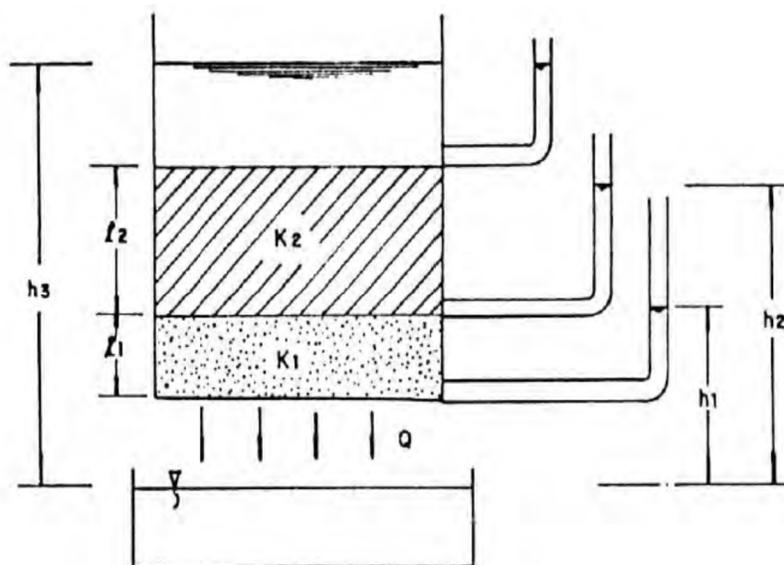


Figura 85. Flujo perpendicular a la estratificación. Fuente: (Velez, 1999). Hidráulica de aguas subterráneas.

### Ensayos con Trazadores.

Consiste en inyectar o adicionar en el fluido un trazador o elemento que es posible seguir desde el punto de entrada hasta la salida del acuífero, midiendo el tiempo y velocidad en diferentes puntos; con estos datos es posible establecer la permeabilidad, porosidad efectiva y otras variables de acuerdo al tipo de prueba.

Esta técnica es común en la ingeniería geológica para la evaluación de caudales y aforos en drenajes superficiales, también en el estudio de filtraciones en presas y túneles. Dentro de los elementos trazadores utilizados se utilizan isotopos radioactivos, colorantes y sales solubles además de sólidos en suspensión que se inyectan en el agua y pueden transitar junto al fluido; sin embargo, están restringidos al tamaño y espaciamiento de las grietas, dentro de los últimos elementos están el salvado de arena, granos de almidón, levaduras, polen coloreado y aserrín.

Presenta inconvenientes debido a disolución rápida de los trazadores en el agua y su difícil detección.

#### 3.3.9. Caracterización hidrogeoquímica.

Las características mineralógicas en el agua reflejan su pasado geológico, por medio de la hidrogeoquímica se determina la calidad del agua en el subsuelo. Con base en análisis fisicoquímicos se refinan los modelos conceptuales establecidos. De acuerdo a (INGEOMINAS, Programa de Exploración de Aguas Subterráneas, 2004), este análisis deberá tener en cuenta:

- Zonas de recarga y descarga.
- Dirección del flujo subterráneo.
- Mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes (aguas superficiales y subterráneas, entre acuíferos).
- Origen del agua subterránea.
- Tiempo de residencia de las aguas subterráneas.
- Identificación de ocurrencias de aguas termales y minerales.

### 3.3.10. Métodos de laboratorio.

La evaluación de la permeabilidad se lleva a cabo por medio de equipos como permeámetro, en el que se toman las muestras de material lo más representativas y en su estado de saturación normal y se evalúa la carga a cabeza constante o variable.



Figura 86. Montaje equipo para medición en cabeza variable.  
Fuente: (ECI. 2017). Laboratorio de Geotecnia.

El ensayo permite la circulación del agua en un medio de roca o suelo evaluado con un nivel o carga de agua constante, el coeficiente de permeabilidad se calcula a partir de la expresión de Darcy como:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (46)$$

$$Q = K A \frac{\Delta h}{l} \quad \longrightarrow \quad Q = \frac{Ql}{A \Delta h} \quad (47)$$

Para valores de permeabilidad  $< 10^{-5}$ cm/s, el permeámetro a carga constante deberá ser reemplazado por un dispositivo a carga variable, que pueda evaluar la fluctuación de carga más alta.

El permeámetro de cabeza variable mide el descenso del volumen de agua durante un tiempo T y luego por integración matemática se evalúa el coeficiente K, el valor de caudal se estima con el cambio del volumen en un tiempo determinado.

$$Q = -a \frac{dh}{dt} \quad \frac{dh}{dt} = \frac{A}{a} \frac{K}{L} \quad (48)$$

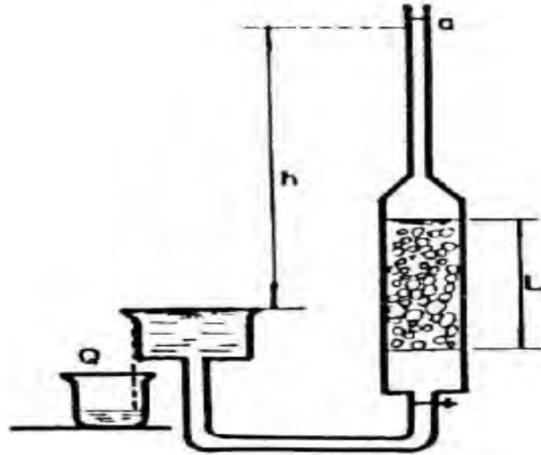


Figura 87. Permeámetro de cabeza variable  
Fuente: (Velez, 1999). Hidráulica de aguas subterráneas.

Se podrán presentar variaciones en los cálculos de la permeabilidad en el terreno y en el laboratorio, debido a:

Perturbación y falta de representatividad de las muestras ensayadas con respecto al macizo, relajación de las fracturas y compactación del material.

El factor de escala podría afectar las muestras, debido a la cantidad de fracturas y su longitud.

### 3.3.11. Técnicas de medición de parámetros geomecánicos durante el avance del túnel.

La medición de los parámetros geotécnicos en las zonas de avance del túnel es una técnica relativamente nueva, los instrumentos se encuentran instalados en el contorno y frente del túnel, proporcionando un registro automático de los parámetros de convergencia y presión hidráulica. Permiten ajustar de manera oportuna y durante la construcción las características de revestimiento y soporte del túnel.

Así mismo, se vienen desarrollando técnicas de prospección e investigación geofísica incorporadas en las maquinas Tuneladoras o las zonas de excavación avance y destroza en túneles convencionales.

Estas técnicas tienen las siguientes características:

- Detección de anomalías o singularidades por delante de la zona de avance del frente, de acuerdo a (Pinillos, 2013) como mínimo longitudes de entre 2 y 5 m, para evitar el riesgo de despresurización súbita en el frente de avance del túnel, como se muestra en la Figura 88.

- No deben generar perturbación ni retrasos en la excavación y construcción del túnel, los datos se deben conseguir y registrar en el menor tiempo posible y evaluarlos de manera ágil y oportuna si se presentan avances rápidos.
- Lograr incorporar los resultados en visualización tridimensionales que permitan valorar con mejor comprensión las anomalías geológicas detectadas.

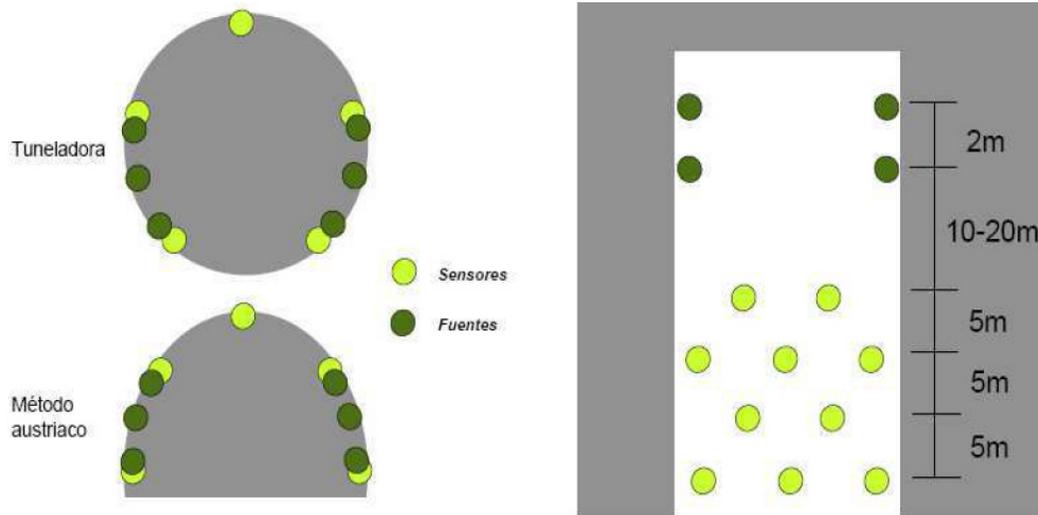


Figura 88. Disposición de sensores y fuentes durante la ejecución de un túnel y en la Tuneladora.  
Fuente: (Pinillos, 2013). Túnel en macizos calcáreos Karstificados. Pág. 263.

Las técnicas actuales registran ondas generadas y captadas por una antena sísmica 3D formada por fuentes y receptores acoplados a las paredes del túnel.

Esta técnica además de evaluar los parámetros geo mecánicos de la excavación, permite determinar las características de los materiales aplicados en la estabilización y manejo del agua en el túnel presentando un comportamiento similar al que se evaluó en el diseño del túnel.

### 3.3.12. Pruebas Hidráulicas en la excavación.

Paralelamente al avance de los trabajos subterráneos se podrán realizar pruebas de presión hidráulica, de acuerdo al tipo de terreno y características hidrogeológicas se establece las características del sondeo.

Durante este tipo de pruebas se define la magnitud de la conductividad hidráulica por medio de los registros de caudal inyectado al macizo, un esquema típico de esta prueba se muestra en la Figura 89.

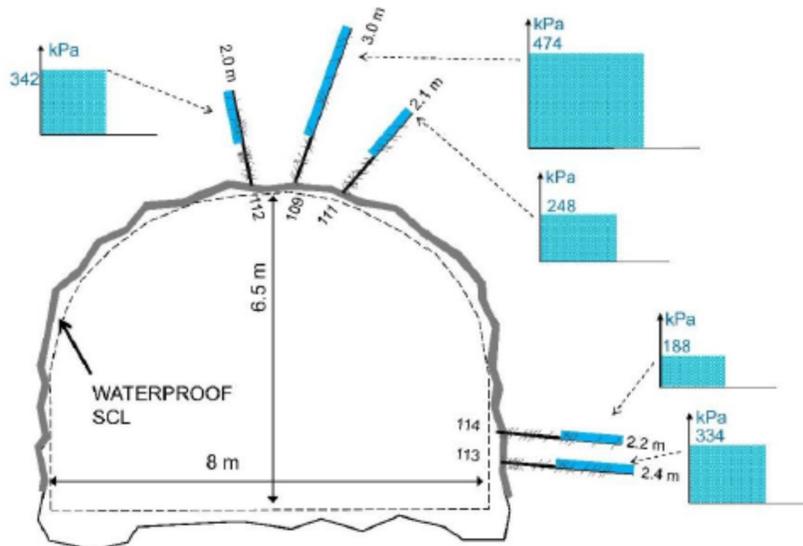


Figura 89. Valores reportados de pruebas Hidráulicas Túnel Forsmark.  
 Fuente: (Gunnar, 2015, p. 43). Properties of waterproof sprayed concrete túnel linings, pag 40.

Ensayos a sondeo único.

Durante esta prueba se introduce un dispositivo Packer en una perforación dentro del túnel, se cierra el sistema y se estabiliza la presión hidráulica, luego se abre la válvula del dispositivo y se determinan los valores de caudal de despresurización e infiltración de la formación rocosa, con lo cual se determinan los valores de permeabilidad de las zonas adyacentes a la excavación.

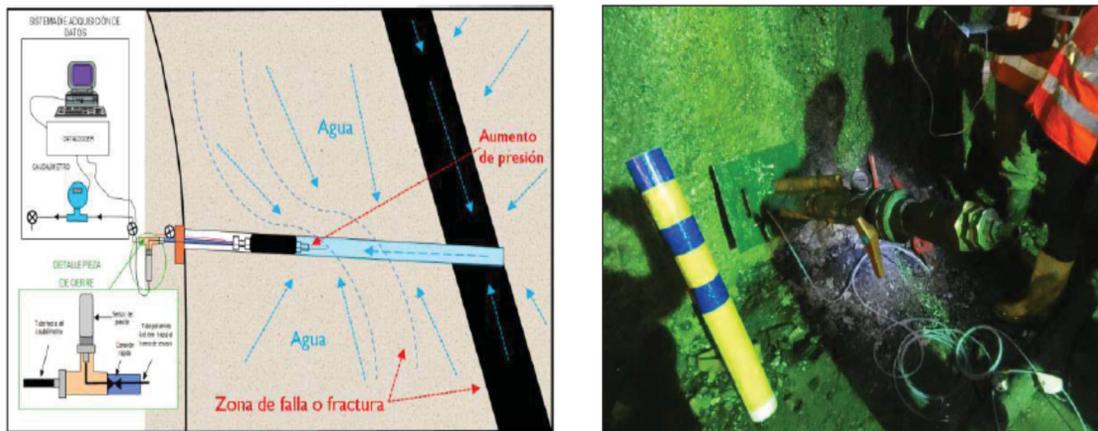


Figura 90. Ensayo a sondeo Único  
 Fuente: (Suescun, 2016). Modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subterráneas.

Ensayos de interferencia.

Utiliza el mismo principio del ensayo a sondeo único y se complementa para dos puntos de medición, los cuales se utilizan para determinar los valores de caudal de infiltración,

conductividad Hidráulica de la Roca (K) y coeficiente de Almacenamiento (S), al tener un segundo punto de verificación de valores registrados en el túnel, como se presenta en la Figura 91.

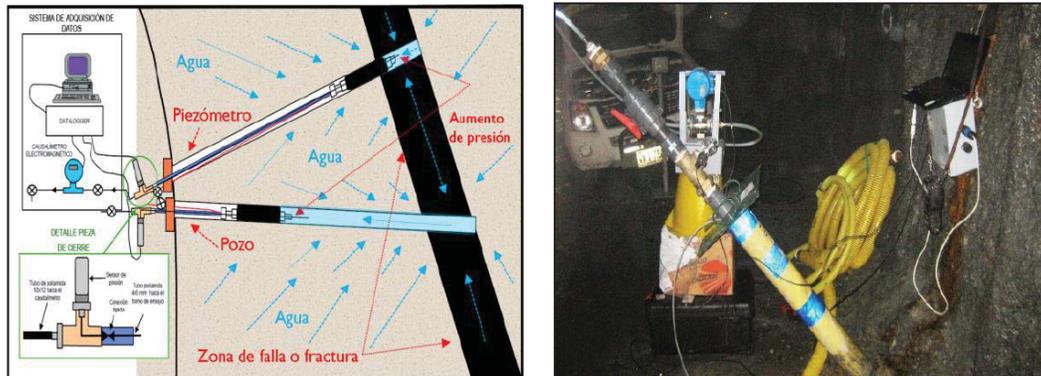


Figura 91. Ensayo de interferencia.

Fuente: (Suescun, 2016). Modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subterráneas.

Se ajustan bien en formaciones acuíferas permeables, mayor a  $1e^{-6}$ m/seg, durante el procedimiento se abre la válvula y bombea agua desde el pozo generando un descenso y abatimiento del nivel piezométrico del acuífero, de acuerdo al tipo de régimen del sistema.

#### Ensayos de extracción finita o de bombeo con caudal constante.

En este ensayo se evalúa la capacidad de permeabilidad del sistema acuífero, durante la prueba se bombea el agua inyectada en los sondeos, hasta provocar un descenso del nivel piezométrico con un caudal constante durante un tiempo definido. Luego, se deja recuperar el nivel hasta su posición inicial.

Se ajusta en formaciones acuíferas de media y alta permeabilidad, los resultados en el sondeo podrán correlacionarse con otras zonas del proyecto de acuerdo al tiempo y propiedades hidráulicas del sistema acuífero.

#### Ensayo de Slug o cuchareo.

En esta metodología se bombea un caudal determinado de agua en un periodo establecido, lo que va causar un abatimiento del nivel piezométrico, hasta que la unidad acuífera recupere su nivel inicial con la presión atmosférica, se utilizan para estimar las propiedades hidráulicas de media a baja permeabilidad, de acuerdo a (Suescun, 2016).



Figura 92. Ensayo Slug o Cuchareo.

Fuente: (Suescun, 2016). Modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subterráneas

### Ensayo de Pulso.

Utiliza un procedimiento similar que las pruebas Slug, variando en la recuperación del nivel piezométrico bajo la presión del sistema acuífero. Es una metodología difícil de realizar ya que se utilizan volúmenes mínimos de agua, si se presentan singularidades del sistema acuífero y se presentan recargas en otros puntos del sistema durante el ensayo, pueden caracterizar formaciones acuíferas de baja o muy baja permeabilidad.

## Capítulo IV. Análisis del flujo de agua subterránea.

En las obras de tunelería se requiere que durante los trabajos de diseño y planificación se estimen las cantidades de agua que podría irrumpir en la obra, para establecer las consideraciones constructivas, seguridad, tiempo y costos del proyecto.

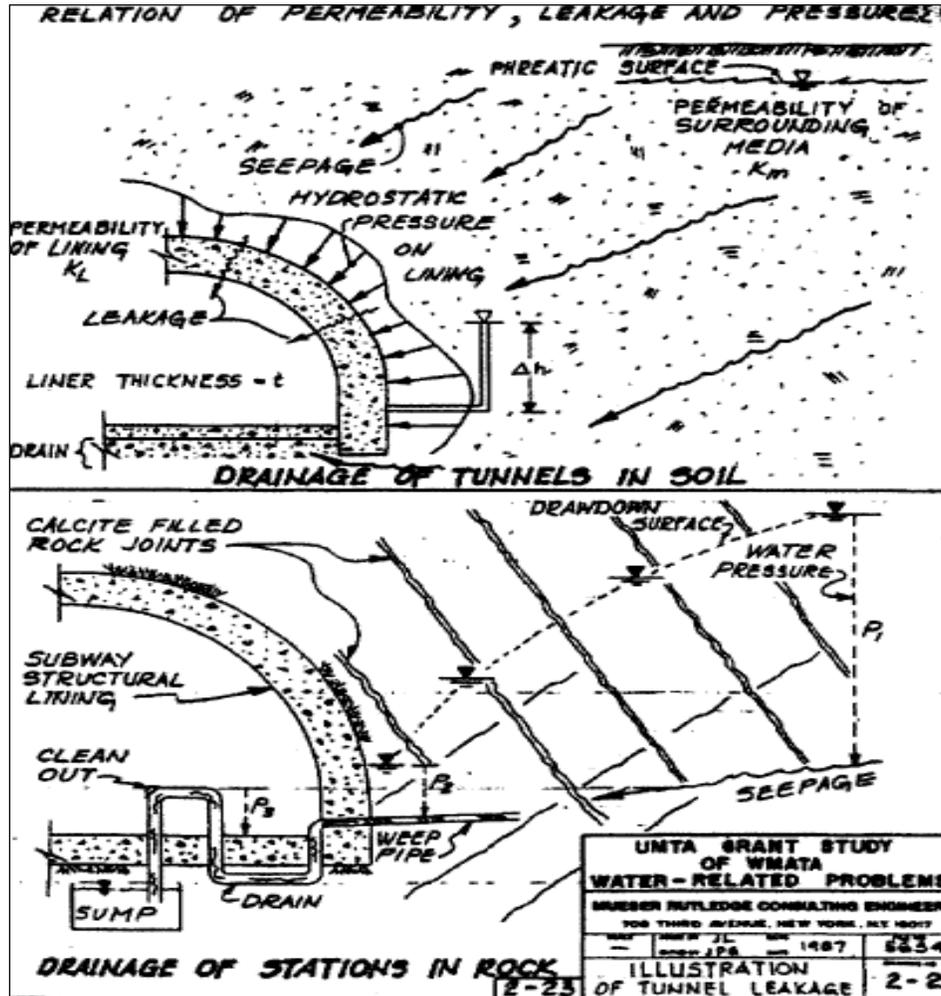


Figura 93. Relación entre los tipos de terreno, fugas, presión de aguas subterráneas  
Fuentes: (Nazarchuk, 2005). Water intrusion in underground Structures, pag 38.

Las expresiones matemáticas que predicen el flujo de agua en un túnel se fundamentan en la ley de Darcy y la conservación de la energía, en la que se realiza un balance entre las entradas del sistema acuífero (recargas), la capacidad de almacenamiento de la unidad geológica y las salidas como irrupciones de agua el cuerpo del túnel.

Dichas expresiones se basan en los parámetros hidráulicos de los materiales que componen la unidad geológica y las características constructivas como: la geometría de la excavación y tiempo de avance de la obra.

Sin embargo, se presentan interrogantes sobre los parámetros asignados a las expresiones, debido a los cambios hidrogelógicos y las características del fluido con la profundidad.

Existen aproximaciones analíticas para definir cuantitativamente la filtración de agua al interior del túnel, las primeras consideran un flujo estacionario y otras expresiones se definen para un régimen transitorio.

#### 4.1. Estado Constante - estacionario.

Este régimen se establece cuando el flujo y la presión hidráulica permanecen constantes a lo largo de la obra subterránea, en un tiempo determinado, debido a que las recargas del sistema acuífero son infinitas aun cuando se presente irrupción del agua hacia la obra.

Es decir que, en términos del balance hidráulico, la cantidad de agua que sale por infiltración del túnel, descargas y almacenamiento del sistema serán las mismas que las que entran por la recarga del sistema, escenario que se representa en la Figura 94.

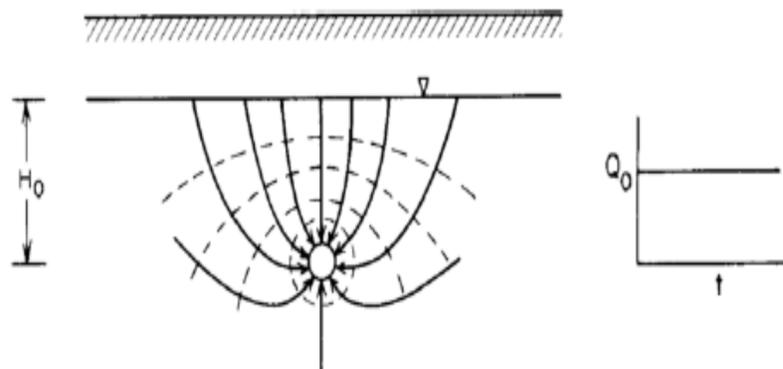


Figura 94. Régimen estacionario de un túnel  
Fuentes: (Freeze & Cheery, 1979). Groundwater. Pag 488.

Este modelo establece una recarga continua e infinita que infiltra a través del contorno de la obra y asume un medio homogéneo en todas las direcciones. Las soluciones se basan en pozos verticales de extracción de agua subterránea, como se representa en la Figura 95.

En este escenario ocurre un flujo radial hacia la periferia de la zona de bombeo o extracción, asume un sistema infinito, homogéneo y que se extiende hasta el fondo de la zona conductora.

Se generan caídas del nivel piezométrico debido al bombeo o salida del agua en la zona del bombeo.

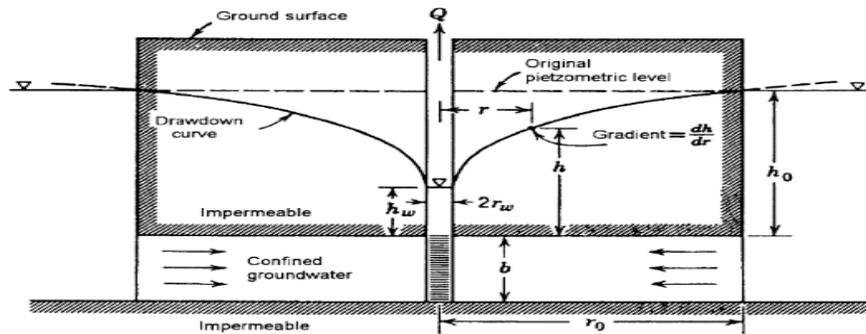


Figura 95. Flujo constante para un acuífero confinado en la pared de un pozo  
Fuentes: (Posiva, 2001). Leakage and groutability.

El cálculo del flujo de agua en el pozo se puede estimar como:

$$Q = 2. \pi. K. b \frac{h - h_w}{\ln\left(\frac{r}{r_w}\right)} \quad (49)$$

Donde,

- b= Espesor de la zona de fractura / capa de agua subterránea confinada.
- K= Conductividad hidráulica del acuífero.
- r= Radio del pozo, distancia desde el centro hasta la zona de abatimiento.
- rw= Radio de influencia supuesto del flujo.
- hw= Cabeza de agua en la base del pozo.
- h= Distancia vertical hasta la zona de abatimiento desde la base del pozo.

#### 4.1.1. Método de Goodman.

Goodman (1965) estableció un modelo para un régimen estacionario en una excavación subterránea, con una recarga ilimitada en un medio homogéneo, las consideraciones para estimar la cantidad de agua que irrumpe en la obra se representan en la Figura 96 y se fundamenta en:

- La excavación subterránea es infinitamente larga.
- El túnel se excava completamente en la zona de saturada.
- El nivel piezométrico no desciende en ningún momento cerca de la periferia del túnel.
- La recarga de agua en el túnel no se agota, es continua, debido a un depósito infinito, como suceden en un lago o río.

- El radio del túnel,  $r$ , es mucho menor que la profundidad del túnel debajo del nivel freático ( $H_0 + h_a$ ), se considera que la recarga se encuentra en una proyección sobre el eje del túnel.

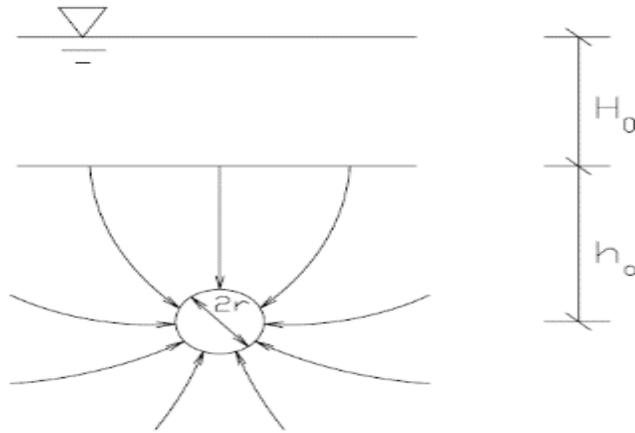


Figura 96. Diagrama de Goodman – régimen constante  
Fuente: (Chen, 2010). Groundwater Inflow Into Rock Tunnels. Pág. 108.

- El flujo de agua se presenta en un modelo semi-infinito.
- El suelo o la roca es homogéneo e isotrópico y su permeabilidad puede ser tratada como uniforme.
- La cabeza ( $H_0$ ) debe ser al menos tan alta como la base de este depósito ( $z$ ) por encima del túnel.
- La conductividad hidráulica ( $K$ ) del terreno entre el túnel y la recarga en superficie es el Factor que limita la velocidad y suministro de agua drenado en el túnel.
- El flujo no es turbulento y el macizo presenta características homogéneas e isotrópicas, tal como un Arena o lodo sin fracturas.

La solución considera un acuífero confinado de un espesor unitario, horizontalmente infinito, donde  $Q$  es el caudal en la obra, como una tasa de flujo radial.

$$Q_L = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot H_0}{\ln\left(\frac{2z}{r}\right)} \quad (50)$$

Donde,

- $H_0$ . Cabeza de agua sobre el nivel del túnel.
- $Z$  Distancia desde el túnel hasta el fondo del punto de recarga.
- $r$  Radio del túnel.
- $K$  Conductividad hidráulica del terreno.

El flujo de entrada es estacionario porque el lago o cuerpo de agua superficial actúa como un límite de recarga infinito, lo que hace que el cono de depresión no se expanda.

#### 4.1.2. Método de Heuer.

Heuer (1995) propuso una metodología semi-empírica para cuantificar la cantidad de agua que podría irrumpir en un túnel, ajustando la expresión desarrollada por el método clásico de Goodman, el cual se presenta un factor de reducción de  $(1/8)$  a los valores obtenidos con las expresiones clásicas.

La metodología evalúa variables como: el agotamiento de la capacidad de almacenamiento, las características de flujo en el sistema fracturado y las condiciones de frontera del acuífero.

Esta metodología define los porcentajes en la longitud del túnel donde se presenta irrupción de agua bajo un régimen estacionario a largo plazo, es un método ampliamente utilizado en la ingeniería de túneles.

Se deberá elaborar un histograma de pruebas de conductividad hidráulica en el macizo, como se representa en la Figura 97, si el túnel se excava en una litología uniforme se grafica un histograma, en caso de variaciones o cambios geológicos drásticos se deberán elaborar histogramas por cada una de las unidades de rocas excavadas.

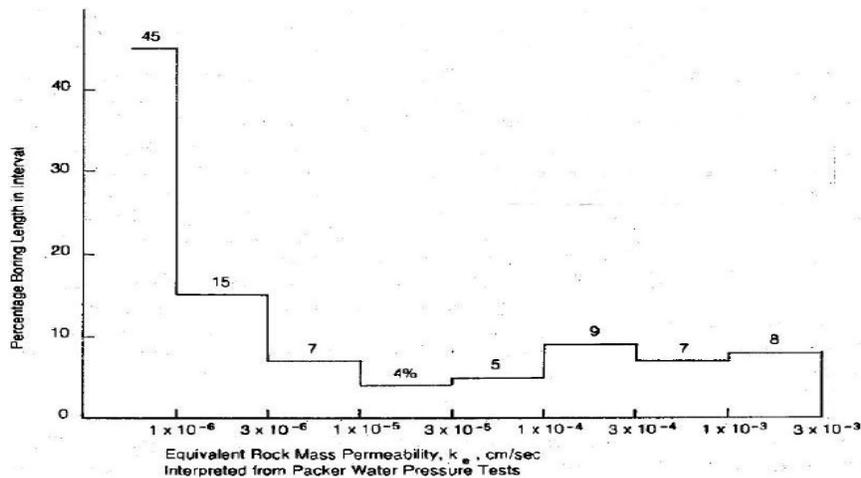


Figura 97. Histograma hipotético de pruebas de perforación exploratoria en un túnel. Heuer, 1995. Fuente: (Chen, 2010). Groundwater Inflow Into Rock Tunnels. Pág. 122.

Los cálculos del flujo se llevan a cabo utilizando el formato tabular, como el que se presenta en la Figura 98, las entradas calculadas por este método no consideran flujos discretos de zonas de fallas.

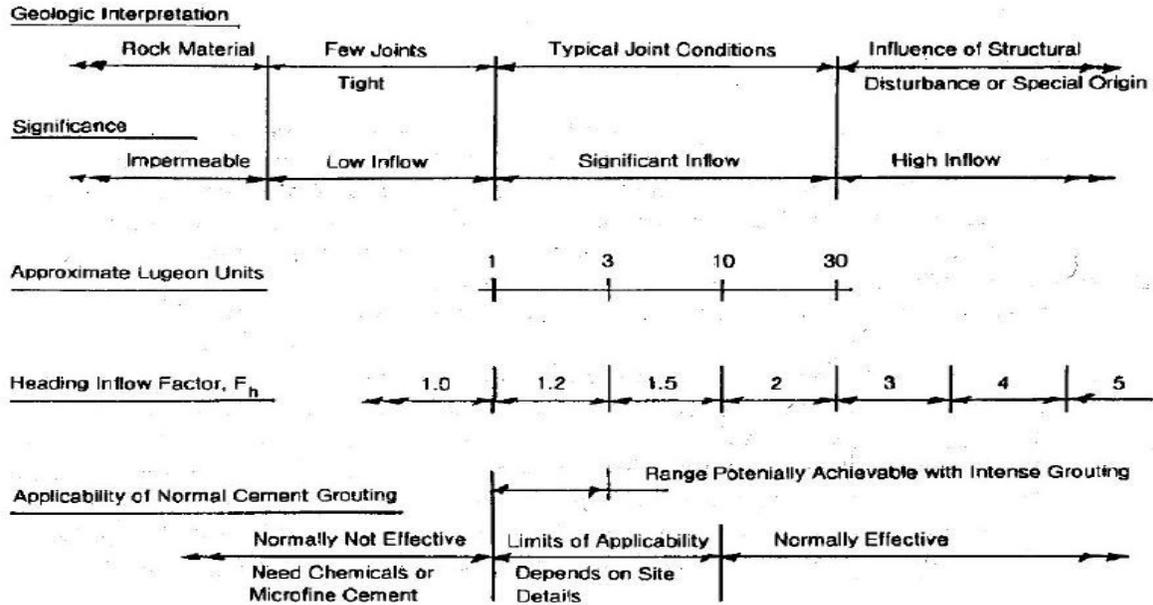


Figura 98. Interpretación del peso de las diferentes variables bajo esta metodología.  
Fuente: (Chen, 2010). Groundwater Inflow Into Rock Tunnels. Pág. 123.

El método se basa en parámetros desarrollados por la experiencia de Heuer en diferentes proyectos de tunelería y deben evaluarse con cuidado para muchos proyectos que la apliquen.

#### 4.1.3. Método de Lei.

Lei en 1999, desarrolló una expresión analítica en función de la cabeza hidráulica y la tasa de flujo de agua subterránea, a partir de un análisis bidimensional, para un túnel horizontal; el cual considera un medio completamente saturado, homogéneo, isotrópico, semi-infinito y una condición de cabeza hidráulica constante en el perímetro de la excavación.

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot h}{\ln \left( \frac{h}{r} + \sqrt{\left( \frac{h}{r} \right)^2 - 1} \right)} \quad (51)$$

Donde:

- Q Es el flujo de agua subterránea.
- h Es la cabeza de agua sobre el túnel.
- K Es la permeabilidad del macizo
- r Es el radio promedio del túnel.

Esta metodología propone un marco idealizado que en muchos proyectos difiere, debido a la complejidad natural que este modelo simula de una manera poco ajustada.

#### 4.1.4. Método El Tani.

En esta metodología se evalúa un flujo constante en un túnel circular con un sistema acuífero totalmente saturado, bajo un régimen estacionario, una condición hidrostática semi-infinita, homogénea e isotrópica y con una solución exacta.

Considera un fluido totalmente incompresible, la cabeza total en la superficie del terreno y que el perímetro de la excavación permanece constante.

$$Q = 2. \pi. K. h \left( \frac{1 - 3 \left( \frac{r}{2h} \right)^2}{\left[ 1 - \left( \frac{r}{2h} \right)^2 \right] \ln \frac{2h}{r} - \left( \frac{r}{2h} \right)^2} \right) \quad (52)$$

Donde,

- Q Es el flujo de agua subterránea.
- h Es la altura de agua por encima del túnel.
- K Es la permeabilidad equivalente.
- r Es el radio del túnel.

Los valores de infiltración superior a la conductividad hidráulica indican anomalía e inestabilidad en el sistema acuífero.

#### 4.2. Régimen transitorio.

Los modelos evalúan la primera fase de un flujo radial variable, establecido por la solución asintótica de prueba de cabeza total constante de Jacob y Lohman (1952), en la cual se propone un sistema acuífero ideal, infinito, confinado e isotrópico. El flujo se genera desde un medio infinito hasta la pared del túnel.

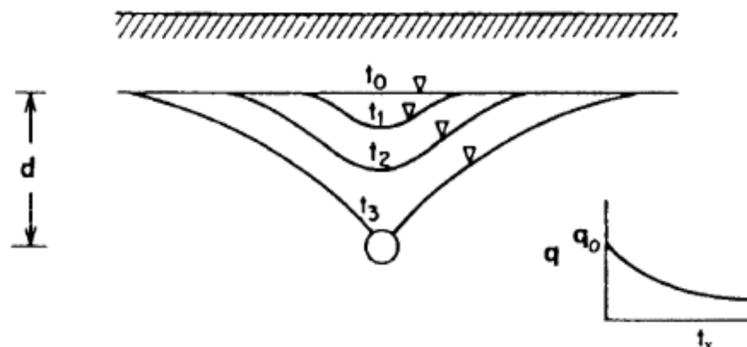


Figura 99. Estado Transitorio, cambios en el nivel de agua con el tiempo  
Fuente: (Posiva, 2001). Leakage and groutability, pag 24.

Como se representa en la Figura 99, este régimen considera las variaciones de la cabeza hidráulica en el tiempo debido a periodos de estiaje y cambios en la red superficial de recarga, además de las variaciones de la altura piezométrica con el avance de la obra y el tiempo de excavación.

#### 4.2.1. Solución de Jacob y Lohman (1952).

Jacob y Lohman presentaron su teoría matemática para la irrupción del agua subterránea, que se basa en la solución de L. P. Smith (1937) para la conducción del calor, la cual considera que:

- El acuífero es infinito y confinado, con un espesor uniforme.
- La transmisibilidad y compresibilidad permanecen constantes.
- La cabeza total inicial es uniforme en todo el acuífero.
- Para un tiempo cero, la cabeza total en la pared del pozo cae instantáneamente a algún valor constante inferior.

Para el desarrollo de la expresión analítica se utilizaron las funciones de Green y transformaciones integrales del problema de conducción de calor, con las cuales se obtuvo la siguiente expresión.

$$Q = 2\pi T_{sw} G(\alpha). \quad (53)$$

Donde Q es la descarga del pozo o pared del túnel.

$$\alpha = \frac{T_t}{Sr_w^2} \quad (54)$$

El valor de la función G ( $\alpha$ ) está dado por la siguiente expresión.

$$G(\alpha) = \frac{4\alpha}{\pi} \int_0^\infty x e^{-\alpha^2 x^2} \left\{ \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left[ \frac{Y_0(x)}{J_0(x)} \right] \right\} dx \quad (55)$$

En la cual  $J_0(x)$  y  $Y_0(x)$  son variables de la función de Bessel de cero, primer y segundo orden respectivamente; sin embargo, no se puede operar por medios de integración ordinarios, por esto Jacob y Lohman (1952) recurrieron a métodos numéricos, reemplazando la Integral por una suma, y compararon los resultados con otras soluciones asintóticas, y desarrollaron la expresión para evaluar la descarga.

$$Q = \frac{4\pi T_{sw}}{2.3 \text{ Log} \left( \frac{2.25 T_t}{Sr_w^2} \right)} \quad (56)$$

Donde:

- Q Descarga total en la pared del pozo.  
T Transmisibilidad del acuífero  $L^2T^{-1}$ ,  $T=Kb$

Sw	Zona de extracción de la superficie freática en el pozo, L.
tt	Tiempo.
r <sub>w</sub>	Radio del pozo.

#### 4.2.2. Solución de Perrochet para túneles o pozos de descarga.

Perrochet (2005a), estableció una expresión para calcular la descarga de agua en un régimen transitorio en un túnel, la cual considera:

- Aplicación de las hipótesis de Jacob y Lohman (1952).
- Se plantea la reducción del nivel de agua, que desaparecerá en un límite sin ningún tipo de flujo, en una distancia que depende del tiempo  $r = R(t)$ .
- La ampliación de la zona de reducción puede ser homologada como etapas sucesivas en estado estacionario ( $r, t$ ), en una distancia  $R(t)$ .

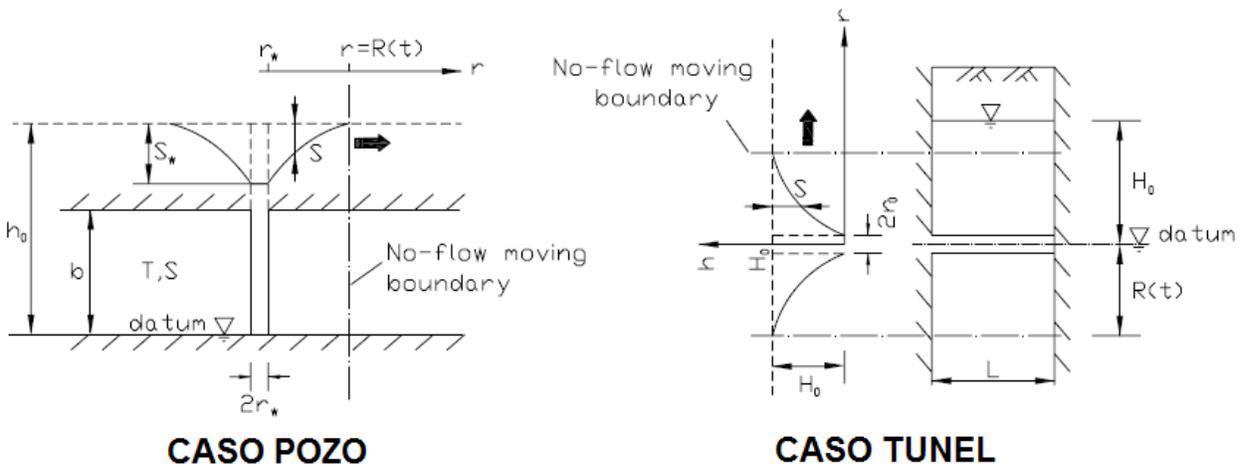


Figura 100. Esquema de flujo descarga constante.  
Fuente: (Chen, 2010). Groundwater Inflow Into Rock Tunnels. Pág. 94

En la Figura 100, se representan las teorías desarrolladas por Perrochet (2005a), que comparó las expresiones de flujo de agua en casos de pozos de bombeo y túneles, de acuerdo a las hipótesis de Jacob y Lohman (1952) para diferentes dimensiones y tiempos.

Se encontró que para  $Q/2\pi TS_0$  o  $G(\alpha)$  se presenta un rango máximo de  $10^1 < \alpha < 10^2$ , que podría ajustar el tiempo para predecir las tasas de descarga transitoria en un pozo o túnel bajo condiciones de reducción constante.

$$Q = 2\pi T_{Sw} G(\alpha). \quad (57)$$

La expresión desarrollada por Perrochet  $G(\alpha)$ .

$$G(\alpha) = \frac{1}{\ln(1 + \sqrt{\pi\alpha})} \quad y \quad \alpha = \frac{T_t}{Sro^2} \quad (58)$$

La expresión incorpora una función logarítmica, puede utilizarse con más práctica en herramientas de cálculo para predecir las tasas de descarga transitoria y el límite de flujo a una distancia R (t) del pozo o el túnel, cuando R (t) >> r0.

El tiempo requerido para alcanzar el límite más cercano en R máximo, se puede evaluar como:

$$t = \frac{Sro^2}{\pi T} \left( \frac{R_{max}}{ro\sqrt{e}} - 1 \right)^2 \cong \frac{SR_{max}^2}{\pi e T} \quad (59)$$

En largos periodos, la expresión no podrá utilizarse ya que los supuestos para su desarrollo no son válidos. Las tasas de descarga deberán desarrollarse por otro tipo de metodologías.

Además, Perrochet (2005) combina diferentes ecuaciones para evaluar los modelos de flujo transitorio, con la velocidad de descarga en función de la tasa excavación media (v) para un acuífero infinito y homogéneo, escenario que se representa en la Figura 101:

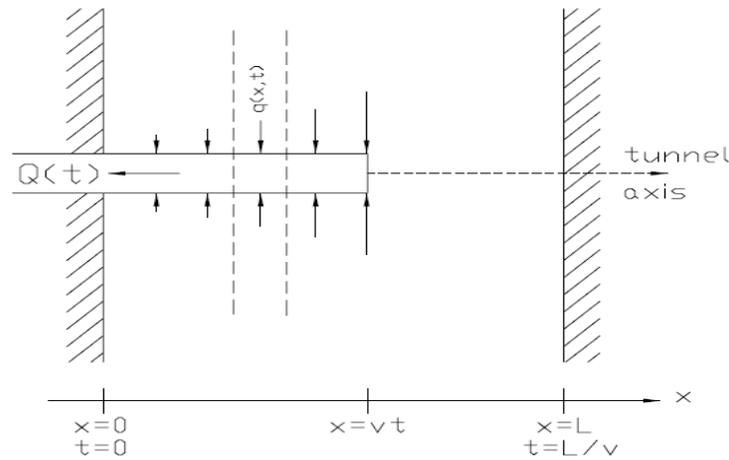


Figura 101. Esquema de la descarga específica para una excavación progresiva. Fuente: (Chen, 2010). Groundwater Inflow Into Rock Tunnels. Pág. 100

Para un flujo radial perfectamente simétrico, este se mantendrá en el sistema acuífero sin ningún tipo de perturbación en el túnel, con una descarga en función de la tasa de avance de la obra, x < vt, a lo largo del eje del túnel, y el cual puede expresarse a partir de la siguiente expresión:

$$q(x, t) = \frac{2\pi K S_t}{\ln \left( 1 + \sqrt{\frac{\pi K}{Sro^2}} \left( t - \frac{x}{v} \right) \right)}, \quad t - \frac{x}{v} > 0 \quad (60)$$

Ecuación desarrollada por Perrochet que considera un aumento gradual del flujo desde el inicio de la excavación ( $x = 0$ ), en terrenos de diversos grados de permeabilidad, hasta la proximidad del frente de perforación ( $x = vt$ ), si  $x$  se aproxima a  $vt$  cerca de la cara del túnel el caudal,  $q(x, t)$ , se aproxima al infinito.

Este método se ajusta bien cuando se presenta una tasa de excavación constante y en litologías con valores de permeabilidad altas, la cual se expresa como:

$$Q(t) = \int_0^{vt} \frac{2\pi K S_t \cdot H(L-x)}{\ln\left(1 + \sqrt{\frac{\pi K}{S r o^2}} \left(t - \frac{x}{v}\right)\right)} dx \quad (61)$$

Donde,

H Función de escalón de Heaviside  $H(L-x)$ .

Dicha función de escalón de Heaviside  $H(L-x)$ , tiene en cuenta el tamaño infinito de la zona permeable, así mismo, la infiltración es nula en la cara del túnel.

Los valores de descarga de agua se encuentran en función de la longitud excavada del túnel, para los diferentes tramos evaluados.

Además, se podrá estimar el tiempo requerido para la descarga, de acuerdo con los parámetros hidráulicos de los materiales, como:

$$t = \frac{1}{\pi e} \frac{S R_{max}^2}{K} \quad (62)$$

Para el análisis se deberán prever los cambios en la conductividad de la roca en longitud excavada, y los efectos de frontera a una distancia  $R$  del eje del túnel.

Perrochet y Dematteis en 2007 combinaron enfoques, emplearon el principio de superposición y ampliaron el análisis a túneles perforados en diferentes estratos de roca.

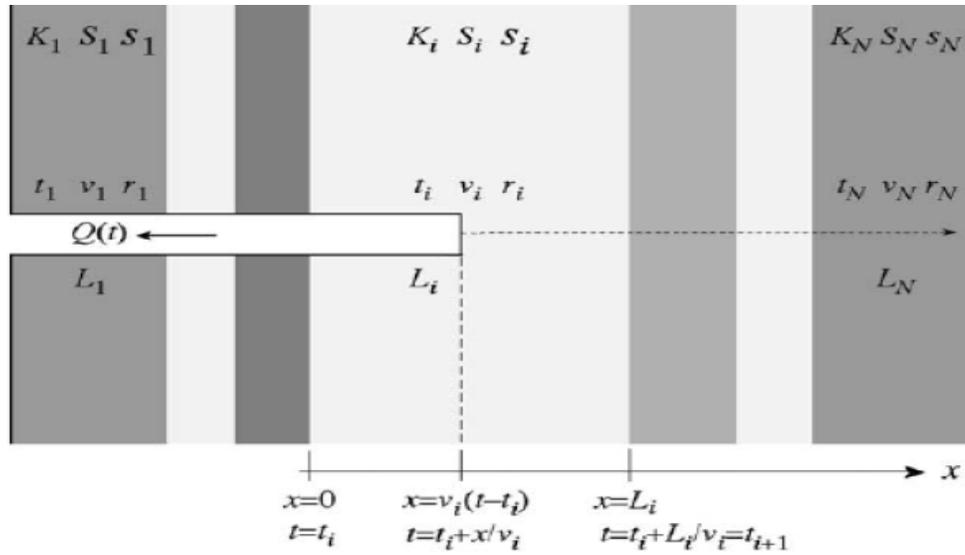


Figura 102. Túnel siendo excavado en diferentes litologías, Perrochet y Dematteis, 2007  
Fuente: (Chen, 2010). Groundwater Inflow Into Rock Tunnels. Pág. 100.

Para N sectores consecutivos, como se esquematiza en la Figura 102, con parámetros hidráulicos variables se podrá estimar un valor de descarga en cada sector, la tasa de flujo que sale de la excavación se podrá calcular como la sumatoria de las descargas de flujo de agua por cada tramo.

De acuerdo con (Chen, 2010), después de cuatro quintas partes del tiempo de excavación las tasas de descarga empiezan a superar los valores predichos con el método clásico de Jacob, cuando la excavación se completa, los valores mayores son de aproximadamente 1/3 en cortos avances, es decir con metodología de Jacob se podrían subestimar los valores de flujo predichos en la obra.

Los resultados generados por las expresiones clásicas contrastan con una tasa de flujo nula, mientras que la solución de excavación progresiva estima valores que aumentan rápidamente dependiendo de la tasa de penetración en la roca.

La expresión desarrollada por Perrochet y Dematteis en 2007 se presenta como:

$$Q(\alpha) = 2. \pi \sum_{l=1}^N H(t - t_i) x \int_0^{vt} \frac{KS_l \cdot H(L - x)}{\ln \left( 1 + \sqrt{\frac{\pi K}{S_l r o^2}} \left( t - t_i - \frac{x}{v} \right) \right)} dx \quad (63)$$

Donde,

$$t_i = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{L_j}{v_j} \quad t_1=0, \text{ y } t_{N+1} = \text{Es el tiempo total de la excavación.}$$

Q (t) =	Es el flujo acumulado por unidad de longitud del túnel en el tiempo de excavación.
K =	Conductividad hidráulica del macizo. L/T.
r =	Radio de la excavación L.
Ho =	Cabeza de agua subterránea inicial sobre el eje central del túnel. L.
Si =	Rendimiento específico. (L <sup>-1</sup> ).
t =	Tiempo de excavación. T.
V=	Tasa de excavación. L/T.

#### 4.2.3. Solución Renard (2005), para un túnel infinito en un acuífero confinado ideal

Renard (2005) estableció la expresión para el caso de una disminución constante de la cabeza hidráulica del túnel, bajo un límite total infinito, en un sistema acuífero confinado ideal. Aplicando la expresión de Laplace a la solución de la descarga en el túnel, el autor combina dos etapas: flujo transitorio de fase temprana y final de flujo en estado estacionario proponiendo una solución aproximada como promedio ponderado de las dos asíntotas más un término de corrección, de acuerdo con la expresión:

$$\frac{Q(t)}{2\pi T s_w} \cong \frac{A}{\ln\left(1 + \sqrt{\frac{\pi T t}{r_w^2 S}}\right)} + \frac{B}{\ln\left(\frac{2R}{r_w} - 1\right)} + C$$

$$A = \frac{2}{\pi} \arctan\left[\frac{(2R/r_w - 2)^2}{\pi T t / (r_w^2 S)}\right]$$

$$B = \frac{2}{\pi} \arctan\left[\frac{\pi T t / (r_w^2 S)}{(2R/r_w - 2)^2}\right]$$

$$C = \frac{AB}{2} \frac{\ln\left[(2R/r_w - 1)(\sqrt{2R/r_w} - \sqrt{2} + 1)\right]}{[\ln(2R/r_w - 1)]^2 \ln(\sqrt{2R/r_w} - \sqrt{2} + 1)},$$
(64)

R [L] representa la distancia más corta entre el eje del pozo / túnel y el límite de la cabeza total constante. Para la fase temprana, y / o para una gran distancia hasta el límite,  $A \rightarrow 1$ ,  $B \rightarrow 0$ ,  $C \rightarrow 0$ .

$$\frac{Q(t)}{2\pi T s_w} = \frac{1}{\ln\left(1 + \sqrt{\frac{T t \pi}{r_w^2 S}}\right)}$$
(65)

La expresión anterior representa la solución aproximada de Jacob y Lohman (1952) obtenida por Perrochet (2005a) para la etapa tardía, y / o pequeña distancia hasta el límite,  $A \rightarrow 0$ ,  $B \rightarrow 1$ ,  $C \rightarrow 0$ , corresponde a la solución aproximada de Goodman (1965); se presenta a continuación:

$$\frac{Q(t)}{2\pi T S_w} = \frac{1}{\ln\left(\frac{2R}{r_w} - 1\right)} \quad (66)$$

C, es un término de corrección para el tiempo de transición a medio plazo, de acuerdo con análisis de Renard, el error relativo entre la solución exacta y la descarga aproximada es  $< 2\%$  durante todo el periodo de tiempo.

#### 4.2.4. Kawechi y Low (2000).

Como se representa en la Figura 103, Low analizó el declive de la cabeza total cuando la presión del túnel llegue al nivel piezométrico, lo que denominó flujo radial temprano. Bajo esta suposición estimó la descarga del nivel de agua y caudal en la entrada del túnel, suponiendo un patrón de flujo lineal horizontal y vertical hacia el túnel.

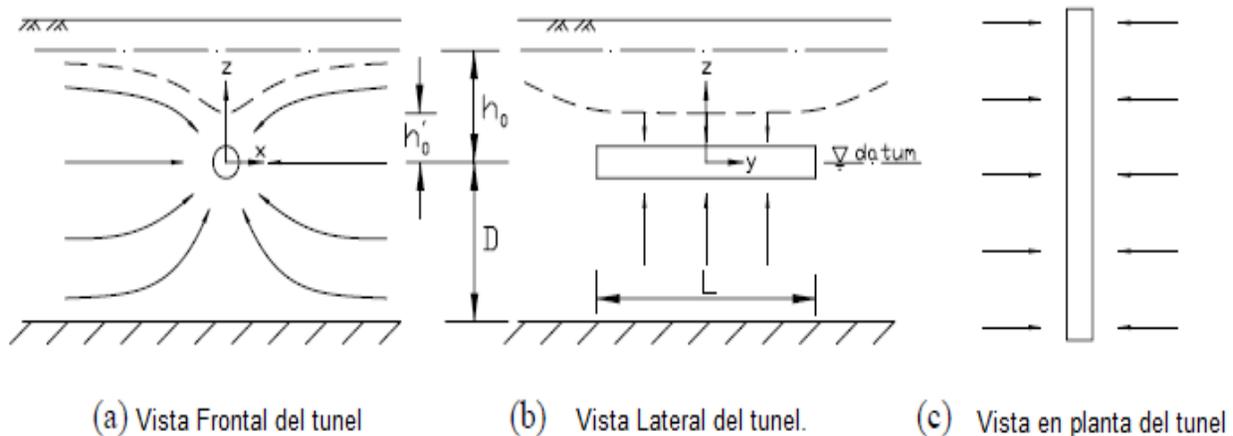


Figura 103. Modelo Kawecky, flujo lineal temprano.  
Fuente: (Chen, 2010). Groundwater Inflow Into Rock Tunnels. Pag 105.

A partir de esta suposición Kawecky (2000) desarrolló unas expresiones que se basan en el flujo de agua en pozos petroleros para cuerpos acuíferos confinados.

- $h_0 =$                 Espesor aproximado del acuífero por encima del túnel o la elevación de la capa freática.
- $D =$                  Altura vertical del túnel sobre la base del acuífero.
- $h_0$  y  $h_t$ .         Cabezas totales de la formación en las paredes del túnel, con respecto al eje del túnel.
- $K_x$                  Conductividad hidráulica horizontal de la formación acuífera.
- $K_z$                  Conductividad hidráulica vertical de la formación acuífera.

$$h_0 - h_t = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{2Q}{LK_x(h_0' + h_0 + 2D)} \cdot \sqrt{\frac{(h_0' + h_0 + 2D)K_x t}{2S_y}} + \frac{Q}{2\pi L \sqrt{K_x K_z}} \cdot \sigma_z,$$

Donde  $\sigma_z = \ln\left(\frac{h_0' + D}{2\pi r_0}\right) + 0.25 \cdot \ln\left(\frac{K_x}{K_z}\right) - \ln\left(\sin \frac{180^\circ D}{h_0' + D}\right)$ , and (67)

$$h_0' = h_t + \frac{Q}{2\pi L \sqrt{K_x K_z}} \cdot \sigma_z.$$

- Sy Rendimiento específico. (Volumen de agua que un medio rocoso saturado puede producir por gravedad, por unidad de volumen).
- Q Caudal.
- L Longitud excavada.
- $\sigma_z$  Factor adimensional por la textura del túnel, ajusta la pérdida de presión por el flujo vertical del agua en el túnel.

Este método de análisis considera una presión nula en la pared del túnel, las expresiones desarrolladas por Low y Kawecki estiman las características del flujo en función de la cabeza hidráulica sobre la corona de la excavación totalmente confinada y despresurización del sistema acuífero.

Si se presentan variaciones en la cabeza hidráulica, el sistema de ecuaciones se puede resolver iterativamente para Q (t), en función de  $\sigma_z$  y las alturas piezométricas.

La expresión evalúa el flujo de agua en los sistemas acuíferos adyacentes al túnel, es importante tener en cuenta que las fronteras y límites del sistema tienen un efecto significativo en los cálculos, especialmente el efecto del confinamiento y la longitud D (base del acuífero), lo cual representará un buen ajuste a la expresión desarrollada por Kawecki.

Sin embargo, este escenario es complejo en los ambientes clásicos de los túneles, los cuales no tienen un confinamiento total de la bóveda excavada, sino termina hacia la zona de los portales, dicha expresión podría coincidir con estructuras subterráneas como cámaras y almacenes, para una extensión limitada en todo el sistema acuífero.

#### 4.2.5. Solución semiempírica de Goodman.

La expresión se desarrolló bajo las suposiciones de Dupuit, para un túnel que se excava en zonas saturadas, la línea de abatimiento conforma una parábola en el centro del túnel, escenario que se representa en la Figura 104, en un flujo constante y en un periodo determinado.

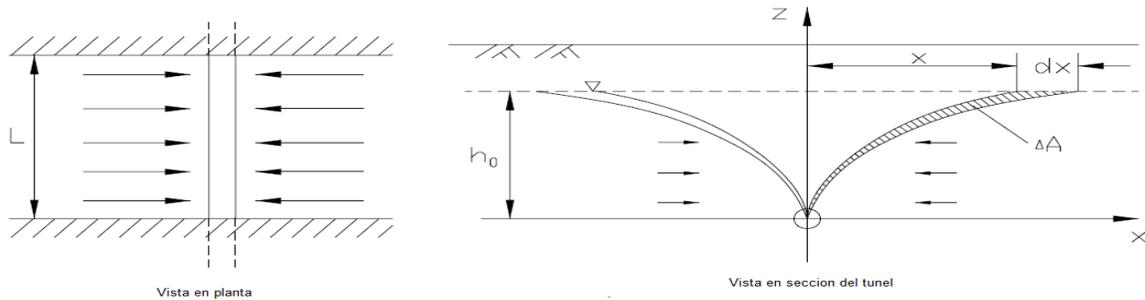


Figura 104. Modelo Goodman de flujo variable.

Fuente: (Chen, 2010). Groundwater Inflow Into Rock Tunnels. Pag 133.

(Olofsson 1991 y Cesano 1999), ajustaron la expresión para el estimar el flujo de agua en un régimen transitorio, a partir de la solución semi-empírica de Goodman; la cual tiene en cuenta las fluctuaciones del nivel de agua y condiciones de recarga del macizo, donde se calcula la infiltración total por el valor acumulado de cada uno de los tramos del túnel.

Para proporcionar flexibilidad, Goodman introdujo el coeficiente C, a partir de pruebas al modelo donde obtuvo un valor de  $C = 1,36$  para una infiltración completa.

Para una irrupción parcial en la zona permeable, se encontró que existe una relación lineal de:

$$C = 0,12 + 1,24D$$

Donde: D, es una proporción de la franja de carga de agua excavada por el túnel

$$Q(t) = \sqrt{8 \cdot \frac{C}{3} \cdot k \cdot H_0^3 S_y \cdot t} \quad (68)$$

Donde:

- Q (t) = Es el flujo acumulado por unidad de longitud del túnel en el tiempo de excavación.
- K = Conductividad hidráulica del macizo. L/T.
- Ho = Cabeza de agua subterránea inicial sobre el eje central del túnel. L.
- C = Constante entre 0.5 a 1.36.
- Sy = Rendimiento específico.
- t = Rendimiento promedio de excavación. L/T.

### 4.3. Modelación de los sistemas hidrogeológicos.

Para definir un modelo hidrogeológico aceptable que se asemeje a las condiciones reales, se debe tener la información del proyecto, localización y dimensionamiento de las zonas factibles de almacenamiento o captación de agua en el subsuelo. El suficiente conocimiento geológico de las etapas previas, las características hidrológicas y donde se emplazara el proyecto, los requerimientos de información se presenta en la Figura 105.

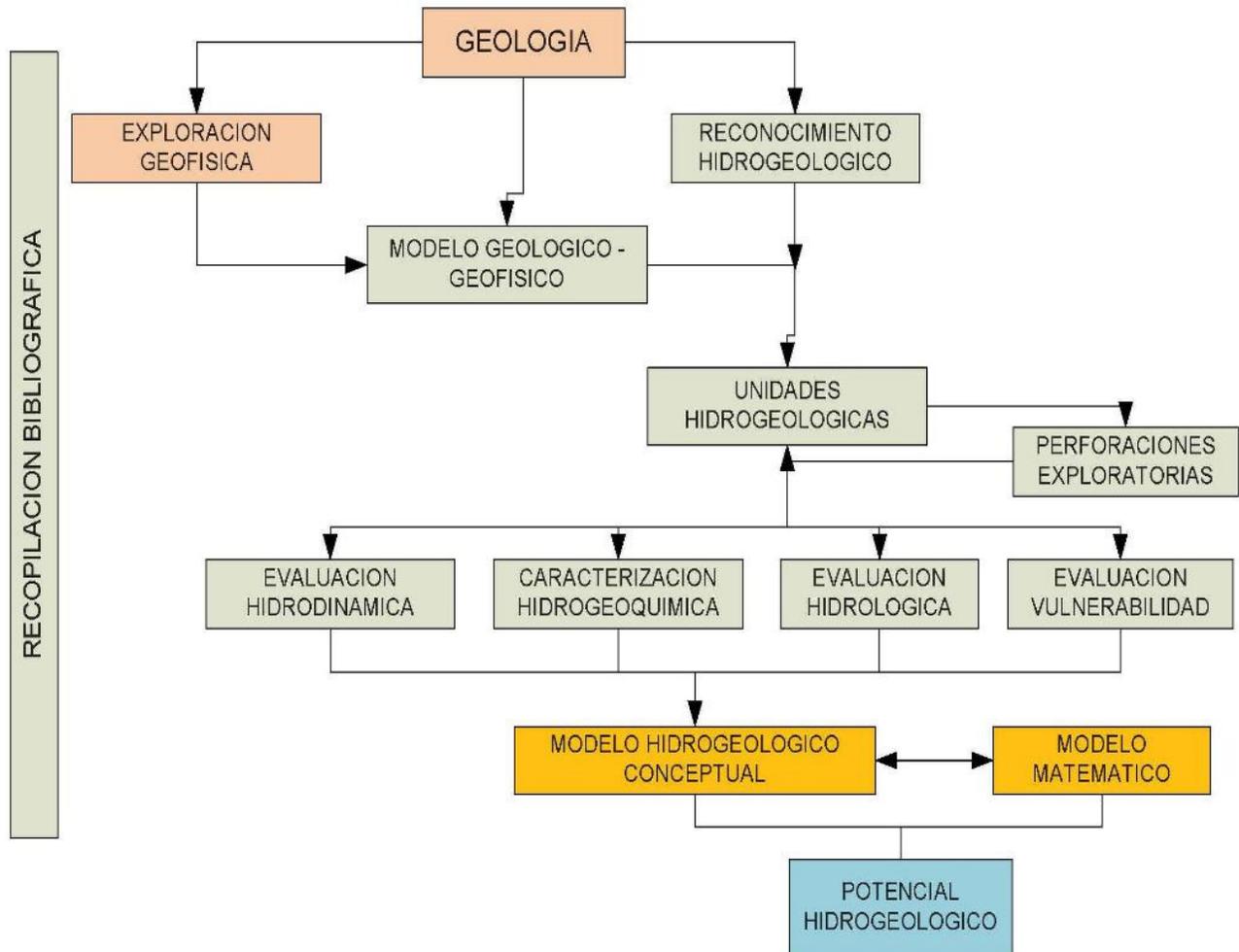


Figura 105. Diagrama de Flujo Exploración aguas subterráneas.  
Fuente: (INGEOMINAS, Programa de Exploración de Aguas Subterráneas., 2004)

En la predicción del comportamiento del agua subterránea se utilizan modelos de simulación de la red de drenaje, evaluando el flujo de agua a partir de las características hidrogeológicas, parámetros hidráulicos del macizo, la ubicación y características constructivas de la obra.

La elaboración del modelo se ejecuta a partir de las formulaciones matemáticas, las cuales simplifican el movimiento del agua a través del medio, su validez está relacionada con el conocimiento geológico e interpretación de las variables hidráulicas y del macizo. En la Figura 106 se presenta un esquema básico del proceso de información en un análisis básico de la hidrogeología para un proyecto.

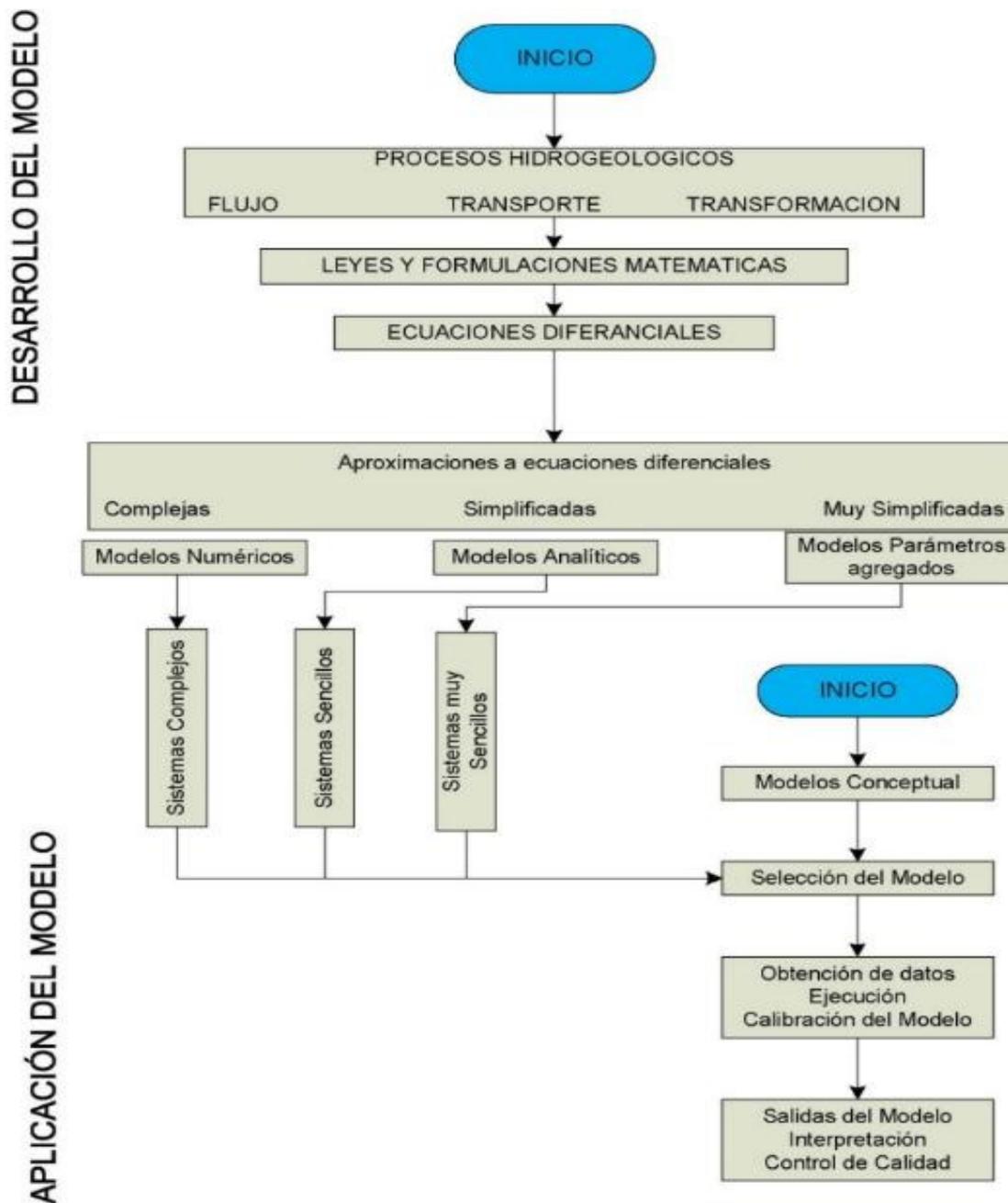


Figura 106. Esquema del modelamiento de acuíferos. Fuente: (SGL, 2011, p. 29). Aguas Subterráneas—Acuíferos.

#### 4.3.1. Parámetros adicionales de los modelos.

Para determinar una simulación de flujo satisfactorio se considera el agua subterránea en un medio homogéneo e isotrópico, así se podrían evaluar mediante una expresión matemática simple los cambios o singularidades de los sistemas acuíferos, incorporados como elementos de frontera.

Para simular el flujo del agua se deben asignar unas propiedades del macizo y recargas del sistemas, su interpretación e incorporación a la modelación es la etapa más importante, además, se deberán evaluar las condiciones del medio físico, contorno y la finalidad del modelo.

### FLUJO Y BALANCE DE MASA DEL AGUA

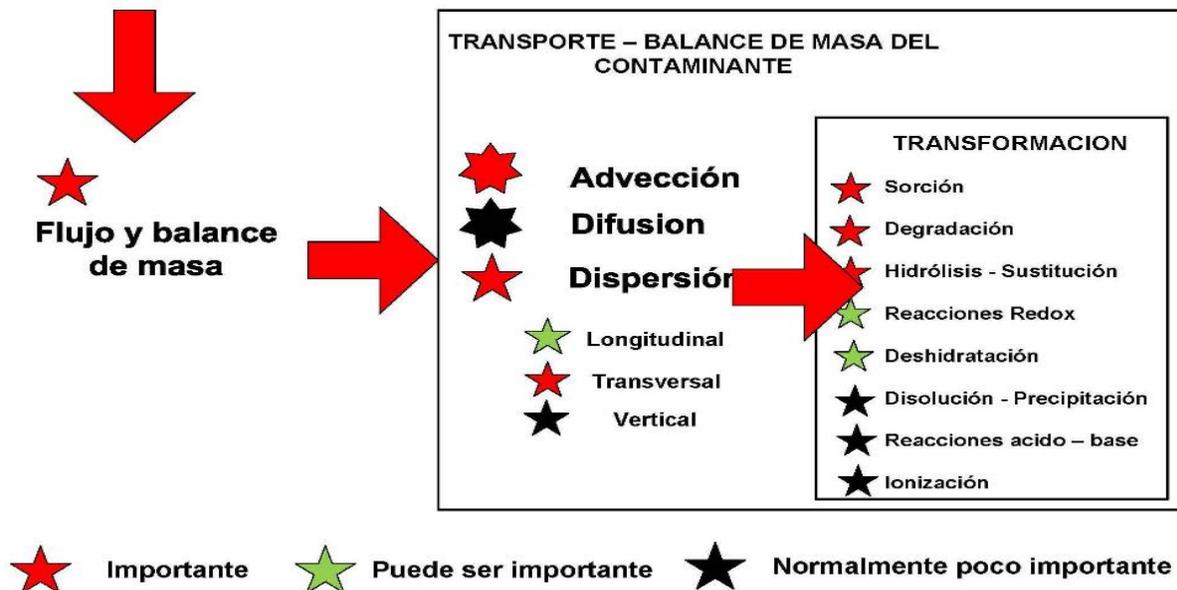


Figura 107. Variables que afectan los modelos hidrogeológicos  
Fuente: (SGL, 2011, p. 29). Aguas Subterráneas—Acuíferos.

Como se representa en la Figura 107, el flujo de agua en los diferentes estados y procesos de transformación deberá incorporarse en el análisis como entradas y salidas del sistema hidráulico subterráneo.

#### 4.3.2. Modelo Hidrogeológico conceptual.

Las características hidrogeológicas evaluadas podrán representar en un esquema del flujo, similar al de la siguiente figura, almacenamiento y flujo del agua subterránea. El cual describirá y pronosticará el comportamiento del acuífero y con esto determinar los posibles impactos o afectaciones a las obras por la irrupción del agua.

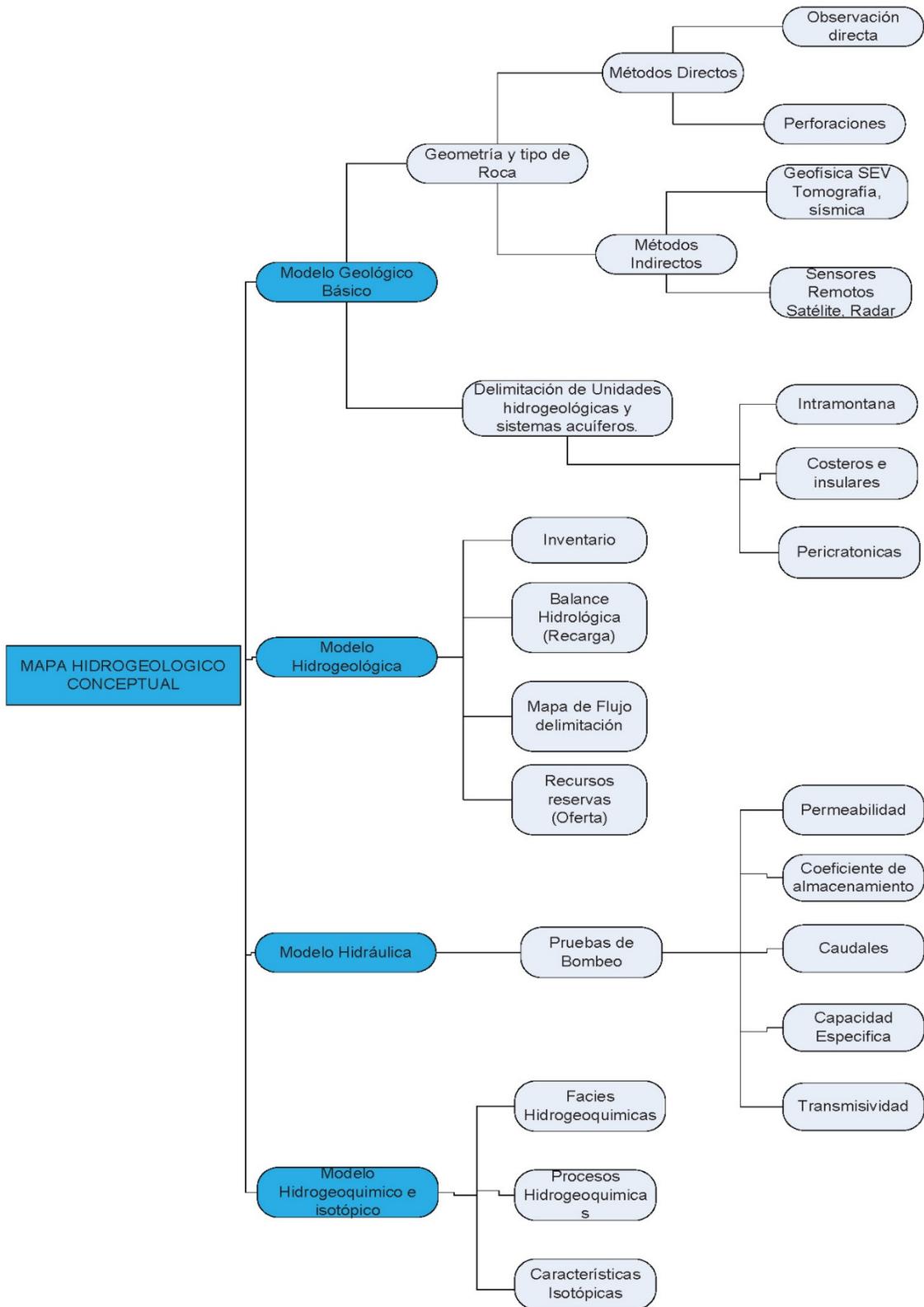


Figura 108. Modelo Hidrogeológico Conceptual  
 Fuente: (IDEAM, 2014). Estudio Nacional del agua. 2014

### 4.3.3. Analisis con modelos finitos.

Con la información obtenida en la fase de exploración geológica, las hipótesis y los diferentes modelos es común crear una representación numérica de las condiciones de flujo, caudales y tasas de infiltración subterránea.

En el modelamiento se deberán definir los valores  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ , y  $k_{zz}$  de conductividad hidráulica a lo largo de los ejes de coordenadas x, y, y z; en los modelos se deberán representar las fuentes y sumideros de recarga. Es común realizar un proceso de calibración de mediciones de los niveles de agua y descargas de agua subterránea, si se encuentran disponibles. Se puede ajustar empleando las cabezas de presión y simular en el modelo, los resultados se deben comparar con valores tomados en las mediciones de campo.

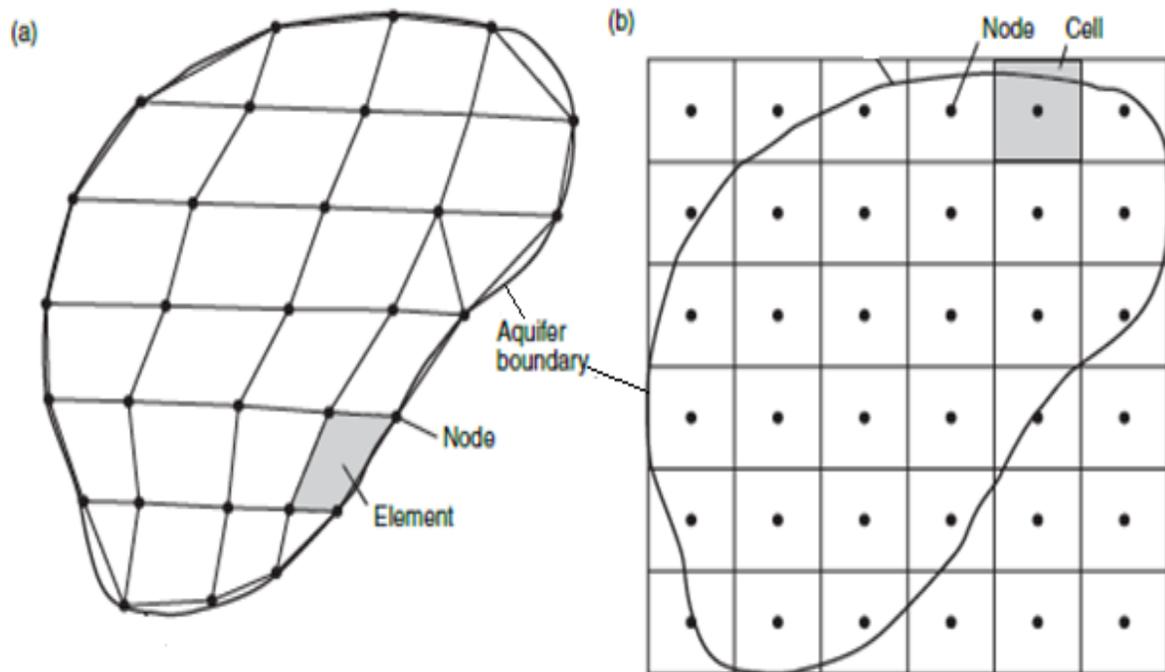


Figura 109. Esquema de malla de elementos finitos a) Red diferencias finitas. b) Supuesto del sistema Acuífero.

Fuente: (Fetter, 2001). Applied Hydrogeology 4th Edition

Debido a la complejidad en las variables estudiadas, se han desarrollado programas computacionales que resuelven el sistema de ecuaciones, utilizando diferencias finitas o elementos finitos.

La información de entrada requerida para el análisis del sistema de ecuaciones es:

- Permeabilidad.
- Valores de transmisividad del sistema.
- Valores de recarga y de otras fuentes o sumideros.
- La geometría del sistema acuífero.
- Valores iniciales de la cabeza.

Las herramientas de cómputo simulan el sistema acuífero, discretizando las variables por rejillas y celdas que se concentran en nodos, a los cuales se les asignan unas propiedades hidráulicas y geológicas del sistema, similar al que se representa en la Figura 109.

La solución al sistema de ecuaciones se realiza para cada celda, y luego se resuelve simultáneamente para determinar los valores de carga y presión de cada nodo. Debido a la complejidad del sistema, condiciones de frontera y singularidades del acuífero puede haber numerosas iteraciones de cálculo.

Uno de los códigos de análisis más utilizados actualmente (Modflow<sup>2005</sup>) permite especificar las características de las recargas, asignando las características hidráulicas del arroyo a la celda correspondiente. El hidrogeólogo deberá especificar las características de espesor, la conductividad hidráulica del cauce y zona de flujo (largo y ancho). (Harbaugh, 2005).

La recarga de acuíferos confinados se produce en gran medida en las zonas de contactos, fallas y discordancias geológicas; muchos acuíferos reciben cantidades sustanciales de reposición en forma de flujo vertical a través de las capas confinantes. Para la modelación de sistemas confinados se pueden incluir propiedades de restricción y baja permeabilidad, que limiten el sistema en cajas litológicas que restringen el paso del agua al sistema.

El método analítico es una alternativa a las de diferencias finitas y elementos finitos para resolver la ecuación de flujo de agua subterránea, la cual utiliza superposición de soluciones desarrolladas a partir de la expresión de Darcy y condicionadas para el tipo de proyecto (túneles). Con esto se lograría determinar valores de carga en cualquier punto en el dominio simulado y no se requiere una malla espacial, sin embargo; el método analítico, no puede predecir alguna singularidad a una mayor escala y el planificador con sus criterios, deberá ajustar o no el modelo.

## Capítulo V. Normativas y directrices para el control del agua en las excavaciones subterráneas.

Con el desarrollo de las técnicas de ingeniería se han establecido pautas para estandarizar y ejecutar las diferentes actividades en los túneles, dichas medidas se han impulsado y hecho obligatorias en normativas a través del planeta, las cuales se han concentrado en países con alto desarrollo tecnológico. A continuación, se reseñan las directrices en cuanto al manejo y control del agua subterránea:

### 5.1. Directivas Europeas.

Tabla 14. Normativas y directrices Alemanas.

Identificación	Descripción
DIN EN 13256:	Productos relacionados con geotextiles, requisitos para su uso en la construcción en túneles.
DIN 19938 DIN 18195 DS 853 - 835 DIN 4207	Características y materiales requeridos para las geomembranas utilizadas en los proyectos de tunelería.
DIN 16726	Pautas para las pruebas en techos de plástico y fieltro lámina de impermeabilización.
DIN 4062	Materiales en plástico para control del agua, materiales de unión de piezas prefabricadas de hormigón, requisitos, análisis y procesamiento.
DIN 18312	Establece los procedimientos contractuales en los trabajos subterráneos, incluye las características de medición y control del agua durante las obras. Define los límites de y cantidades de obras requeridas para el manejo de agua en los túneles, las características de las obras y las características de pago.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Normativas y directrices Austriacas.

Identificación	Descripción
Austrian Guideline on Túnel Seals	Establece las características para el diseño de túneles, los métodos de manejo del agua subterránea y características constructivas.
Guidelines and Regulations for Road Design	Regulación Austriaca para el diseño de túneles de carretera.
Austrian Guideline for Sprayed Concrete	Recomendaciones para el Hormigón Proyectado según la Guía del Shotcrete de la Asociación Austriaca de Tecnología del Hormigón y Construcción.
B 2209 B 3700 B 3800	Características y materiales requeridos para las geomembranas utilizadas en los proyectos de tunelería.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Normativas y directrices Suizas.

Identificación	Descripción
SIA - 196 SIA - 199	Ventilación en trabajos subterráneos. Características de exploración para trabajos subterráneos.
SIA-Standard 198.	Define los parámetros de diseño para túneles de carretera, enuncia los criterios para el control de drenaje, pagos y medidas la inspección y control del agua subterránea en rocas duras. Establece las formas de pago de acuerdo a las condiciones hidrogeológicas de los proyectos.  Brinda las pautas y criterios frente a las técnicas constructivas, seguridad industrial y salud ocupacional requeridas.
SIA - 272. 183/2	Características y materiales para geomembranas utilizadas en los proyectos de tunelería.
SIA 118 / 197	Términos y condiciones para los trabajos de tunelería.
SIA 118 / 272	Términos y condiciones para el sellamiento, drenaje y control de agua de estructuras superficiales y subterráneas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Normativas y directrices de Noruega.

Identificación	Descripción
B 2203-1	Desarrolla los aspectos contractuales para las medidas de manejo de agua subterránea, acerca de los costos constructivos y tiempo del proyecto.  Categoriza los proyectos de acuerdo a las condiciones hidrogeológicas, cantidades y calidad del agua.
Standard Road Tunnels (2004), Noruega	Especificaciones técnicas para la construcción de túneles carreteros.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Normativas y directrices de Italia.

Identificación	Descripción
UNI 8202 UNI 0042	Características y materiales requeridos para las geomembranas utilizadas en los proyectos de tunelería.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Normativas y directrices de España.

Identificación	Descripción
UNE 104424	Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas en PVC-P.
UNE 83.607	Recomendaciones y aspectos de uso del hormigón proyectado.
UNE 83.600	Clasificaciones y definiciones para el hormigón proyectado.
UNE 83.602	Preparación y muestras para el hormigón proyectado.
UNE 83.603	Determinación de la resistencia a la compresión con el Penetrómetro.
UNE 83.604	Determinación de la resistencia al arrancamiento del hormigón proyectado.
UNE 83.606	Ensayo de flexo tracción del hormigón proyectado.

UNE 83.609	Determinación de la resistencia a la compresión in situ del hormigón proyectado.
Manual de diseño de Túneles Interurbanos de Carretera	Manual De Diseño De Túneles Interurbanos De Carretera. Gobierno Vasco. Departamento De Transportes Y Obras Públicas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Reino Unido.

Identificación	Descripción
BS EN 1849-2:2001	Características de las estructuras plásticas o flexibles para la impermeabilización, determina el gramaje mínimo, espesor por unidad de área, en láminas de plástico y caucho para el control de la infiltración.
BS EN 1928:2000	Diseños y propiedades de estructuras flexibles para impermeabilización, en bitumen, plásticos y láminas de caucho.
BS EN 12310-2:2000 BS EN 12317-2:2000	Define los parámetros para las estructuras y láminas flexibles para impermeabilización, resistencia a la rotura, láminas de plástico y caucho para la impermeabilización en la construcción.
BS EN 13492:2004 (E)	Geosintéticos - Requisitos para su uso como una barrera impermeables en la construcción de túneles y estructuras subterráneas.
BS EN 14487-1 BS EN 14488-1 BS EN 14488-2	Hormigón proyectado, establece definiciones, especificaciones constructivas, ensayos, hormigón proyectado con fibra.
BS 6164	Código de seguridad industrial y salud ocupacional en la construcción de túneles.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Otras referencias en el mundo.

Identificación	Descripción
Guía Australiana de Shotcrete.	Establece las especificaciones y recomendaciones para el concreto lanzado en obras de ingeniería.
Guía australiana de protección al fuego de túneles.	Especificaciones y pautas de protección al fuego de túneles.
Francia. Circ 2000/63A2. Inter-ministry circular n°2000-63 of 25 August 2000 relating to the Safety of tunnels in the national highways network.	Regulación para el control de riesgos y seguridad de los trabajos en los túneles.
Japon. Design Principles, Volume 3 (Tunnel) Part (4) (Tunnel Safety facilities)	Guía para el diseño y construcción de túneles, principios seguridad industrial e higiene en los trabajos subterráneos.
Korea. GIST. Guideline for Installation of Safety facility in road Tunnels	Guía para la instalación de servicios y facilidades en la construcción y excavación de túneles.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.2. Referencias transnacionales.

Tabla 22. Directrices de la Unión Europea

Identificación	Descripción
ISO 10318-1:2015	Geosintéticos, descripción y términos.
EUROCODE 2	Diseño de estructuras en concreto.
EUROCODE 3	Diseño en estructuras en acero.
EUROCODE 7	Diseño Geotécnico.
EUROCODE 8	Proyectos de estructuras sismo resistentes.
UNE EN 14487-1	Definiciones y diseño para el hormigón proyectado.
UNE EN 14487-2	Ejecución del ensayo para el hormigón proyectado.
UNE EN 14488-1 UNE EN 14488-6	Ensayos.
UNE 13491:2013	Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización como membranas de impermeabilización frente a fluidos en la construcción de túneles y estructuras subterráneas.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.3. Norte América.

Tabla 23. Directrices Estados Unidos.

Identificación	Descripción
ACI 506R-05	Guía americana de construcciones de concreto en obras subterráneas, enfocada en las estructuras concreto lanzado.
ACI 304	Guía para la medición, mezcla, transporte y distribución del concreto.
ACI 212	Especificaciones para las mezclas y aditivos químicos en el concreto.
ACI 506	Guía para Shotcrete (Concreto Lanzado), establece las especificaciones y recomendaciones para el uso del concreto lanzado en obras de ingeniería.
OSHA 3115-06R 2003	Pautas de construcción de túneles, medidas de seguridad y salud en el trabajo.
AASHTO – Green Book	Manual técnico para el diseño y construcción de túneles carreteros (TMDCRT).
Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels — Civil Elements	Manual técnico para la construcción de túneles, en donde se establece parámetros de planeamiento, configuración geométrica para las labores, investigación y modelos geotécnicos, métodos constructivos, entre los que se destaca las medidas de manejo de agua y mantenimiento en los túneles, presenta un capítulo para los túneles en roca, métodos de falla, en suelos blandos y problemas con calidad de macizos, tipos de terreno y medidas de manejo. Túneles inmersos, consideraciones sísmicas, costos y características de las obras de ingeniería, instrumentación, rehabilitación y mantenimiento de las obras subterráneas.
Standards, Guidance, and “Best Practices” for Existing and New US Roadway Tunnels	Brinda una recopilación de las normativas, guías y mejores prácticas sugeridas por constructores norteamericanos en la construcción, operación y mantenimiento de túneles. Establece recomendaciones para contratistas, operadores, clasificación frente a categorías los trabajos subterráneos y su nivel de prioridad.
NFPA 502	Presenta las características de diseño y operación de los túneles para la protección al fuego, los recursos y requerimientos de materiales, elementos de emergencia mínimos para evitar o prevenir fuego en las obras subterráneas.

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4. Latinoamérica.

Tabla 24. Directrices Chile.

Identificación	Descripción
NCh 2182	Norma chilena para el uso y manejo del hormigón, mortero, especifica el uso de aditivos, clasificación y requisitos.
NCh – 170	Presenta los procedimientos para el uso y manipulación del hormigón, clasificaciones, resistencia, mezcla, técnicas de colocación y aplicación para las diferentes obras de ingeniería, con algunas recomendaciones para la combinación del hormigón con aditivos.
NCh – 2262	Ensayo para medir la impermeabilidad del concreto frente al agua a presión, establece el procedimiento para montar o ejecutar el ensayo.
Comité de túneles y espacios subterráneos Chile	Guía de Diseño para Membranas Projectadas de Impermeabilización.
Chile: Manual de Carreteras, Vol. N°3, Capítulo 3.800.	Especificaciones técnicas para el diseño de túneles de carretera

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Directrices México.

Identificación	Descripción
Manual de diseño y construcción de túneles de carretera.	<p>El manual presenta las pautas para el diseño y trazado de los túneles, de acuerdo a las características topográficas, define los aspectos geométricos de la sección de la obra.</p> <p>En uno de los capítulos del documento se describen los requerimientos de Geología y actividades de exploración, la parte VI del documento, profundiza en el análisis geotécnico y diseño en función de las características del macizo rocoso, de acuerdo a las clasificaciones Geomecánicas (diseño empírico). Y la valoración de los parámetros de resistencia y deformación de la roca para definir los aspectos constructivos de sostenimiento y revestimiento de la obra.</p> <p>Además, describen las obras de corte a cielo abierto para definir las zonas de portales o bocas de acceso de los túneles. El documento presenta las metodologías de excavación, corte y avance en el macizo, las medidas de estabilización por diferentes sistemas (concreto lanzado, pernos de fricción, arcos metálicos, sistemas de inyección).</p> <p>Se evalúan los aspectos más importantes en el análisis estructural de los sistemas de sostenimiento, la modelación de las cargas previstas sobre el soporte. El capítulo 11 presenta las características de revestimiento por diferentes sistemas, actividades de drenaje e impermeabilización de la obra, presentando el tipo de materiales, geomembranas y geotextil, medidas de drenaje.</p> <p>Finalmente, menciona las características para el seguimiento y control de las actividades, materiales utilizados y requerimientos de calidad, seguridad industrial. Además de los servicios complementarios para los túneles, requeridos para el mantenimiento y operación de una obra subterránea.</p>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Directrices Perú.

Identificación	Descripción
Resolución 15 -2014 Manual de Carreteras – Túneles, Muros y Obras Complementarias.	Establece las características principales para el diseño de túneles, trazado de vías, estudios geológicos y geotécnicos requeridos, investigación exploratoria, con los ensayos requeridos. Riesgo geológico frente al desarrollo de las obras subterráneas, clasificaciones geomecánicas, metodologías de análisis frente al comportamiento del macizo, características constructivas, y actividades requeridas como: perforación y voladura, métodos de avance, sostenimiento, revestimiento, manejo de agua e impermeabilización de los trabajos subterráneos. Aspectos económicos, seguimiento por interventores del proyecto, seguridad y salud en el trabajo, medidas de control frente a los peligros, ventilación, altas temperaturas, métodos de reparación y mantenimiento.

Tabla 27. Directrices Colombia.

Identificación	Descripción
Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento para túneles de carretera (en desarrollo)	Documento complementario para los trabajos contratados por INVIAS de Colombia. Define entregables mínimos en cada etapa de proyecto de tunelería.
Manual diseño Geométrico de carreteras, INVIAS.	Especificaciones para diseño geométrico de vías, características constructivas, con algunas reseñas de túneles.
Resolución 0751, 26 de marzo de 2015. Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible	Términos de referencia para estudios de impacto ambiental en los proyectos de túneles de carretera y accesos viales.
Decreto 1886 de 2016. Ministerio de Minas y energía de Colombia	Normativa, especifica los aspectos de seguridad minera para los trabajos subterráneos, ventilación, perforación, voladura, manejo de aguas, desarrollada para el sector minero.
NTC 4483	Métodos de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Otros referentes latinoamericanos.

País	Descripción
Bolivia.	Capítulos del manual técnico para el diseño de carreteras, se presentan algunas especificaciones en el diseño de trabajos de tunelería.
Ecuador	Capítulos de la norma ecuatoriana vial NEVI-12.
Argentina	Normas de Diseño Geométrico de Carreteras de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) y “DNV Normas de Diseño Geométrico y Seguridad Vial 2010”
Brasil	Normativas NBR para túneles.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.5. Instituciones de tunelería.

Tabla 29. Guías y manuales institucionales

Nombre	Identificación	Descripción
ITA-AITES	An Owners Guide to Immersed Tunnels.	Guía para el manejo de túneles inmersos bajo el agua, establece recomendaciones para el diseño y construcción de las obras, características constructivas, de los materiales, además de observaciones para el control del agua, presenta algunas pautas para los contratistas y diseñadores.
ITA tech	Design Guidance For Spray Applied Waterproofing Membranes.	Guía de uso de membranas lanzadas para impermeabilización de túneles, características de los materiales, aplicaciones, ensayos y especificaciones usuales de los trabajos subterráneos.
ASTM C 494 / 260	Specification for chemical Admixture for Concrete.	Especificaciones para las mezclas y adiciones al concreto lanzado.
	Specification for Air entraining admixture.	
EFNARC	Especificación Europea para concreto lanzado.	Características y recomendaciones para el concreto lanzado utilizado en los túneles.
World Road Association (PIARC)	Road Tunnel Manual.	Especificaciones para proyectos de túneles en carretera, en los trabajos de operación y mantenimiento, describe algunas características y recomendaciones para los trabajos subterráneos.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.6. Unidades de medida.

Cada país es autónomo en establecer los parámetros de medida para la infiltración e irrupciones de agua en los túneles. La variable más común para expresar las tasas de infiltración es el caudal, en galones por minuto (gpm) por longitud de túnel y con la superficie expuesta en metros cuadrados. En países de Europa y Asia se expresa en unidades de litros (L) por día por metro cuadrado.

Si se requiere determinar el caudal evaluado expresado como velocidad de flujo en función de una superficie ( $\text{gmp / pie}^2$  o  $\text{L/día/m}^2$ ), se deben conocer las dimensiones del túnel (radio y perímetro promedio).

## 5.7. Requerimientos de impermeabilización en tuneles.

En diferentes países se han establecido niveles de infiltración, para Gran Bretaña se clasifican los valores de infiltración máxima permisible en 7 niveles designados con letras, como se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30. Gran Bretaña, Clasificación del tipo de impermeabilización. (CIRIA 1979)

Clasificación	Infiltración máxima permisible (litros/día/m <sup>2</sup> )
O	NA
A	1
B	3
C	10
D	30
E	100
U	Sin clasificar

Notas

1 - Se aplica una clase específica para definir el límite superior para el flujo total de fugas en un túnel dado.

2 - Una clase indicada se aplica para definir el límite superior de las fugas locales medidas en la superficie interior del túnel, o lados de 1 m o de 100 mm.

Fuente: (Nazarchuk, 2005). Wáter intrusión in underground Structures, pág. 41.

Se recomiendan los niveles O, A y B para los túneles de tránsito, mientras que para los túneles de servicio se requieren las clases C, D y E.

Así mismo, En Alemania se ha fijado las especificaciones más altas para estructuras subterráneas con presencia de personas y los más bajos en túneles de servicios, escala que se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Grados de impermeabilidad de acuerdo al uso del proyecto.

Grados de impermeabilidad requerido	Característica de la estructura	Daños y problemas esperados
 Alto	Personas presentes por largos periodos.	Afectaciones a la salud humana.
	Almacenamiento de mercancías afectadas por la humedad (papel, productos alimenticios).	La calidad de las mercancías materiales puede afectarse por la humedad.
	Secciones del túnel de tráfico afectadas por heladas (zonas portuarias, túneles peatonales).	Daños y afectaciones en zonas de vías, equipamiento eléctrico, interrupción del tráfico.
	Túneles libres de heladas.	Daños en los materiales del túnel, reducción de la estabilidad de la obra
	Túneles de servicios	Daños en los materiales del túnel, reducción de la estabilidad de la obra, fenómenos de corrosión.
Bajo	Túneles de alcantarillado	Daños en los materiales del túnel, reducción de la estabilidad de la obra, contaminación ambiental.

Fuente: (Nazarchuk, 2005). Wáter intrusión in underground Structures, pág. 44.

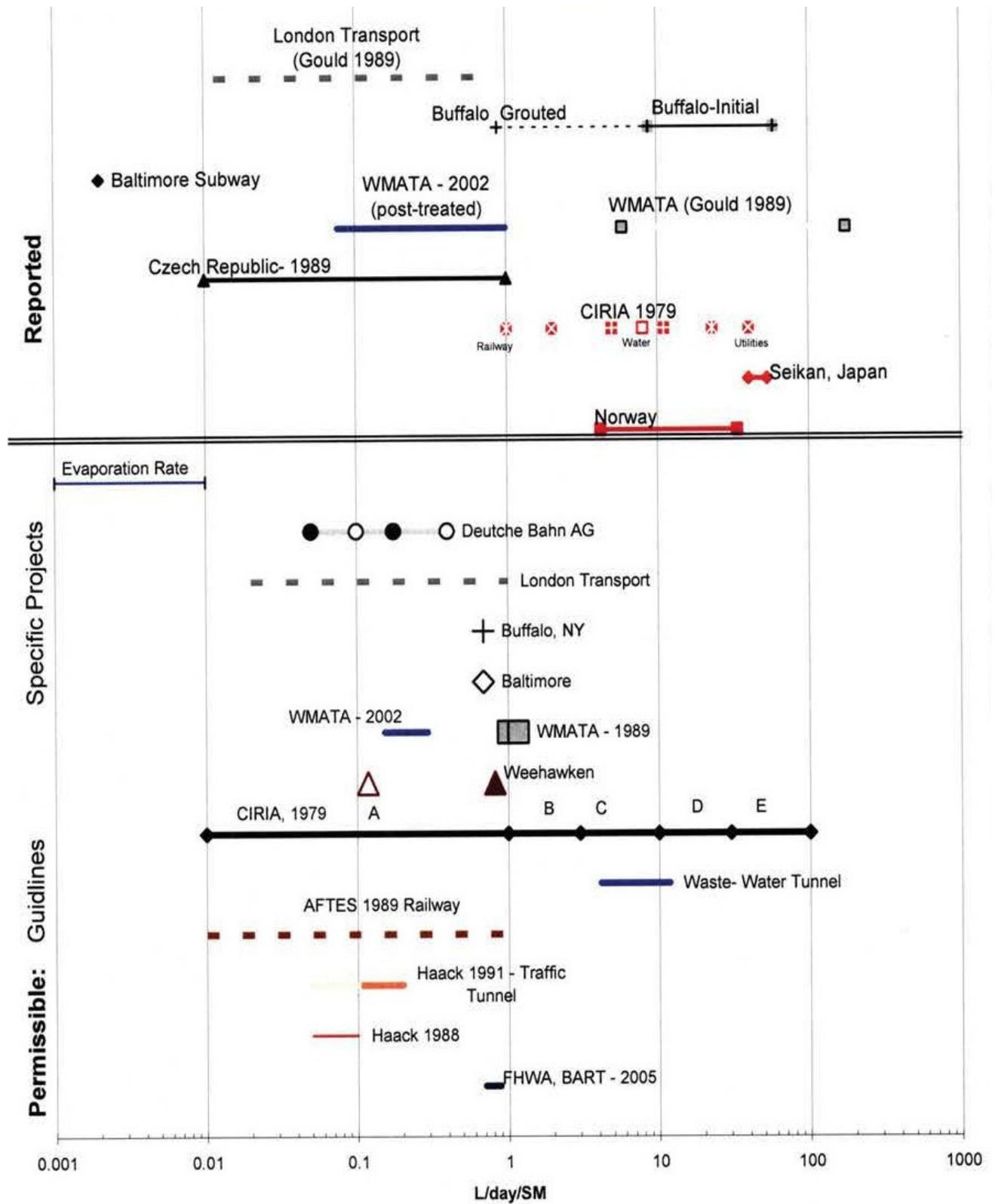


Figura 110. Valores de infiltración frente a especificaciones requeridas Fuente: (Nazarchuk, 2005). Water intrusion in underground Structures, pág. 51.

Las especificaciones Germanas para la infiltración en las obras subterránea son muy estrictas en cuanto a la construcción, operación, mantenimiento y calidad de materiales, como se puede observar en la Tabla 32.

Tabla 32. Clasificación Germana, razón de infiltración permitida, de acuerdo al uso del proyecto, Instituto Otto-Graf (Haack 1991)

Nivel	Características de Humedad	Uso	Irrupción de agua diaria permisible (Lt/m <sup>2</sup> )
1	Completamente drenado.	Cuartos de almacenamiento.	0.001
2	Sustancialmente drenado.	Túneles viales.	0.01
3	Penetración capilar del revestimiento.	Carreteras, túneles peatonales.	0.1
4	Goteos bajos.	Túneles ferroviarios.	0.5
5	Goteos ocasionales.	Túneles de alcantarillado.	1

Fuente: (Nazarchuk, 2005). Water intrusion in underground Structures, pág. 45.

En la Tabla 33 se presentan los grados de permeabilidad requeridos para tuneles viales y ferroviarios de Alemania de acuerdo a las condiciones y características de humedad.

Tabla 33. Niveles de impermeabilización en túneles ferroviarios de Alemania. (Haack 1991)

Nivel	Características de Humedad	Uso	Definición
1	2	3	4
2	Completamente drenado.	Cuartos de almacenamiento.	No se deben detectar parches húmedos en el interior del túnel.
3	Muy seco	Túneles viales.	La pared del revestimiento deberá ser lisa, sólo pueden detectarse parches aislados ligeros de humedad. No se deben detectar rastros de agua en él. Si un trozo de papel periódico se coloca sobre un parche, en ningún caso se decolora como resultado de la absorción de humedad.
4	Penetración capilar del revestimiento.	Carreteras, túneles peatonales.	La pared del revestimiento debe localizarse manchas de humedad aisladas y restringidas localmente. Los parches de humedad deben revelar que la pared ha sido penetrada por la humedad, si se coloca una tira de papel periódico no hay penetración evidente de agua.

Fuente: (Nazarchuk, 2005). Water intrusion in underground Structures, pág. 45.

Asi mismo, de acuerdo a las características de humedad y condiciones de uso se ha propuesto en Alemania los valores de flujo permisible en litros / metro cuadrado, para diferentes longitudes del tunel, como se muestra en la Tabla 34.

Tabla 34. Propuesta STUVA de determinar las fugas de agua en Alemania, (Haack 1991).

Nivel	Características de Humedad	Uso	Definición	Flujo de agua permisible (l/m <sup>2</sup> ), por longitud de referencia en el túnel	
				10 m	100 m
1	Completamente drenado.	Cuartos de almacenamiento.	No se deben detectar parches húmedos en el interior del túnel.	0.02	0.01
2	Sustancialmente drenado.	Túneles viales.	La pared del revestimiento deberá ser lisa, sólo pueden detectarse parches aislados ligeros de humedad. No se deben detectar rastros de agua en él. Si un trozo de papel periódico se coloca sobre un parche, en ningún caso se decolora como resultado de la absorción de humedad.	0.1	0.05
3	Penetración capilar del revestimiento.	Carreteras, túneles peatonales.	La pared del revestimiento debe localizarse manchas de humedad aisladas y restringidas localmente. Los parches de humedad deben revelar que la pared ha sido penetrada por la humedad, si se coloca una tira de papel periódico no hay penetración evidente de agua.	0.2	0.1
4	Goteos bajos.	Túneles ferroviarios.	Irrupciones de agua con manchas locales	0.5	0.2
5	Goteos ocasionales.	Túneles de alcantarillado.		1	0.5

Fuente: (Nazarchuk, 2005). Water intrusion in underground Structures, pág. 47.

Tabla 35. Clasificación de la Estanqueidad, Deutsche Bahn AG (Ferrocarril Alemán) e Instalaciones subterráneas, (AITES 2001).

Nivel Impermeabilidad	Características de Humedad	Uso	Definición	Flujo de agua aceptable (Lt/día/m <sup>2</sup> ), por longitud de referencia en el túnel	
				10 m	100 m
1	Completamente drenado.	Cuartos de almacenamiento.	En la pared del revestimiento no se deben detectar zonas con humedad.	0	0
2	Sustancialmente drenado.	Secciones subterráneas con peligro de congelamiento.	La pared del revestimiento deberá ser lisa, sólo pueden detectarse parches aislados ligeros de humedad. No se deben detectar rastros de agua en él. Si un trozo de papel periódico se coloca sobre un parche, en ningún caso se decolora como resultado de la absorción de humedad.	0.2	0.05
3	Penetración capilar del revestimiento.	Secciones subterráneas que no están contempladas en el nivel I y II.	La pared del revestimiento debe localizarse manchas de humedad aisladas y restringidas localmente. Los parches de humedad deben revelar que la pared ha sido penetrada por la humedad, si se coloca una tira de papel periódico no hay penetración evidente de agua.	0.4	0.1

Fuente: (Nazarchuk, 2005). Wáter intrusión in underground Structures, pág. 48.

Las especificaciones de infiltración para tuneles de Estados Unidos se encuentran en el orden de 10.7 a 0.4 litros por metro cuadrado para tuneles de sección pequeña. Mientras que en Países como Australia o Belgica los rangos se encuentran en el orden de 0.1 a 0.25 lt/m<sup>2</sup>, como se muestra en la Tabla 36.

Tabla 36. Flujo de agua permisible en varias ciudades de Estados Unidos, Bélgica, Australia. (Haack 1991)

Sistema ferroviario	Secciones pequeñas		Secciones grandes	
	Tasa diaria de flujo de agua (lt/m <sup>2</sup> )	Longitud de referencia (m)	Tasa diaria de flujo de agua (lt/m <sup>2</sup> )	Longitud de referencia (m)
Washington, D.C. (U.S.A.)	10.7	3.5	0.9	80
San Francisco (U.S.A.)	-	-	0.9	80
Atlanta (U.S.A.)	-	-	0.9	80
Boston (U.S.A.)	-	-	1.8	35
Baltimore (U.S.A.)	5.3	3.5	0.7	35
Buffalo (U.S.A.)	0.4	10	0.2	1.000
Melbourne (Australia)	0.25	10	0.1	1.100
Antwerp (Bélgica)	0.25	10	0.1	100

Fuente: (Nazarchuk, 2005). Water intrusion in underground Structures, pág. 46.

Seguendo los criterios del Manual de Mantenimiento y Rehabilitación de Túneles FHWA (FHWA 2005), la tasa de infiltración máxima permitida es aproximadamente 1 gpm por cada 1.000 pies de túnel, estos criterios son aplicables a los proyectos de baja California. De acuerdo (Nazarchuk, 2005), los valores de infiltración reportados en Estados Unidos se encuentran en rangos de 0,2 a 2 gpm por 100,000 pies<sup>2</sup>.

En Francia, AFTES (1989) se estableció una tasa máxima permitida de 1 lt/ día/m<sup>2</sup>, para los túneles ferroviarios con segmentos de acero.

Tabla 37. Definición de impermeabilidad para el diseño de túneles y galerías Norma UNE - 104424

Grado de impermeabilidad	Características de humedad	Utilización de la obra	Filtraciones de agua l/m <sup>2</sup> en 24 horas
1	No permitida la difusión de vapor desde el exterior.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lugares secos.</li> <li>- Locales refrigerados.</li> <li>- Presencia continua de personas.</li> <li>- Almacenes sensibles a la humedad (papel, alimentos).</li> </ul>	0
2	SECO Permitida la difusión de vapor.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instalaciones militares y locales húmedos (Baño).</li> <li>- Locales con instalación de suministro de energía (Subestaciones).</li> <li>- Locales subterráneos de uso general.</li> </ul>	0
3	SECO.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Almacenes y locales comerciales.</li> <li>- Estaciones de metro.</li> </ul>	< 0,001
4	CASI SECO.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Túneles de autopista.</li> <li>- Túneles de montaña.</li> <li>- Túneles ferroviarios de alta velocidad.</li> </ul>	< 0,01
5	Filtraciones capilares.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parqueaderos.</li> <li>- Túneles de carretera y en roca.</li> </ul>	< 0,1
6	Ligero goteo de agua.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Túneles de ferrocarril.</li> <li>- Líneas de metro.</li> </ul>	< 0,5
7	Goteo de agua.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Túneles de alcantarillado.</li> </ul>	< 1,0

Fuente: (AENOR, 2015). Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P.

## 5.8. Calificación del nivel de riesgo por irrupción de agua en un túnel - SGR.

De acuerdo con las características de infiltración, en 2009 Katibeh y Aalianvari presentaron un procedimiento para cuantificar el nivel de peligrosidad por la irrupción de agua en una excavación subterránea, el cual tiene en cuenta las propiedades de la roca e hidrogeología del macizo.

Esta metodología considera variables como la densidad y apertura de las discontinuidades, Karstificación, características de la zona afectada, esquistosidad, cabeza hidráulica sobre la excavación, permeabilidad del macizo y características de pluviosidad del área. El valor SGR se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$SGR = [(S_1 + S_2 + S_3 + S_4) + S_5]S_6 S_7 \quad (69)$$

Donde,

**S<sub>1</sub>** = Frecuencia y apertura de las discontinuidades, con valor adimensional, para un túnel en diferentes litologías se calcula analíticamente por medio de la siguiente expresión.

$$S_1 = 25 \times \left( \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i g e_i^2}{12\nu} a \right) \quad (70)$$

Donde.

- $\lambda_i$  Es la frecuencia de discontinuidades (1 / m).
- $e_i$  Es la abertura media de la discontinuidades m).
- $g$  Es la aceleración de la gravedad de la tierra (m/s<sup>2</sup>).
- $\nu$  Es la viscosidad cinemática del agua.

**S<sub>2</sub>** = Esquistosidad.

En zonas tectónicas se presentan rocas con diferentes grados de esquistosidad, donde el agua podrá infiltrarse a través de las fisuras, variando en un rangos de 1 a 5.

**S<sub>3</sub>** = Zonas de falla.

Las fracturas y fallas representan caminos por donde el agua fluirá con mayor facilidad y zonas con mayores valores de permeabilidad. Si se presentan rellenos de margas, esquistos, pizarras, etc., se presentarán disminuciones en el valor de la conductividad. En zonas de falla de rocas como caliza, la permeabilidad es muy alta. El caudal de agua está relacionado con tipo de roca y el espesor de la zona de cizalla.

Tabla 38. Factor  $S_3$  – Zonas de falla, calificación de peligrosidad de agua subterránea.

Tipo de roca	Zona de cizalla	$S_3$
Basamento arcilloso.	$C_{zw}$	$2 \times \text{Log} (10 C_{zw} \times b)$
Otros tipos de roca.	$C_{zw}$	$100 \times \text{Log} (10 C_{zw} \times b)$

Fuente: (Muhammad, 2012). Drainage Systems. Pag 84.

$b$  Es un factor (1/m).

$C_{zw}$  Es un factor de ancho o influencia de la zona de falla (m).

**$S_4$**  = Karstificación.

Esta variable se presenta cuando ocurre una disolución química y mecánica de la roca en materiales de caliza, dolomita, yeso y sal. Se presenta en estratos potentes, fracturados, en ambientes húmedos, estableciendo una morfología de cavidades y drenajes subterráneos. El flujo de agua en este tipo de macizos puede irrumpir de una manera peligrosa, de acuerdo con la grado de Karstificación,  $S_4$  se estima entre 10 y 100.

**$S_5$**  = Permeabilidad del suelo.

Si el túnel se encuentra excavado en suelos, los parámetros  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  y  $S_4$  se anulan. La permeabilidad del suelo tiene una alta importancia, un estrato de arcilla tiene del orden de  $10^{-10}$  m/s, se considera como un valor medio,  $10^{-6}$  m/s y un valor de permeabilidad alto a  $10^{-2}$  m/s.

Para rocas blandas, la tasa de infiltración de agua subterránea presenta una relación dada por la siguiente expresión:

$$S_5 = k \times c \quad (71)$$

Donde,

$K$  Es la permeabilidad del material, suelo o roca blanda (m / día).

$c$  Es un factor unitario (día / m), deja la expresión como un valor adimensional.

**$S_6$**  = Cabeza de presión de agua.

La infiltración y flujo de agua subterránea están influenciados por la cabeza hidráulica en la excavación subterránea, el valor  $S_6$  se puede determinar por medio de la expresión establecida por Muskat-Goodman, Rat-Schleiss-Lei, Karlsrud y Lombardi.

$$S_6 = \frac{H}{\text{Ln}(H \times d)} \times d \quad (72)$$

Donde,

- H Es la cabeza de agua por encima del túnel.  
 d Es el factor unitario (1 / m), la cual deja la expresión como un valor adimensional.

En el caso de un túnel excavado por encima del nivel piezométrico  $S_6$  es igual a 1.

$S_7$  = Precipitaciones.

En el escenario de una excavación en zonas no saturadas, la lluvia es el factor principal para la recarga del agua subterránea que se infiltra a través del macizo, con variaciones en la tasa de recarga y periodos de lluvia, por la intensidad, cantidad de agua lluvia y características hidráulicas del macizo, este parámetro se puede estimar por medio de la siguiente expresión.

$$S_7 = \frac{P_y}{5000} \quad S_7 \leq 1 \quad (73)$$

Donde,

$P_y$  Es lluvia anual (mm).

El valor máximo de  $S_7$  es cuando la lluvia anual es igual a 5000 mm o más.

Cuando el túnel se encuentra en la zona saturada,  $S_7 = 1$ .

Finalmente, con cada una de las variables evaluadas se calcula el valor SGR, que se relaciona con el de grado peligrosidad y el valor de irrupción de agua, como se muestra en la Tabla 39.

Tabla 39. Clasificación SGR para el ingreso de aguas subterráneas a los túneles.

SGR	Peligrosidad	Nivel	Valores Probables condiciones de infiltración en la excavación (Lt/s/m)
0 a 100	Sin peligro.	I	0 a 0.04
100 a 300	Bajo Peligro.	II	0.04 a 0.1
300 a 500	Relativamente peligrosa.	III	0.1 a 0.16
500 a 700	Peligrosa.	IV	0.16 a 0.28
700 a 1000	Altamente Peligrosa.	V	$Q > 0.28$ , infiltración de agua subterránea en zonas fisuradas, suelos, cizallas o terrenos alterados.
>1000	Critica.	VI	Infiltración de agua y lodo es altamente probable.

Fuente: (Muhammad, 2012). Drainage Systems. Pag 84.

De acuerdo con fuentes especializadas (Muhammad, 2012), hay una relación directa entre el valor SGR por irrupción de agua y las tasas de infiltración en los túneles. Cuando se presenta un valor  $> 700$  es común que se creen mezclas de lodo y agua, con un riesgo latente de estabilidad de la obra y peligro a personas y máquinas. Con tasas de infiltración  $> 0.28$  lt/seg/m, en zonas de falla o terrenos pobres se requerirán medidas de estabilización previa y mejoramiento del macizo (inyecciones).

## Capítulo VI - Control del agua en los túneles de roca.

Con la apertura de los trabajos, la cobertura y presiones in situ en el macizo del túnel se produce una redistribución en los esfuerzos de la excavación, se generan cambios en las características de resistencia y deformación de la roca.

En la Figura 111, se presentan nuevas condiciones de fracturación y permeabilidad del macizo.

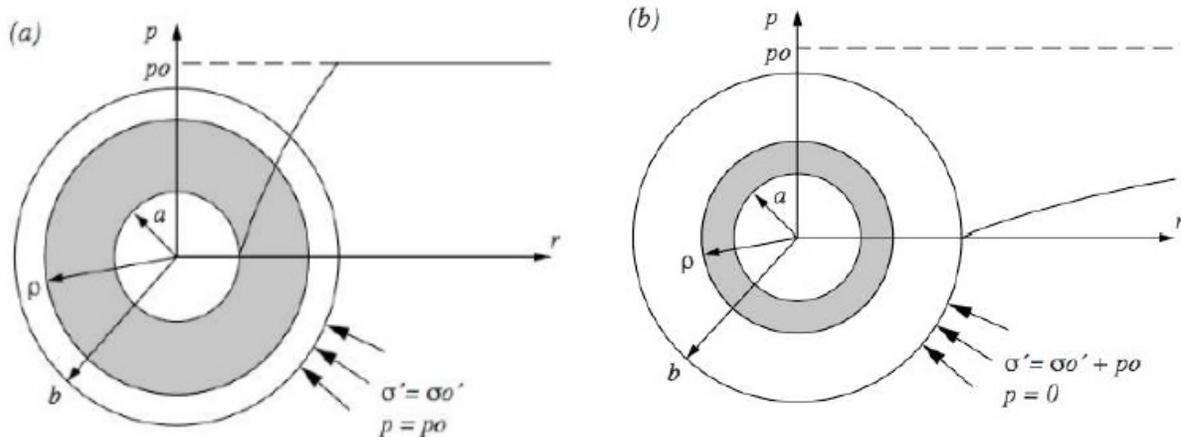


Figura 111. Extensión de la zona plástica  $p$ , distribución de la presión hidráulica. a) Permeabilidad muy baja del macizo. b) Alta permeabilidad, fracturación, sin tratamiento del terreno.

Fuente: (Anagnostou, 2006). Tunnel stability and deformations in water-bearing ground.

El agua subterránea presentara efectos en la estabilidad, en condiciones como:

- Aumento progresivo de la permeabilidad en la zona plástica, debido a la migración del agua hacia la periferia del túnel.
- Aumento de gradientes de agua en la zona plástica del túnel, asociado a procesos de lavado de materiales, pérdida de la resistencia, con desprendimientos progresivos de la roca.
- Valores de Esfuerzos adicionales, por la  $P_w$  (Presión hidráulica) en la periferia del túnel, debido a la migración del fluido hacia el contorno de la excavación.

La cantidad de agua que irrumpe en un túnel podría presentarse en los trabajos durante un tiempo prolongado o se pueden reducir a pequeños lapsos, de acuerdo con el tipo de régimen y características del sistema acuífero donde se emplaza la obra, el ingreso del agua es un fenómeno asociado a las cabezas de presión y gradientes del agua subterránea, en la Tabla 40 se presentan las características de flujo, comunes en una excavación subterránea.

Tabla 40. Tipos de flujo que ingresan a las cavidades subterráneas.

FORMA	CARACTERISTICA
Transpiración.	Agua aparece en el perímetro de la excavación, goteando en la corona de la bóveda.
Agua de Percolación.	Agua emerge desde las fracturas y grietas (aisladas o distribuidas alrededor del perímetro de la excavación).
Agua ingresando (agua tensional).	Agua en chorro desde fracturas individuales, en chorros finos, flujos concentrados, especialmente altos en Karst, normalmente descrito como agua de juntas.
Afluencia de agua	Afluencia masiva de agua, en ocasiones repentina, con coladas de barro y piedra.

Fuente: (Maidl, Thewes, & Maidl, 2014). Handbook of Túnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction.

Debido esto, con las condiciones de infiltración y contacto del agua con materiales de soporte instalados se producen daños, como se presentan en la Figura 112.



Figura 112. Daños por filtración de agua en placa de concreto, corrosión de acero instalado como refuerzo de la placa en un muro de estabilización.

Dentro de las principales afectaciones asociadas con la irrupción de agua en un túnel se encuentran:

- Asentamientos o fenómenos de subsidencia debido a cambio en la presión de poros, riesgo de daños en infraestructura superficial, vías u otro tipo de obras.
- Problemas en cimentaciones superficiales, alcantarillado y daños en la vegetación por falta de agua.
- Afectación en la recarga de pozos y manantiales, además en el sistema hidrogeológico en general.
- Vertimientos y drenajes con baja calidad del líquido, originando contaminación y daños medio ambientales.

- Cambios en la presión hidráulica del macizo por fracturamiento hidráulico, aumentando zonas debilitamiento del macizo, desmejora de la resistencia global de la excavación, filtraciones en otros puntos de la obra.
- Corrosión del revestimiento fresco, en el acero de refuerzo debido a la filtración del agua en este material. Los daños más pronunciados se presentan cuando el flujo de agua se encuentra en un rango de 3 lt / min / m (4,16 gal / min / pie). Además, provoca la erosión de los materiales de relleno de las juntas y la zona de corte o la roca.
- Para condiciones complejas se presenta una reducción en la eficiencia de los trabajadores, bajo rendimientos de avance en la excavación.
- Fisuras en el material de revestimiento del túnel, incrementos de las zonas de debilidad y juntas donde el agua podrá penetrar.
- Colmatación y lleno de cavidades por lodos o materiales en suspensión.
- Sedimentación de materiales y obras, por percolación, disolución y otros procesos de filtración.
- Cambios en la mineralogía de la roca y revestimiento.
- Humedad y corrosión de los elementos metálicos, que entren en contacto con el agua de infiltración.
- Ataques químicos, sulfatos y cloruros.

Dentro de los aspectos más desfavorables en una excavación subterránea se encuentran:

- Con la apertura y avance del frente se abren nuevos conductos donde el agua podrá acceder. Es común que al excavar en el frente de avance, debido a las condiciones hidrogeológicas y tipo de terreno se presenten filtraciones, que requerirán del empleo de un bombeo. Además, pueden presentarse inconvenientes en los procesos de perforación y voladura.
- Los terrenos de baja calidad en sistemas acuíferos de buena capacidad de almacenamiento y filtración de agua, conllevan una alta carga hidráulica, donde se puede originar inundaciones o derrumbes repentinos en las secciones excavadas.
- Para terrenos con alta infiltración pueden repercutir en retrasos de tiempo o reprogramación de la excavación, debido a bombeo o mejoramiento de las zonas inestables.

En la Figura 113, se presentan las afectaciones más comunes por la infiltración de agua hacia el túnel en terrenos de media y baja calidad.

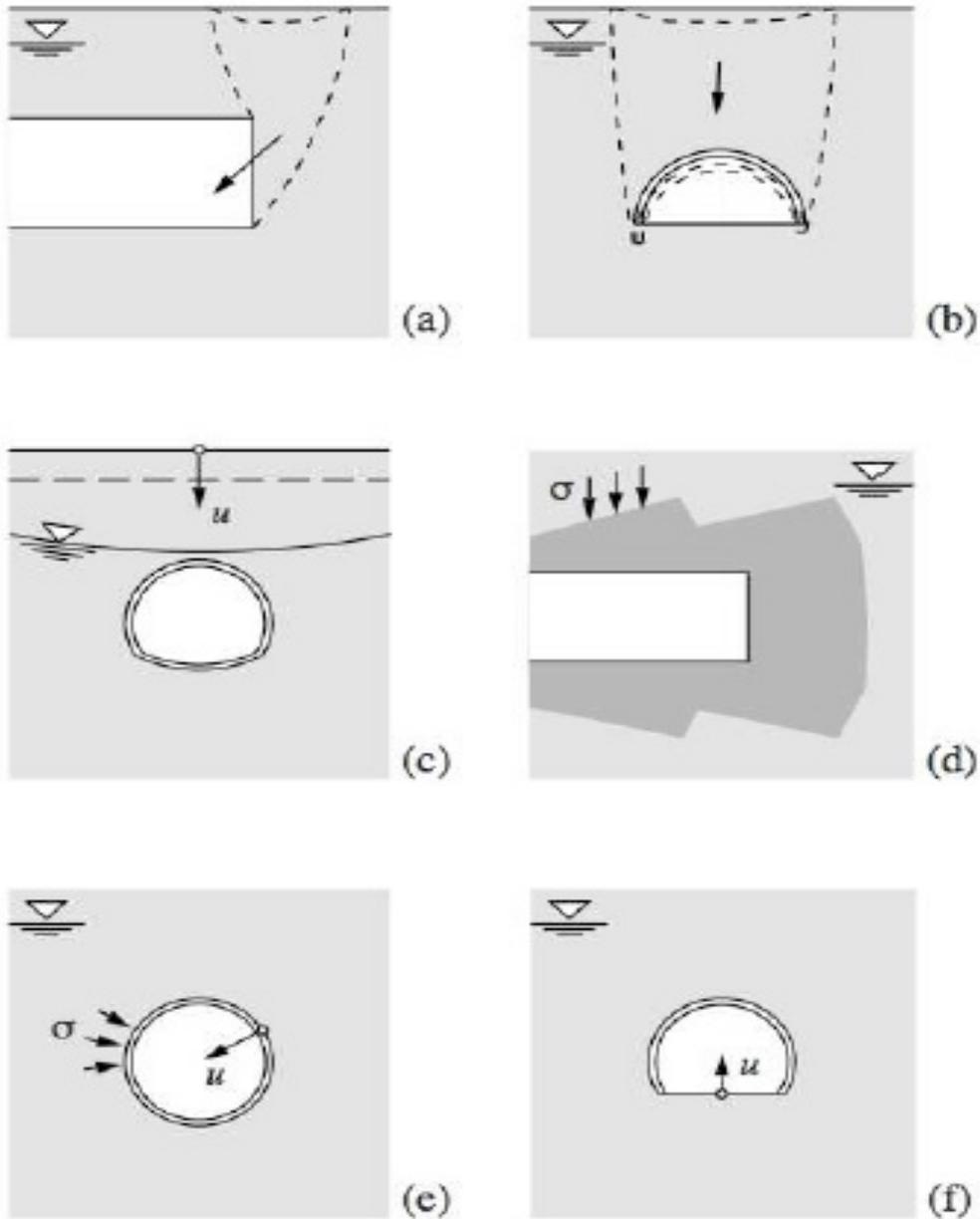


Figura 113. Afectaciones del agua en el túnel. a) Inestabilidad en el frente de avance. b) Falla en el arco del túnel. c) Subsistencia. d) Esfuerzos en la zona de mejoramiento por inyecciones. e) Presiones hidráulicas y del terreno. f) Fenómenos de hinchamiento en pisos y paredes del túnel. Fuente: (Anagnostou, 2006). Tunnel stability and deformations in water-bearing ground.

### 6.1. Control del agua en los tuneles.

Los principios básicos para el control de las irrupciones se presenta en la Figura 114; que están enfocados en dos técnicas: a) La total resistencia y hermeticidad el tunel frente al paso del agua. b) La conducción y direccionamiento del líquido quel infiltra en el tunel, donde se definen medidas de drenaje en la excavación.

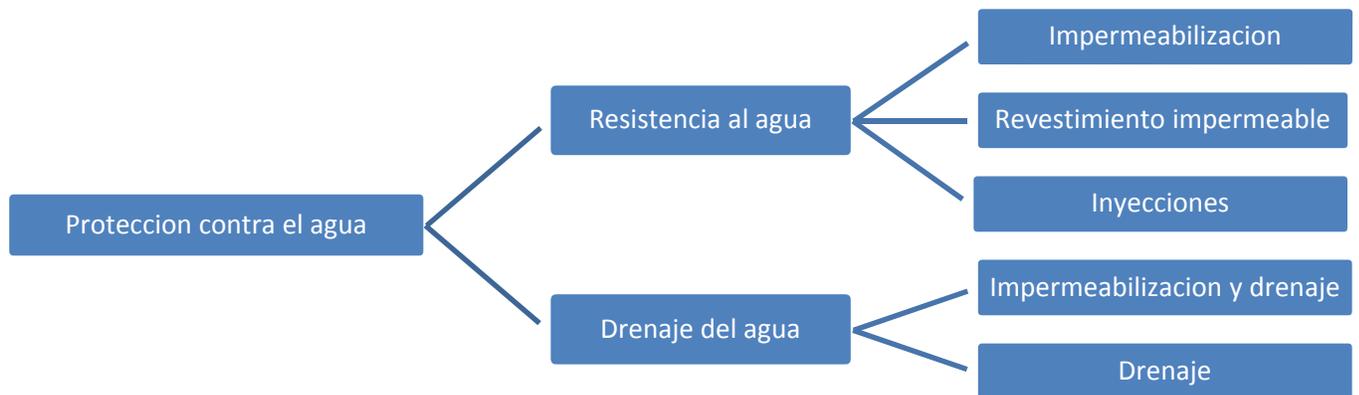


Figura 114. Principios básicos para el control del agua en túneles.

Fuente: (Maidl, Thewes, & Maidl, 2014). Handbook of Tunnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction.

Dentro de los aspectos mas relevantes para determinar la técnica mas apropiada para el control de las filtraciones se encuentran:

- Evaluar la finalidad de la obra, características de revestimiento (drenado o estanco), el nivel de importancia de la obra.
- Ubicación del proyecto frente zonas de recarga, nivel freático, otras obras de infraestructura superficiales y subterráneas.
- Profundidad o nivel de cobertura del macizo, tipos de terreno.
- Características hidrogeológicas del sistema acuífero donde se emplaza la obra.
- Afectaciones ambientales y a la calidad del agua.
- Requerimientos constructivos de acuerdo a limitaciones legales o económicas.
- Características de resistencia de los elementos instalados o los materiales en contacto, roca, suelo, hormigón, geomembranas.
- Capacidades de tensión y deformación de las estructuras protegidas, capacidad de funcionamiento, flexión de las membranas y materiales instalados.
- Resistencia frente a temperaturas o agentes corrosivos que pueden afectar la integralidad del material instalado.
- Consideraciones ambientales, en cuanto a la disolución de los materiales, principalmente frente al contacto de los elementos de revestimiento con aguas agresivas y acidas.

Para obtener un túnel estanco se deberá contar con información estructural y geotécnica sobre la carga hidráulica, tensiones térmicas, presiones del terreno, convergencias esperadas, la

contracción y dilatación del hormigón, además de la secuencia constructiva, antes de llegar a los niveles de impermeabilización requeridos.

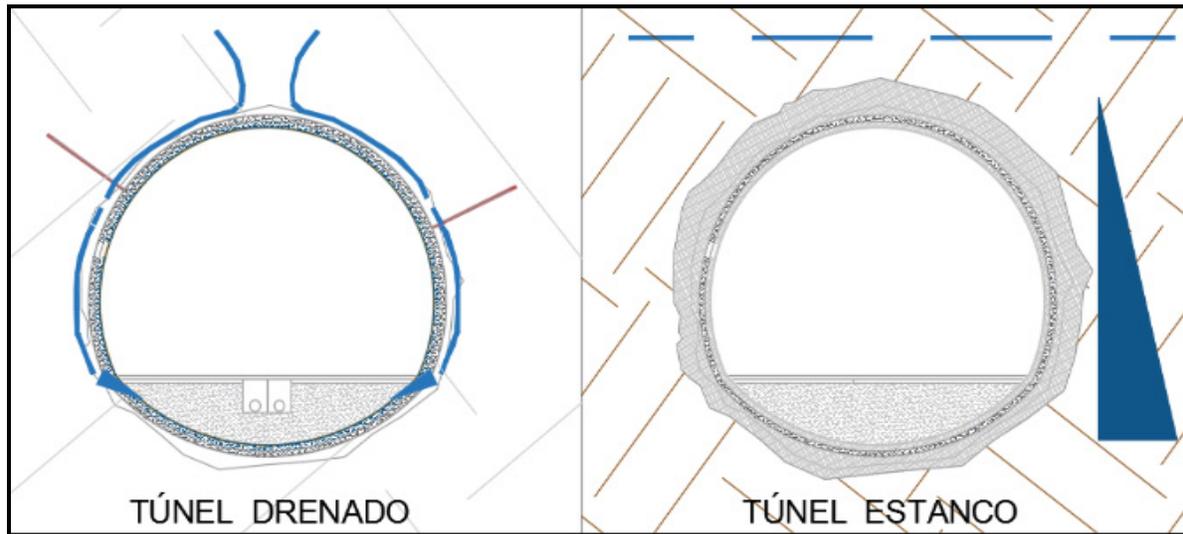


Figura 115. Características de manejo de aguas en los túneles  
Fuente: Adaptado, (BASF, 2014). Pre inyecciones de Excavación para túneles en roca.

Un túnel estanco, como se presenta en la Figura 116, requiere la instalación de soporte e impermeabilización total con geotextil, concreto y blindaje ocasional. En este caso la presión y carga hidráulica se estiman como sobrecargas y se evaluarían desde el punto de vista de esfuerzos adicionales.

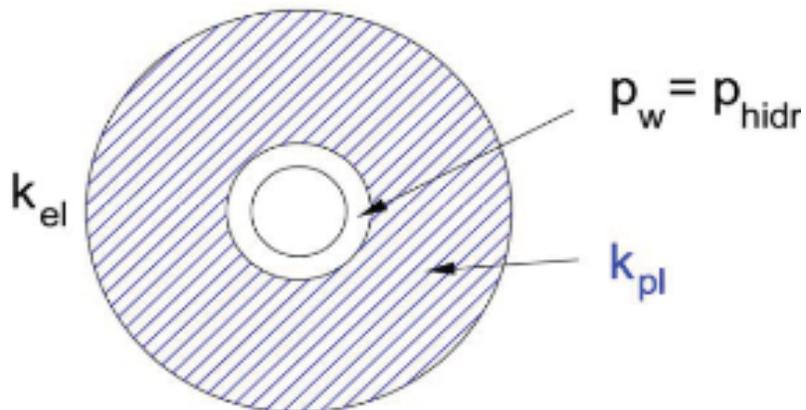


Figura 116. Túnel Estanco.  
Fuente:(Catalunya, 2010). Drenaje e impermeabilización durante la construcción y explotación de Tuneles.

Bajo este escenario se restringirá el flujo del agua, no habría lugar a un gradiente, lavado y desmejora de los materiales. El radio de la zona plástica se evaluaría solo desde el punto de vista de la estabilidad (soporte), con el requerimiento de que los materiales instalados generen la hermeticidad integral del recinto excavado.

Sin embargo, el flujo de agua se deberá evaluar en el momento de la excavación, para estabilizar el túnel e instalar las medidas de revestimiento final.

Un túnel drenado, como se muestra en la Figura 117, este tipo de técnica da la posibilidad de aliviar las presiones hidráulicas de agua y conducir el fluido para su manejo, es una medida muy común en túneles de carretera; sin embargo, podría dar lugar a un aumento de la zona plástica debido al flujo constante del agua de infiltración. En este escenario se presenta una desmejora progresiva de las propiedades del macizo.

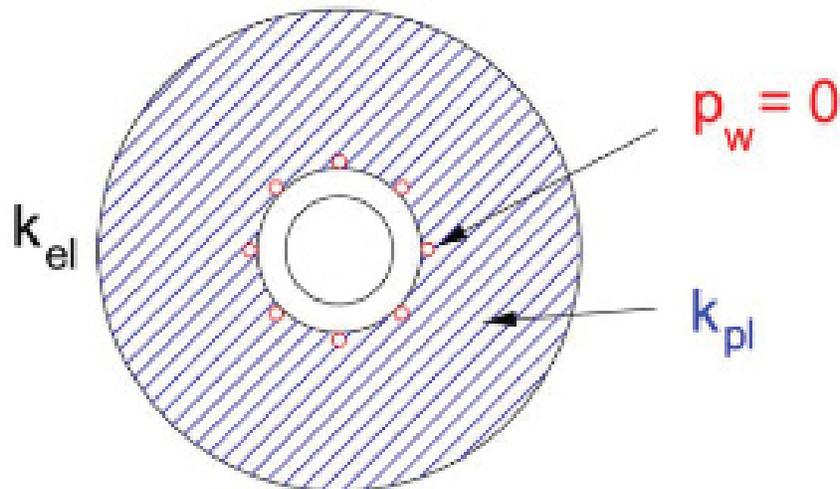


Figura 117. Túnel Drenado.

Fuente: (Catalunya, 2010). Control del agua durante la construcción y explotación de túneles.

El diseño del soporte se concentra en los esfuerzos generados por la cobertura y presiones in situ, la carga hidrostática se alivia y anula con el drenaje; requerirá mantenimiento cuando se presenten obstrucciones en los conductos de drenaje y deben contar con la capacidad suficiente de manejo de altos caudales en períodos de alta irrupción de agua.

Las medidas de inyección en túneles, como se representan en la Figura 118 y Figura 119, consisten en la penetración al macizo de soluciones químicas que mejoran sus propiedades, se ejecutan en terrenos malos, disgregados, fracturados, con escasa consolidación.

Pueden complementar otras medidas de soporte en arcos metálicos, concreto lanzado reforzado con fibra y malla.

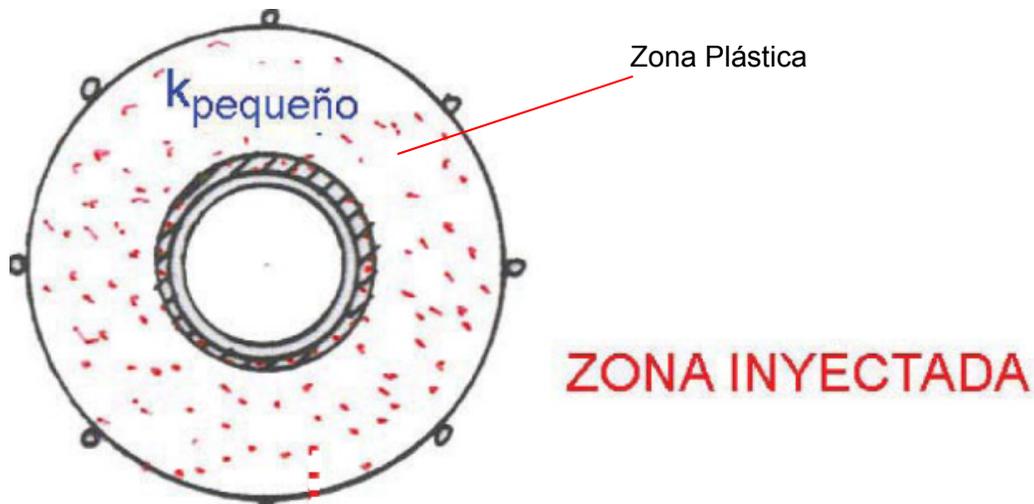


Figura 118. Túnel con inyecciones e impermeabilización parcial del revestimiento.

Fuente: (Catalunya, 2010). Drenaje e impermeabilización durante la construcción y explotación de túneles.

Si las inyecciones se infiltran efectivamente en las fisuras generaran un sellamiento e impermeabilización de la excavación, además de mejorar la resistencia de la roca, con una disminución en las presiones hacia el revestimiento.

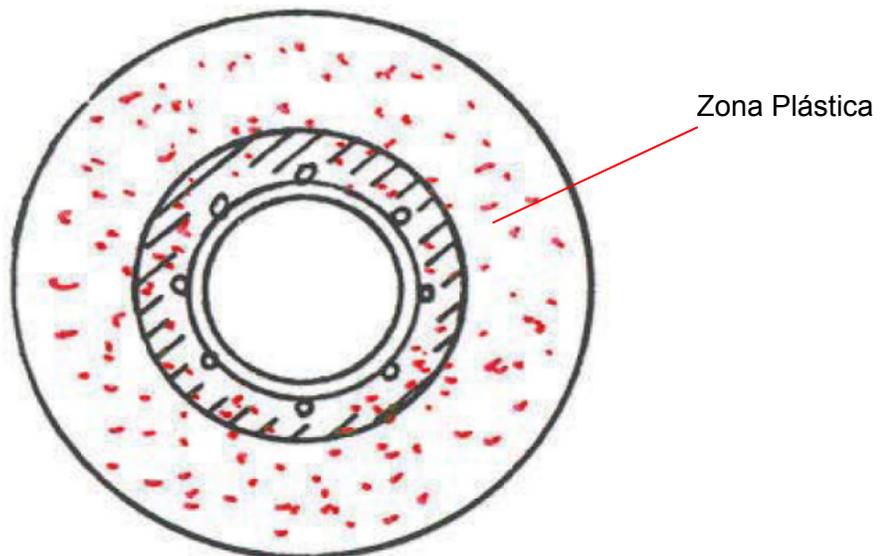


Figura 119. Túnel con drenaje e inyecciones de consolidación.

Fuente: (Catalunya, 2010). Drenaje e impermeabilización en la construcción y explotación de túneles.

Las características de las mezclas y soluciones de inyección deberán ajustarse a la mineralogía de la roca y apertura de las discontinuidades.

Tabla 41. Medidas de control del agua en los túneles.

Medida	Característica
Canal de drenaje.	Eliminación de aguas subterráneas, percolación, aguas superficiales originarias de la excavación del túnel. (Desagüe Abierto).
Perforación de drenaje.	Perforación de alivio de la presión estática del agua.
Túnel de drenaje.	Puede ser ejecutado tanto en superficie como en el interior del macizo (para taludes y flujos de agua en las juntas), atravesando la sección final de los trabajos y obstruirlos lo menos posible.
Lanzas de vacío.	Aplicación de presión negativa para generar un gradiente de presión que equilibre e impida el paso del flujo; con la eliminación del agua retenida en el suelo por acción capilar, se puede combinar con inyecciones químicas para mejorar el macizo
Aire comprimido trabajado / soporte hidrostático.	Estabilización de agua en el macizo o suelo.
Lechada o congelamiento del macizo.	Sellado del agua.

Fuente: (Maidl, Thewes, & Maidl, 2014). Handbook of Tunnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction.

## 6.2. Elementos o sistemas de drenaje.

Para mitigar las presiones hidráulicas y direccionar el agua, se pueden aplicar técnicas de drenaje, en la Figura 120 se muestran las características constructivas de una solución tradicional drenada para el manejo del agua, y que a continuación se describen con más detalle.

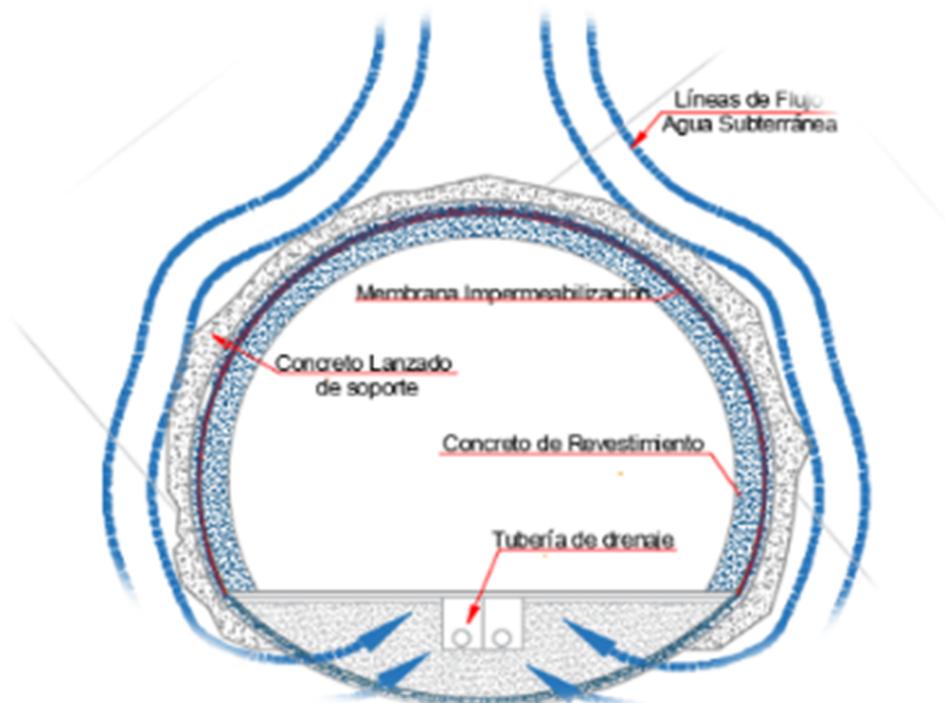


Figura 120. Sistema control del agua, solución drenada.  
Fuente: Adaptado, (BASF, 2014). Pre inyecciones de Excavación para túneles en roca.

### 6.2.1. Características del revestimiento.

Una capa de revestimiento permanente debe ser mínimo de 25 cm, en concretos reforzados y con aditivos de mejoramiento y control de permeabilidad el grosor deberá tener como mínimo 35 cm, con juntas de exposición espaciadas cada 8 a 12 m, de acuerdo (ITA 1988), las especificaciones de diseño estructural para el revestimiento instalado deberán encontrarse en los siguientes rangos:

- Espesor de 8 in (20 cm), si el revestimiento no está reforzado.
- Espesor de 10 pulgadas (25 cm), si el revestimiento está reforzado.
- En 12 pulgadas (30 cm) para hormigón de un túnel estanco.

El refuerzo puede generar problemas de colocación y compatibilidad debido a fenómenos como corrosión, durabilidad o deformación, el refuerzo de malla en el revestimiento es una opción para el control de grietas; además de refuerzo y control de los aspectos de estabilidad, el espesor del recubrimiento debe seguir las siguientes recomendaciones:

- Grosor de 3.0 cm en la superficie exterior, si se establece como una membrana impermeable.
- Espesores entre 5.0 cm-6.0 cm si está directamente en contacto con la rocas y las aguas subterráneas.
- Entre 4.0 cm-5.0 cm en la superficie interna del túnel.
- En 5.0 cm para la solera y donde el agua puede ser agresiva.

El hormigón proyectado como revestimiento inicial proporciona un refuerzo y estabilidad al macizo, se define como una medida temporal.

Cuando el revestimiento en hormigón es final, debe ser sellado en sus juntas con el fin de hacer frente a las fuerzas hidrostáticas, en general, estos materiales debido a los fenómenos de convergencia sufren agrietamientos y se vuelven materiales semipermeables. En caso de grandes presiones de agua se pueden instalar válvulas de descompresión.

Las capas de revestimiento temporal y definitivo conducen las infiltraciones que van ingresando lateralmente desde el macizo hacia el interior del túnel, a través de tubos perforados longitudinalmente al final de las láminas. A partir de estos tubos se conducen hasta un drenaje colector principal que dirige el agua al exterior de la obra, en la Figura 121 se presenta el esquema

de la entrega desde las membranas y capas hacia el drenaje colector lateral. En este proceso de drenaje es común la utilización de hormigón o grava porosa como un material filtrante.

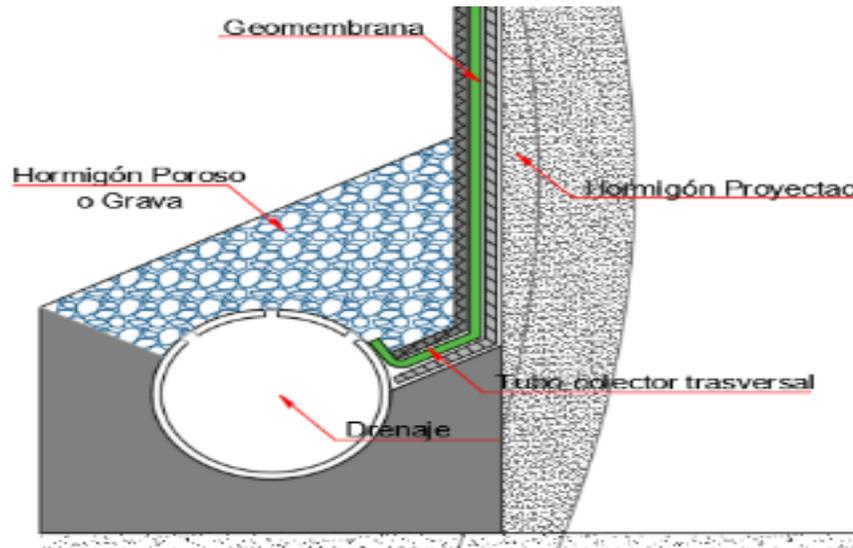


Figura 121. Sistemas de control y drenaje del túnel  
Fuente: Adaptado. Manual de Túneles y Obras subterráneas. (Jimeno, 1997)

La geometría y características de los drenes laterales y sistemas colectores principales se encuentran en función del caudal estimado, con una separación que permita la inspección y mantenimiento, las conexiones del sistema serán de polietileno.



Figura 122. Conexiones desde las membranas, drenes laterales hacia el colector principal.  
Fuente: (SCT, 2016). Manual de diseño y construcción de túneles en carretera, pág. 11.

Además, hacia la zona del colector se construyen pozos para la acumulación del agua, que facilita el mantenimiento y limpieza de todo el sistema, las dimensiones variaran de acuerdo a las necesidades y características del mantenimiento. En la Figura 123 se representa el sistema de pozo de drenaje, con la instalación de rejillas en la parte superior de la obra, conectados longitudinalmente con el sistema colector principal del túnel.

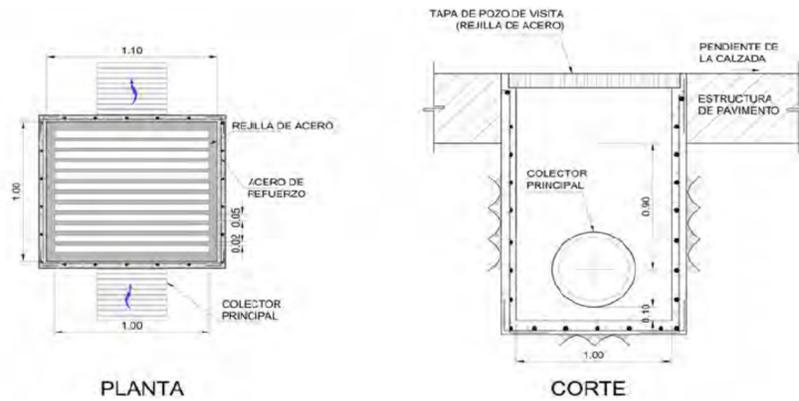


Figura 123. Características del pozo, conexión con el sistema colector principal del túnel.  
Fuente: (SCT, 2016). Manual de diseño y construcción de túneles en carretera, pág. 14.

Para los túneles en viales en caso de que el pozo se encuentre en medio de la calzada de la vía, la tapa deberá ser resistente para soportar el peso de vehículos.

### 6.2.2. Sistema Obershasli

Este sistema se enfoca en direccionar el agua de infiltración que va irrumpiendo en el contorno del túnel, mediante drenajes en formas de espigas, que se forman en las caras expuestas de los hastiales del túnel. Y posteriormente se aplican sistemas de impermeabilización primaria con Geotextiles y membranas de impermeabilización flexibles, ver Figura 122.

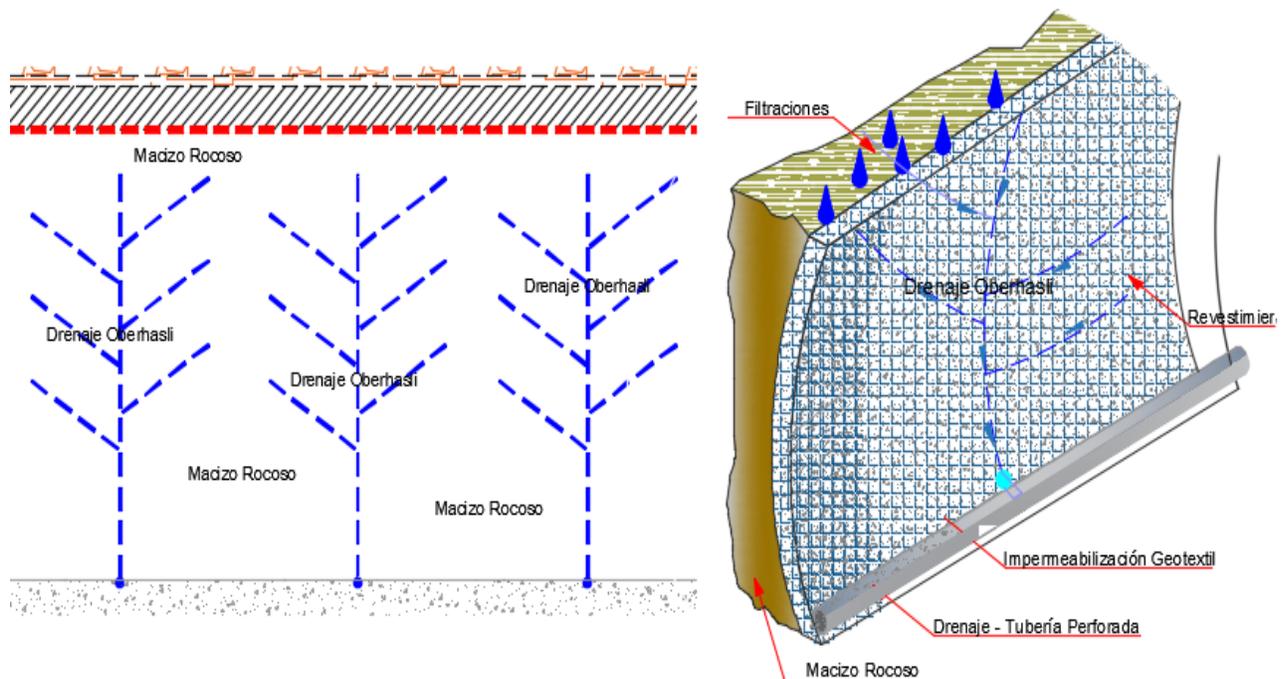


Figura 124. Sistema Obershasli para drenaje de Túneles  
Fuente: Adaptado, (Rivas & Rey, 2005). Sistema Impermeabilización Posterior de Túneles y Galerías

Las uniones entre los conductos de drenaje del sistema Oberhasli y cunetas longitudinales, se construyen de una forma particular para permitir las actividades de mantenimiento e inspección posterior durante la operación del túnel.

### 6.2.3. Perforaciones de alivio.

El drenaje previo a la excavación de túneles es una técnica muy utilizada para reducir el nivel freático, perforando el macizo y evacuando el agua antes de su irrupción en la excavación.

El drenaje se puede realizar mediante paraguas sistemáticos de drenaje a los hastiales y en la corona del túnel o incluso mediante galerías laterales o transversales.

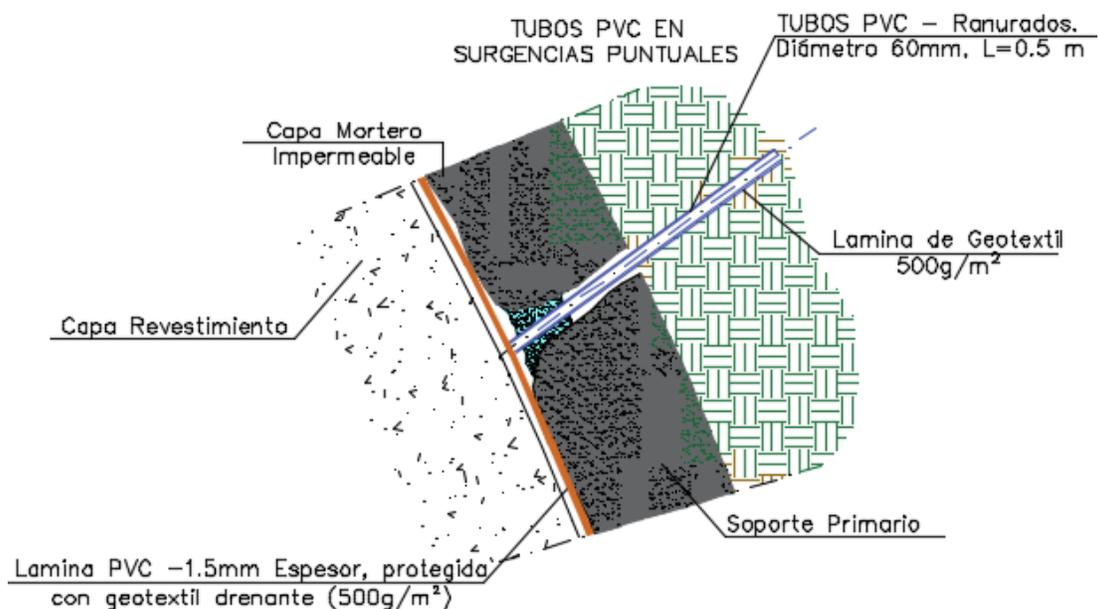


Figura 125. Técnicas de control de surgencias puntuales en un túnel.

En las zonas donde la irrupción de agua sea continua y no se pueda bloquear el paso definido del agua se podrán instalar sistemas tipo válvulas para la despresurización y control del agua, el esquema de estos sistemas se representa en la Figura 125.

### 6.3. Impermeabilización de tuneles.

De acuerdo con las condiciones del terreno y características del proyecto se deben establecer medidas de revestimiento, durabilidad y resistencia de los materiales que se utilicen como soporte, además de las medidas que se requieran para impedir el paso del agua en el interior de las cavernas.

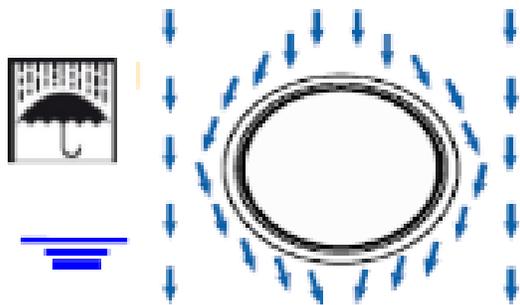
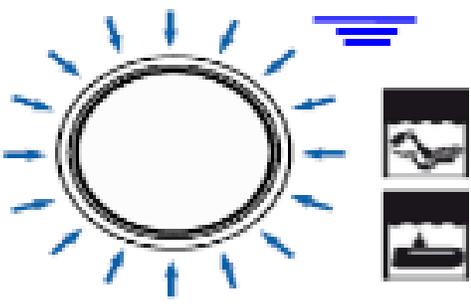
Las diferentes técnicas de impermeabilización en túneles se han desarrollado a partir de experiencia en la industria de la construcción, en ocasiones se pasan por alto las condiciones rigurosas del ambiente bajo tierra, su incidencia en los equipos y características de encerramiento donde se desarrollan este tipo de obras.

Dentro de las medidas para la hermetización del túnel se encuentran las membranas impermeables, concretos, bitúmenes, inyecciones, blindajes, entre otras. Con diferentes características de expansibilidad, resistencia para esfuerzos e impactos generados durante los trabajos de excavación, además de las deformaciones y presiones generadas al revestimiento por el macizo.

A continuación, se presentan los principios básicos de protección de un túnel contra la entrada de humedad o agua:

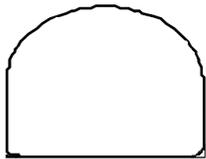
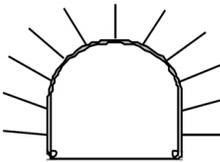
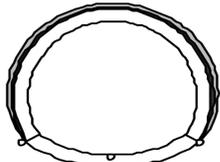
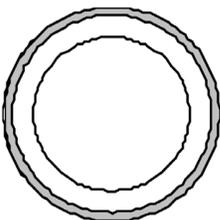
- Resistir el agua a presión sin drenaje (resistente al agua).
- Drenaje a presión regulada.
- Libre drenaje.

Tabla 42. Selección de impermeabilización debido al tipo de infiltración.

ID	Agua de infiltración Vertical - Sistema de impermeabilización tipo Paraguas.	Agua a presión - Sistema de Impermeabilización en todo el contorno de la excavación.
TIPO		
CARACTERÍSTICAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor Costo de revestimiento.</li> <li>• Reducción de espesor de hormigón.</li> <li>• Altos costos de Mantenimiento.</li> <li>• Conceptos de drenaje permanente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor Costo de revestimiento.</li> <li>• Presión de agua ejerce carga a tener en cuenta en diseño.</li> <li>• Bajo costo de mantenimiento.</li> <li>• No hay influencia de agua después de la construcción.</li> <li>• Sistema de impermeabilización de alto nivel</li> </ul>

Fuente: SIKA, Túneles y Obras Subterráneas.

Tabla 43. Escenarios típicos de la impermeabilización y control de agua en túneles.

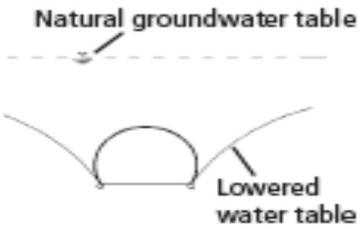
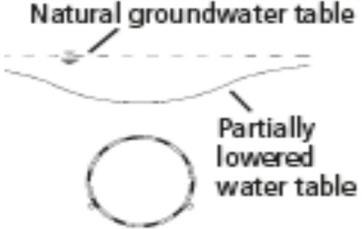
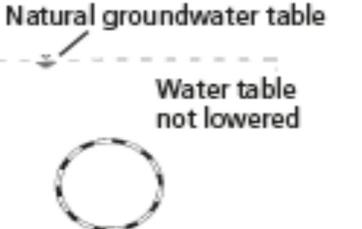
Situación	Clase	Presión agua - Mpa	Sistema de control	Nivel Impermeabilización	Geología Asociada	Proyectos	Observación
	A	0	No se requiere medidas de revestimiento. Túneles secos.	Ninguna	Macizos de buena calidad o rocas masivas, sistemas acuíferos pobres con escasa capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.	Mineros, viales, hidráulicos	No se requiere medidas de revestimiento y control del agua.
	B	< 0.1	Revestimiento completo en la corona del túnel, concreto lanzado o armado, drenaje simple.	Parcial	Buena calidad, rocas masivas, sistemas acuíferos pobres con baja capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.	Mineros, viales, hidráulicos	Impermeabilización y control del agua por razones funcionales, requiere medidas de mantenimiento e inspección.
	C	0.1 - 0.3	Inyecciones sistemáticas, revestimiento en concreto lanzado con malla o fibras, drenaje lateral.	Parcial	Terrenos de calidad mediana a baja, zonas alteradas, acuíferos con mediana capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.	Viales, hidráulicos	Medidas de mejoramiento del terreno, control y manejo del agua por cunetas
	D	0.3 - 0.5	Concreto lanzado, con membranas, sistemas con doble drenaje en la solera del túnel.	Parcial	Baja calidad, zonas alteradas, acuíferos de mediana capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.	Hidráulicos, científicos, almacenes	Sellado limitado del agua, en sistemas de control mixtos, requieren medidas de mantenimiento e inspección
	E	> 0.5	Revestimiento de membrana y concreto (o hormigón proyectado).	Total	Baja calidad, zonas alteradas, acuíferos de alta capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.	Hidráulicos, científicos, almacenes	Sellamiento completo para la entrada del agua. Sin abatimiento del nivel piezométrico.

Fuente: Elaboración Propia.

### 6.3.1. Sistemas básicos de impermeabilización parcial de túneles.

Las diferentes técnicas utilizadas para el manejo del agua tendrán efectos en la geometría del túnel y en las técnicas de construcción, que se muestran en la Tabla 44.

Tabla 44. Sistemas básicos de manejo de agua e impermeabilización de los túneles

Drenaje Libre	Drenaje a presión regulada	Sin drenaje
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descenso pronunciado del nivel de agua del acuífero.</li> <li>• Con el drenaje se genera alivio de la presión de agua.</li> <li>• La cantidad de agua drenada no se puede regular.</li> <li>• Impermeabilización contra el agua no presurizada.</li> <li>• Estructuralmente alcance ilimitado en su aplicación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descenso parcial del nivel del agua en el acuífero.</li> <li>• Medidas de impermeabilización reducida.</li> <li>• Estructuralmente alcance ilimitado en su aplicación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin descenso en el nivel del agua dentro del acuífero.</li> <li>• Sin medidas de drenaje de agua en el túnel.</li> <li>• Medidas de Impermeabilización contra la presión de agua natural.</li> <li>• Estructuralmente de aplicación limitado.</li> </ul>

Fuente: (Maidl, Thewes, & Maidl, 2014). Handbook of Tunnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction.

Las técnicas de manejo de agua sin drenaje o impermeabilización total tienen la ventaja de no generar un desequilibrio y descenso de los niveles piezométricos originales del acuífero; sin embargo, las presiones hidrostáticas y del macizo serán mayores, con secciones de los elementos de sostenimiento más robustos y de mayor complejidad para las obras. En la ejecución de proyectos se ha encontrado que estas medidas son idealizadas y se encuentran fugas de agua, lo que requiere mantenimiento y cuando se necesita una total hermetización de los túneles, estas medidas resultan costosas.

Debido a esta circunstancia se podrían definir medidas de drenaje a presión regulada, la cual genera un descenso parcial del nivel piezométrico, que puede ser regulado con una válvula, manteniendo el nivel de agua en los niveles requeridos. El sistema constructivo y de manejo del agua tiene como ventajas el escaso mantenimiento requerido. Sin embargo, las técnicas de construcción del túnel con estas especificaciones son complejas desde el inicio del proyecto, al igual que su costo.

Los túneles construidos con el sistema de drenaje libre, como el que se presenta en la Figura 126, cuentan con impermeabilización en paraguas, proporcionan un costo bajo en la construcción y manejo del agua desde el principio del proyecto, ya que no requieren medidas complejas de impermeabilización y sistemas de membranas o revestimiento para la presión de agua. Sin embargo, presenta desventajas en cuanto a los impactos ambientales por el abatimiento del agua subterránea y el mantenimiento del sistema.

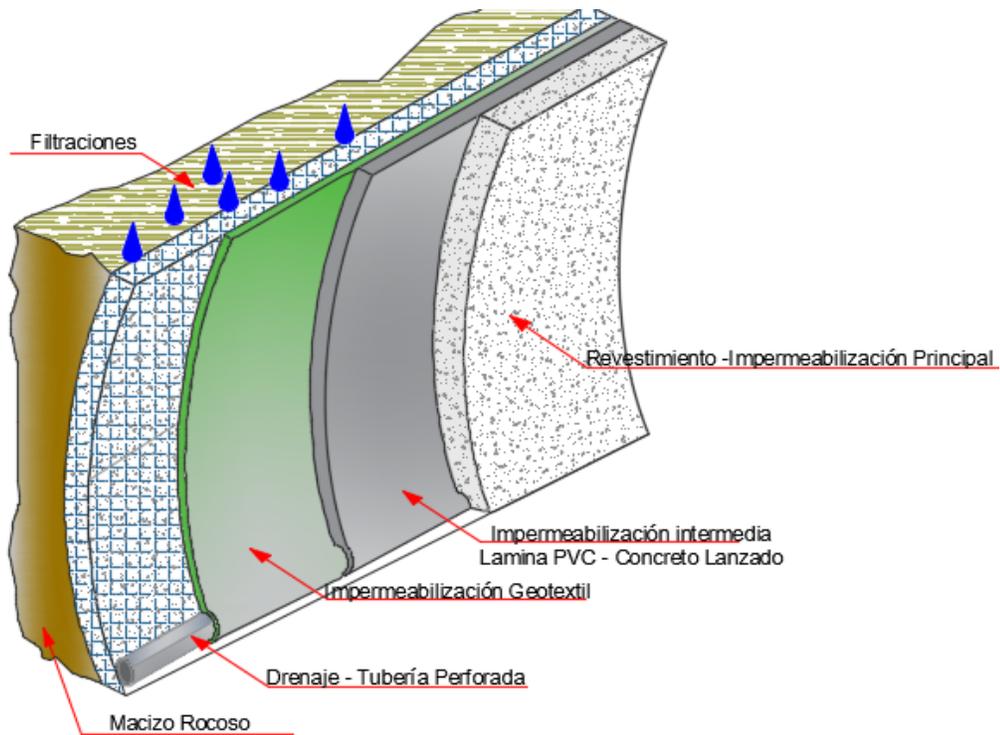


Figura 126. Características y perfil típico de la impermeabilización principal en el túnel.  
Fuente: (Jimeno, 1997). Adaptado. Manual de Túneles y Obras subterráneas.

### 6.3.2. Categorías de impermeabilización.

A. Peduzzi, presenta diferentes niveles de impermeabilización, de acuerdo con su complejidad e importancia. Estas medidas permiten hacer un control de aguas subterráneas tanto en excavación, como en construcción y operación de los túneles.

- Impermeabilización primaria
- Impermeabilización secundaria
- Mantenimiento y reparación de las obras de impermeabilización.

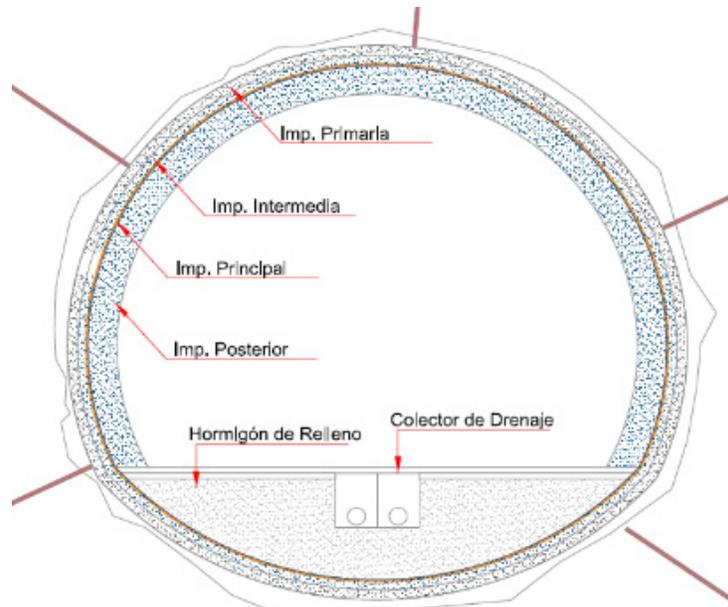


Figura 127. Características de los niveles de impermeabilización de túneles.  
Fuente: Adaptado. Manual de Túneles y Obras subterráneas. (Jimeno, 1997)

En la Tabla 45, se describen las características de los sistemas de impermeabilización y los criterios de selección para su incorporación a la obra.

Tabla 45. Selección del sistema de impermeabilización subterráneo

ID	Membrana Impermeabilizante – Geometría	Cabeza presión hidrostática por encima de la solera del túnel en m	Ataque químico concreto (tipo de exposición)		Requiere Medidas Adicionales		
			Débil, moderada	Fuerte	Bandas de Impermeabilización		Sistemas de Inyección integrados
					Interna	Externa	
1	Paraguas	Sin agua estancada	Membrana de 2 mm	-	No	No	No
2			Concreto impermeabilizante Especial	-	Presente, dependiendo del sistema	No	No
3	Todo el contorno	Hasta Aprox 30	-	Membrana de 2 mm	No	No	No
4			Membrana de 3 mm		No	Si	Si
5			Concreto impermeabilizante Especial	-	Presente, dependiendo del sistema	No	No
6			Concreto impermeabilizante + membranas 3 mm		No	Si	Si
7			2 Capas de membrana (lado de la roca 3mm + zonas de aire 2mm)		No	Si	Si

Fuente: (Maidl, Thewes, & Maidl, Handbook of Tunnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction, 2014).

Impermeabilización preliminar.

Se ejecuta seguido a la apertura y avance de la excavación, para dar un control temporal al agua que irrumpe en la obra. De acuerdo con la complejidad del proyecto y requerimientos de seguridad las actividades de impermeabilización podrían consistir en:

- Sistema Oberhasli para conducción del agua de infiltración.
- Mejoramiento del terreno con inyecciones de consolidación.
- Concreto lanzado como revestimiento primario.
- Instalación de capas de geomembranas.

Estas medidas pueden ser únicas o complementarse de acuerdo a los niveles de filtración y problemas de estabilidad asociados, donde se instalarán capas adicionales de elementos de soporte o conducción del agua.

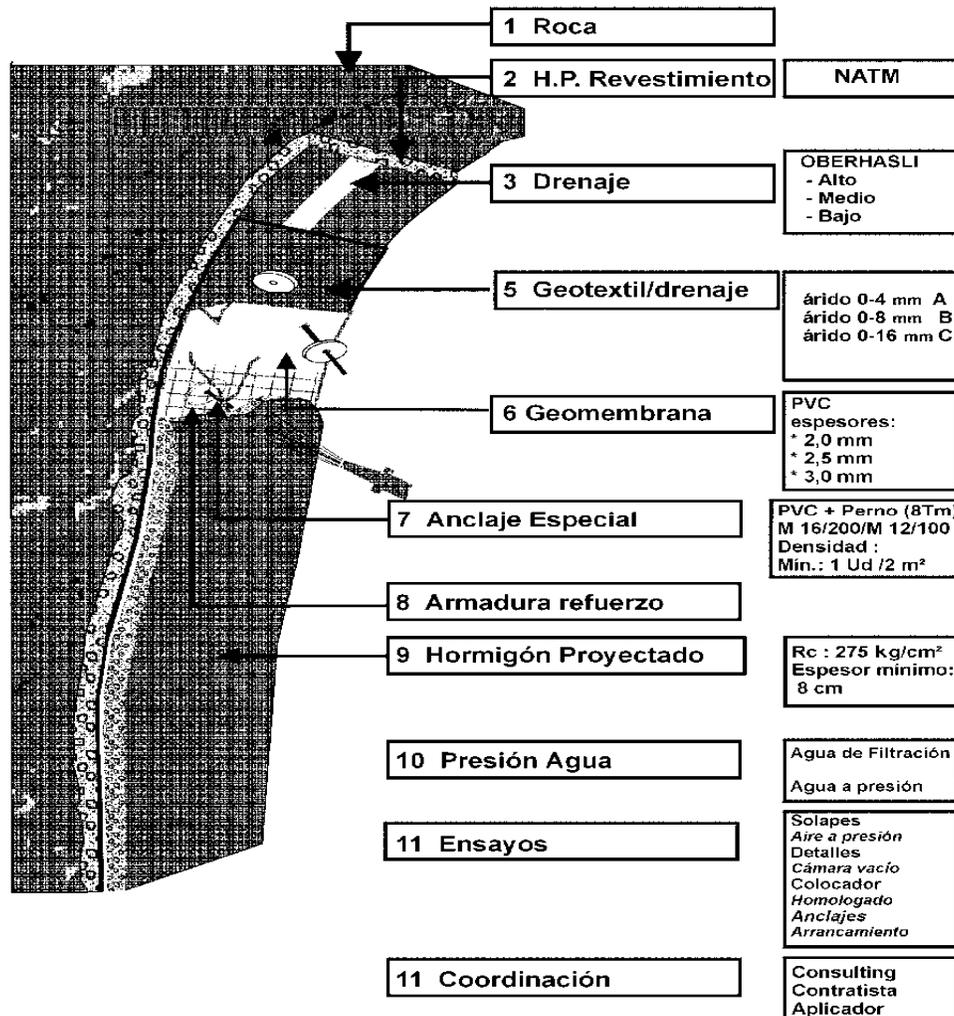


Figura 128. Características y perfil típico de la impermeabilización principal en el túnel.

Fuente: (Norma UNE 104424, 2015).

### Impermeabilización Intermedia.

Las técnicas consisten en la proyección de hormigón en las diferentes zonas expuestas del túnel para generar un grado de estabilización y uniformidad de la excavación, con el fin de preparar las condiciones de soporte para instalar y definir las medidas de impermeabilización principal.

Estas técnicas son importantes para generar una superficie acorde para los elementos de impermeabilización posterior.

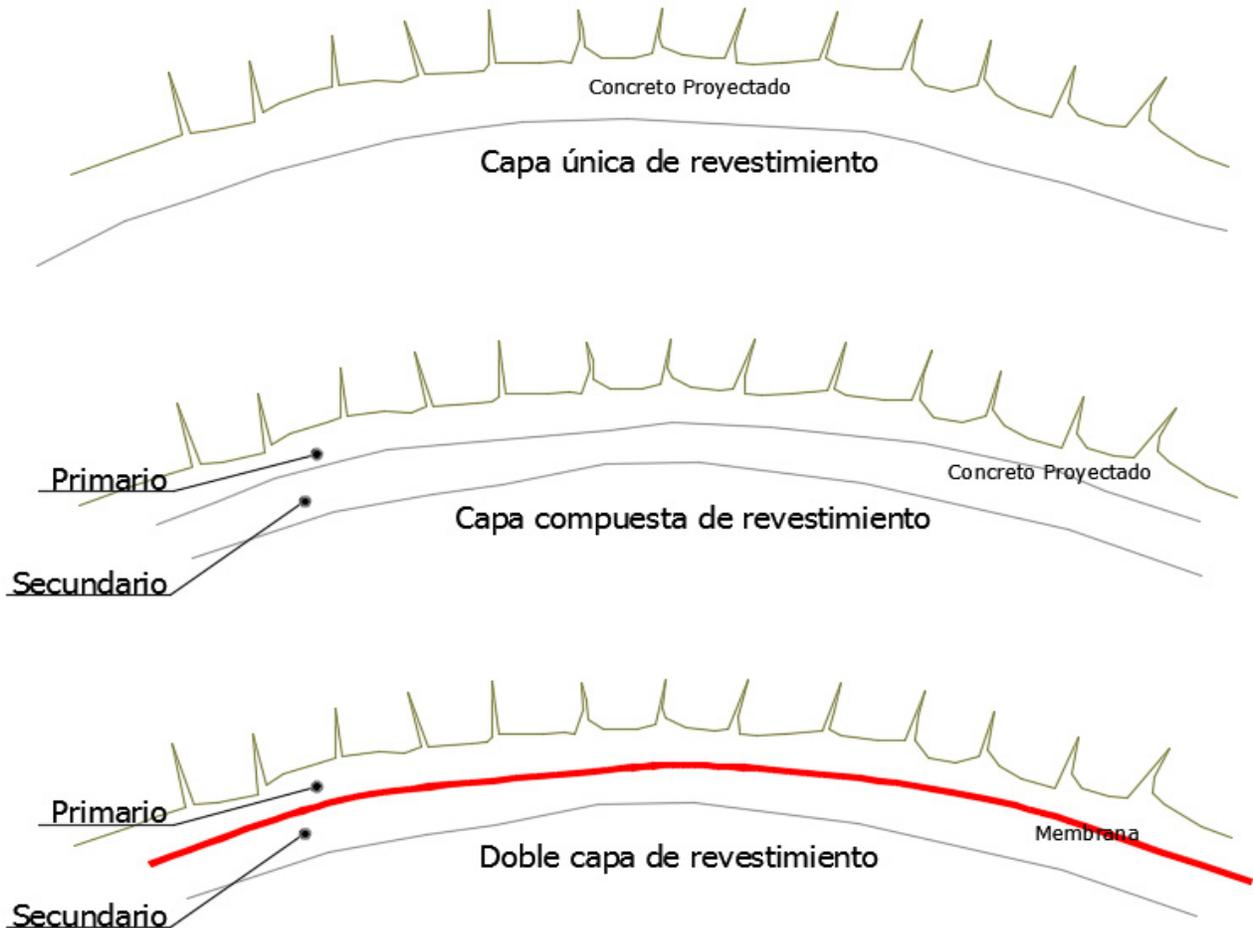


Figura 129. Configuraciones típicas de revestimiento de túneles.  
Fuente: (Thomas, 2009). Sprayed Concrete Lined Tunnels.

### Impermeabilización Principal.

Después de realizar los trabajos temporales con la apertura de nuevos tramos del túnel se procede al armado y construcción de elementos de impermeabilización definitivos, que presentaran características como:

- Materiales en concreto impermeable con mezclas mejoradas para restringir el paso del agua, instalación de juntas de bloques con sellado de polímeros y materiales que eviten cualquier filtración.
- En zonas más sensibles dentro de la excavaciones subterráneas (cruzadas, túneles de escape, almacenes, portales) construcciones con concreto de un mayor grosor, en elementos armados con estructuras que establezca la sección final de la obra.
- Membranas impermeabilizantes de polímeros, en rollos de asfaltos o materiales plásticos, o derivados de asfalto, como elementos geosintéticos.
- Instalación de productos vía o en spray, en soluciones cementicias de concreto y productos químicos pulverizados para generar las capas de revestimiento, que hacia las zonas más exteriores expuestas del túnel presentarán una mayor restricción al paso del agua.
- Impermeabilización con materiales metálicos y armaduras armadas, de acuerdo con las necesidades del proyecto y características del macizo natural.
- Sistemas mixtos, denominados sándwich, las medidas de impermeabilización o drenaje del agua se define entre el sostenimiento provisional y el revestimiento de hormigón, un esquema típico de este tipo de técnica se muestra en la Figura 130.

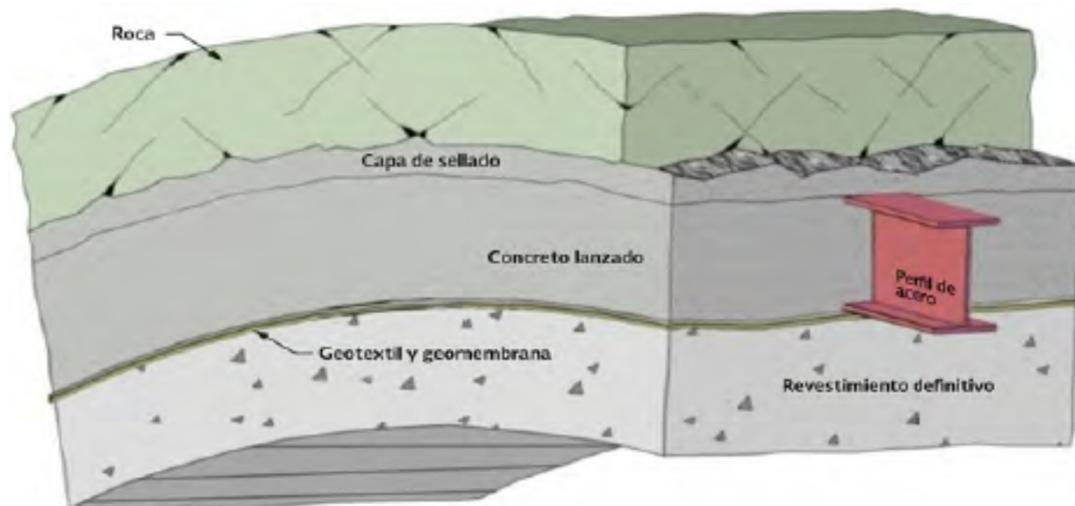


Figura 130. Sistema de impermeabilización en túneles (en sándwich).  
Fuente: (SCT, 2016). Manual diseño y construcción de túneles en carretera, Cap. 12 - pág. 2

### Técnicas de mantenimiento o reparación de las obras de impermeabilización.

Con el fin de garantizar la vida útil de los materiales y equipos, además de la seguridad al personal, es necesario planificar trabajos de mantenimiento y reparación a los elementos de control y manejo del agua.

Estos trabajos se definen de acuerdo con las condiciones de los macizos o nivel de importancia de la obra en actividades enfocadas a reparar condiciones como:

- Daños en las membranas impermeabilizantes, punzonamiento y corte de los elementos debido a los esfuerzos del macizo y convergencias del túnel.
- Fisuración y agrietamiento del concreto instalado.
- Lavado de los materiales de inyección previamente vertidos al macizo.

Las reparaciones se podrán ejecutar por medio de mangueras que inyecten las soluciones cementicias o impregnen el concreto en las fracturas expuestas.

En zonas donde el daño al concreto o membrana ha sido extremo, requerirá el levantamiento del bloque construido y la instalación de nuevos componentes y capas de revestimiento instaladas.

### Impermeabilización temporal.

Cuando se está realizando el avance de los trabajos subterráneos se realizan medidas temporales de servicio a los túneles en función de las condiciones hidrogeológicas y las particularidades del proyecto.

#### 6.3.3. Requerimientos de los elementos en el proceso constructivo.

Los materiales tendrán que cumplir aspectos mecánicos, físicos, para la seguridad y salud de los trabajadores, así como normativas para las obras, destacando los siguientes características:

- Geometría variable de la superficie de soporte, como lo es el macizo natural a los cuales los elementos de impermeabilización tendrán que ajustarse.
- Elementos de base o cama entre las capas impermeabilizantes que sirvan de protección contra daños mecánicos o químicos.
- Elementos de impermeabilización que se puedan ajustar a mantenimientos y reparaciones, por divisiones en compartimientos y de fácil localización.

- Características de reparación, para ajustar los daños establecidos en la etapa de construcción y operación del túnel.
- Armado y colocación de diferentes capas de impermeabilización, o en su defecto una capa, de confiable verificación y funcionalidad.
- Materiales libres de defectos, si son materiales tipo rollos, con verificación y unión de la unión en las tiras individuales de las costuras en ambas direcciones, con una ejecución fácil y fiable.
- Adaptabilidad a la estructura, por ejemplo en los bordes, ranuras y esquinas.
- Construcción sencilla de las juntas de trabajo y movimiento.
- Posibilidad de prefabricación y proceso simple y clara para colgar y la aplicación, instalación sencilla en el sitio de construcción.
- Posibilidad de trabajar paralelamente con otras actividades constructivas del túnel.
- Posibilidad de verificación y ensayos con el método adecuado.
- Establecer registros donde se describa el sistema de impermeabilización, su especificación técnica, materiales, elementos utilizados, responsables, actividades de inspección por parte del contratante.
- Características de garantía para los productos impermeables instalados, dichas especificaciones deberán adaptarse con el desarrollo de tecnologías en la construcción de túneles, revestimientos de hormigón proyectado o el uso de hormigón proyectado con fibra para las capas de soporte externas e internas, evitando reacciones álcali y fenómenos de disolución.

#### 6.3.4. Características en el diseño de los elementos de impermeabilización.

Los sistemas de impermeabilización son dependientes de las técnicas constructivas, deberán tenerse en cuenta los espacios estrechos de las obras subterráneas, a continuación se presentan las pautas más relevantes en el diseño de la estructura de control y manejo del agua.

- Los detalles constructivos no pueden dejarse en manos de los fabricantes de elementos de impermeabilización ya que la profundidad acerca del proyecto, geología, características del agua subterránea la tienen los diseñadores.
- Se debe partir del hecho de que los contratistas no conocen todos los detalles de los procesos constructivos, se deberán establecer procedimientos de trabajo y los materiales, para tener la certeza de que las obras se realicen siguiendo los diseños. Así mismo, se debe llevar a

cabo una inspección constante y verificación de la eficiencia de los materiales incorporados en la obra.

- Se debe tener en cuenta que los procesos constructivos tienen influencia sobre las cargas y rendimientos de los materiales, la contracción de las juntas, conexiones y elementos de impermeabilización.
- Se recomienda definir gráficos y diseños de detalle completos, con las especificaciones para su seguimiento y análisis directamente en la obra.

#### 6.3.5. Requisitos para el personal y medio ambiente.

La contaminación ambiental en diferentes proyectos y los accidentes ocurridos en túneles ferroviarios durante la operación demuestran la necesidad de generar medidas para evitar:

- Humedad y filtraciones en la vía de paso de equipos y vehículos.
- Superficies de oxidación y oscurecimiento de la carretera.
- Emisión de contaminantes desde las zonas del túnel hasta los suelos y zonas en superficie.
- Contaminación de aguas subterráneas.
- Reducción de los niveles piezométricos.
- Alteración de los procesos de carga y descarga del sistema acuífero.

#### 6.4. Materiales y elementos de impermeabilización.

Los materiales utilizados en las obras de impermeabilización se encuentran categorizados de acuerdo con sus propiedades físicas. En la Figura 131 se representan los diferentes materiales utilizados en los procesos de impermeabilización y manejo de agua en los túneles. Las técnicas de impermeabilización del túnel se clasifican en estructuras:

- Rígidas.
- Flexibles.

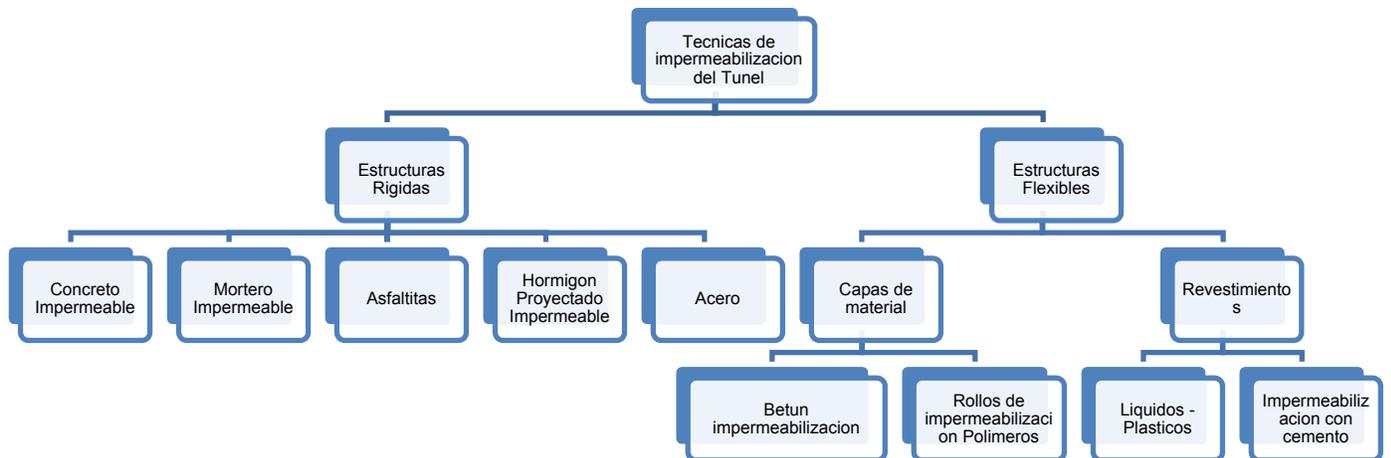


Figura 131. Sistemas de Impermeabilización de Túneles, de acuerdo a los materiales.

Fuente: (Maidl, Thewes, & Maidl, Handbook of Tunnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction, 2014).

#### 6.4.1. Concreto Impermeable.

El concreto es un compuesto de agregados, cemento y agua, sus propiedades resultan de la interacción física y química de sus constituyentes, las proporciones más comunes de los diferentes elementos se representan en la Figura 132, dichas relaciones variaran de acuerdo al destino de material, condiciones de trabajabilidad y propiedades de los materiales de la mezcla.

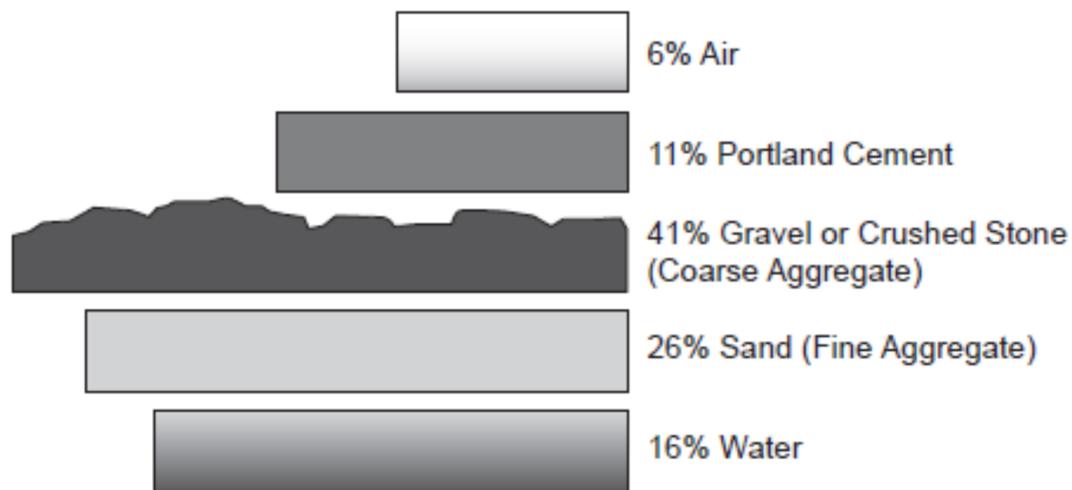


Figura 132. Proporciones de materiales en el concreto

Fuente: USA. (Society for Mining, 2011). Concrete for Underground Structures

#### Cementante.

Este material actúa como aglutinante en la mezcla, su función se enfoca en la unión de los diferentes materiales y partículas de agregados que se mezclan, tiene un fraguado hidráulico que lo hace parcialmente responsable de las propiedades mecánicas del concreto endurecido.

### Agregados.

Estos materiales constituyen entre el 60 a 75% del volumen total de la mezcla de concreto, los constituyentes químicos y el origen geológico del agregado darán una fuerte influencia en las propiedades del concreto endurecido, dentro de las funciones encaminadas para este constituyente de la mezcla se encuentran:

- Parámetros que determinan el requerimiento de agua.
- Llenante de menor costo en la mezcla de concreto.
- Obtención de propiedades mecánicas (resistencia a la tensión, flexión y resistencia a compresión).
- Fuerte influencia en la manejabilidad de la mezcla (formas de las partículas y finos).
- Alta influencia en la durabilidad requerida (porosidad y pureza).

### Agua.

La proporción en la mezcla total se encuentra entre el 7 y el 20%, dependiendo del tamaño, gradación, calidad de los agregados y aditivos empleados. La consistencia medida por asentamiento en el cono de Abrams debe situarse entre 4 y 10 centímetros (consistencia fluida), para dar la manejabilidad adecuada para los equipos mecánicos de bombeo.

El líquido debe encontrarse libre de sustancias nocivas, con el fin de evitar ataques químicos al acero o al concreto, se deben tener en cuenta compuestos de cloruro o sulfatos en valores máximos de concentración de:

- Cloruros expresados en ion Cl 6.000 ppm.
- Sulfatos expresados en ion SO<sup>-</sup> 41000 ppm.

### Características del concreto.

Durante la instalación de este material es usual su vertimiento por capas, en el caso de una filtración se puede reparar con un revestimiento adicional. Sin embargo, las filtraciones no se pueden evitar en su totalidad. El mínimo espesor recomendado para el concreto en los túneles estará en el orden de 50 a 60 mm.

Para los casos en los que la impermeabilización con concreto sea única, sin material o técnica complementaria, se debe tener en cuenta:

- La carga o presión de agua no debe exceder los 50 m.
- Respaldos y zonas adyacentes al túnel no deben contener materiales agresivos o que pueden generar solubilidad y pérdida del material de revestimiento.
- Se puede prevenir el agrietamiento estructural, con la predicción del tamaño de las grietas y generando en el concreto flexibilidad mediante el empleo de fibras o refuerzo de mallas.

El hormigón deberá soportar esfuerzos y momentos, un agrietamiento repercutirá en una condición de seguridad inadecuada, debido a la posibilidad de filtración, corrosión y deterioro del elemento de concreto desde su interior. Por esto, las secciones y juntas de los bloques de hormigón deben diseñarse para evitar las grietas de contracción. Además, no se deben generar irregularidades y superficies ásperas en la capa exterior. Dentro de las lechadas de refuerzo y mejoramiento de las capas de concreto se incluyen las lechadas en cal, betún, láminas y capas de mortero. En las juntas de trabajo que no se puedan evitar se deben generar parches o tiras de impermeabilización en acero e instalados posterior a la colocación y curado del mortero.

Como se muestra en la Figura 133, la profundidad y grado de infiltración disminuye con el endurecimiento del concreto, lo cual podría presentarse con agregados densos y compactos, además, con aditivos que aceleran el curado del concreto.

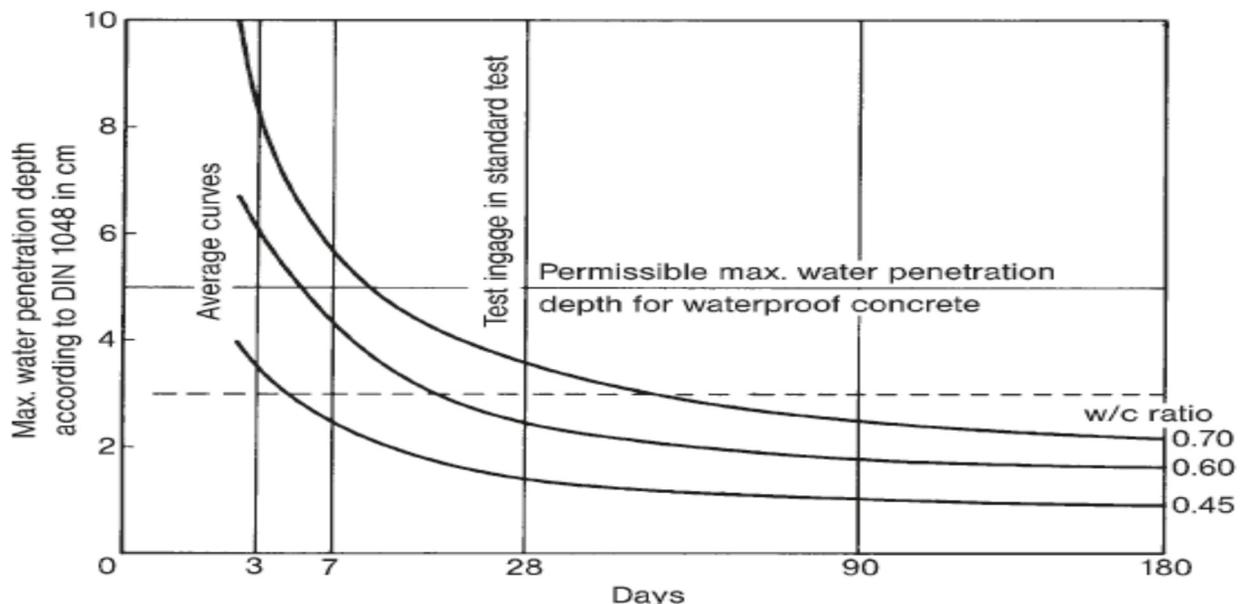


Figura 133. Filtración de agua en los especímenes de concreto con respecto a la edad del concreto. Handbook of Tunnel Engineering II, Basics and Additional Services for Design and Construction.

Los aditivos impermeabilizantes están ligados en función del cerramiento de poros, la reducción de la capilaridad de succión, plastificantes y agentes incorporadores de aire.

### Concreto resistente al agua, aditivos o resinas.

Las obras de ingeniería subterránea y su objetivo frente al control del agua solicitan materiales de calidades especiales, en el concreto sus propiedades se miden en aspectos como la resistencia, módulo de elasticidad, densidad, permeabilidad, absorción, ion cloruros, coeficientes de difusión, carbonatación y abrasión.

Este tipo de material es complementado sintéticamente por polímeros o resinas con la mezcla del mortero, que generan ciertas características de resistencia e impermeabilidad al material.

Con variaciones en la mezcla de agregados se podrán conseguir ventajas operativas, en los equipos que se emplean en el rociado del mortero, además de una mayor velocidad en su instalación y tiempo de secado.

Los aditivos en las mezclas se dosifican según el peso o volumen del cemento, se adicionan en un rango variable entre 0.5% y 6%, es decir, en cantidades de 2 kg/m<sup>3</sup> a 30 kg/m<sup>3</sup>. Estos materiales son agregados en el concreto durante su mezclado en planta, justo después de la medición inicial de agua. Como excepción encontramos acelerantes del fraguado que se adicionan inmediatamente antes del lanzado, de acuerdo a la norma ASTM C494, se pueden clasificar los aditivos en:

- **Tipo A / Reductor de agua:** permite disminuir la cantidad de agua para obtener determinada consistencia del concreto.
- **Tipo B / Retardador:** posterga el fraguado del concreto.
- **Tipo C / Acelerante:** aditivo que acelera el fraguado del concreto y la ganancia de resistencia.
- **Tipo D / Reductor de agua-retardador:** permite disminuir la cantidad de agua para obtener determinada consistencia (acción primaria) y además retarda el fraguado del concreto (acción secundaria).
- **Tipo E / Reductor de agua - acelerante:** aditivo que acepta reducir la cantidad de agua necesaria para conseguir determinada consistencia del concreto (acción primaria) y acelera el fraguado y la ganancia de resistencias (acción secundaria).
- **Tipo F / Reductor de agua de alto poder:** es aquel que permite reducir en más del 12% la cantidad de agua de amasado requerida para obtener determinada consistencia del concreto
- **Tipo G / Reductor de agua de alto poder y retardador:** posibilita reducir en más del 12% la cantidad de agua de amasado requerida para lograr determinada consistencia del concreto (acción primaria) y además retarda el fraguado (acción secundaria).

El hormigón no puede lograr una total impermeabilización, el fisuramiento por contracción, curado y deformaciones en el túnel pueden generar filtraciones y conductos para el paso del agua, como se muestran en la Figura 134. El calor por hidratación en el proceso de fraguado puede generar agrietamiento temprano, además contracción y encogimiento por pérdida de agua en procesos de evaporación.

Se debe tener cuidado en su colocación ya que de esta dependerá la calidad del material impermeabilizante, además, estos morteros en general no son resistentes a incendios y podrían representar riesgos si entran en contacto con llamas.

A continuación, se presentan las principales características en las adiciones usuales de las mezclas de concreto de alta calidad.

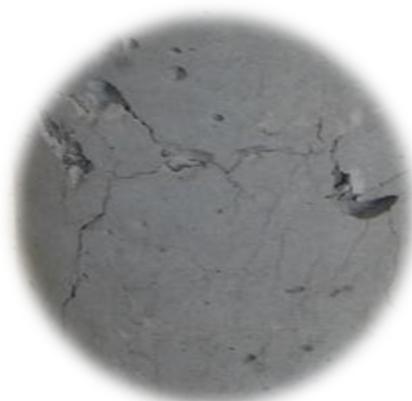


Figura 134. Grietas en el concreto  
Fuente: Elaboración propia.

#### Aditivos impermeabilizantes.

Los agregados de la mezcla del concreto, características constructivas durante la elaboración variaran la cantidad de vacíos en el material, la cual presenta rango entre el 7 al 20%, que generan los conductos internos para el paso del agua.

Los materiales aditivos se enfocan en cerrar la red porosa del material, sellando y densificando la red granular de agregados.

La medición de la penetración se realiza bajo los criterios de la norma NTC 4483 para la medición de la infiltración del agua en el concreto.



Figura 135. Medición de la infiltración de agua en el Concreto.  
Fuente: El autor.

Las características de los aditivos para la disminución de la permeabilidad son:

- Bloqueo de la red porosa en el concreto
- Incorporación de aire que interrumpe la formación de capilares

Las características de los aditivos impermeabilizantes, proporciones de uso y ejemplo en ensayos a probetas de concreto utilizado en túneles se presenta con mayor detalle en el capítulo de ensayos de laboratorio.

### Fibras.

De acuerdo con el material que las compone se clasifican en metálicas, sintéticas y naturales. Según sus dimensiones se clasifican en microfibras y macro fibras. En general, las macro fibras se utilizan para incrementar la ductilidad del concreto, mejorar la resistencia al impacto y reducir la propagación de las grietas; mientras que las microfibras se emplean para mejorar las propiedades de contracción inicial y aumentar la resistencia al fuego.

### Elaboración del concreto en los túneles.

Después de la elaboración de la mezcla de concreto se deberán mantener las condiciones de humedad en el material el mayor tiempo posible, generando un proceso de curado eficiente del material, como mínimo se deberá mantener húmedo el material 7 días.

En los túneles es usual la instalación de placas de encofrado para dar las características geométricas requeridas en la excavación, las cuales se incorporan en la periferia del túnel, luego se retiran y se rocían con agua las superficies del concreto para mantener su humedad.

Así mismo, se podrán incorporar bloques de concreto pre construidos, que pueden ser hidratados y tratados previamente para asegurar las características de resistencia, durabilidad y permeabilidad del material.

Los equipos de encofrado se encuentran equipados con superficies tubulares o cónicas de plástico, que se desatornillan después del armado del hormigón, además en la juntas del encofrado se aplican sellos de cemento a prueba de agua, en el encofrado de unidades cerradas se utilizan vibradores para mejorar la homogeneidad de las mezclas y evitar burbujas.

En la Figura 136, se representan los elementos de encofrado en la construcción de concreto para los túneles y formación de la geometría requerida.



Figura 136. Características de la logística para la colocación del concreto in situ.  
Fuente: (AMITOS, Descripción General del espacio Subterráneo, 2011, págs. 1 -91)

#### 6.4.2. Material de Bitumen o Asfalto.

Este material de origen orgánico, oscuro, semisólido, de buena resistencia frente ataques ácidos, sales y álcalis, ha sido utilizado por mucho tiempo. Se instala seguido de un revestimiento interno de cemento, podría adicionarse con minerales o caucho para generar propiedades de elasticidad adicional.

El material bituminoso tiene buenos efectos de impermeabilización, aporta características de resistencia y suele mezclarse con textiles o fibras. Se consigue en el mercado en presentación

de rodillo de bitumen con metal (lana, Yute), en incrustaciones con aluminio o láminas de cobre corrugado para generar características de elongación, además de membranas impermeabilizantes tipo polímero. Entre algunos materiales que se presentan en el mercado se encuentran:

- Fielros: Material impregnado con betún, sin capas de recubrimiento de este material y que se le denomina "Tela Asfáltica", en un gramaje común de 500g/m<sup>2</sup>.
- Capas de bitumen con aplicación en caliente, materiales de impermeabilización de betún con una capa de cobertura en uno o dos lados de aproximadamente 1.5 a 2.5 mm de grosor, complementando con materiales de fibra de vidrio, yute o polímeros, bandas de metal o láminas de plástico, aplicadas en caliente.
- Betún Látex, se mezcla este material con caucho de látex en proporción del 15 al 20% de este último en relación al volumen total, los cuales generan características de elasticidad, generando una capa o lamina de plástico.

Otro uso para este tipo de materiales en las obras subterráneas es el de aplicación en zonas de grietas o juntas, con pinceles o en forma de pintura del revestimiento, que establece un apoyo o complemento para el soporte principal de los trabajos. Este material suele complementarse con polvo de roca, asfalto, fibras de amianto, aplicadas en caliente, generando una masa viscosa que puede ser colocada como una capa impermeable mínimo de 8mm de espesor, pero solo teniendo importancia en actividades de reparación.

#### Instalación del material de Bitumen.

Las diferentes técnicas de construcción y colocación varían de acuerdo al uso (impermeabilización preliminar, principal o mantenimientos), el soporte y la membrana de impermeabilización están pintadas con adhesivo bituminoso entre 180 a 200 °C, con un consumo o gramaje entre 2 a 4 Kg/m<sup>2</sup>.

Otro tipo de colocación se realiza con capas betún enrolladas, se instalan a temperaturas de 200°C, se presionan para generar una adecuada colocación, aunque el proceso es laborioso, es confiable cuando se realiza de forma adecuada.

La aplicación de las mezclas de betún - látex se realiza como una mezcla pulverizada en capas de 2 a 3 mm, en capas sucesivas de 5 a 15 mm, estos polvos se mezclan en el aire, en forma de una capa cerrada en la pared, en el que se adiciona agua para generar una pasta interna.

Se puede realizar proceso de flameado o adherencia por fusión, lo cual requerirá capas de betún - asfalto lo suficientemente gruesas (1.5 - 2 mm), posterior a la colocación de la capa el material se calienta con un soplete. Sin embargo, se debe tener cuidado con los riesgos que este proceso conlleva y más en recintos confinados como los túneles.



Figura 137. Técnicas antiguas de aplicación del Bitumen como revestimiento de túneles.  
Fuente: (ITACET, 2012, pág. 25). Manejo de Agua en Túneles.

Este material impermeabilizante presenta unas desventajas debido a las complejidades de apoyo y perfiles requeridos en su colocación, además, las técnicas constructivas son susceptibles de dañar fácilmente el material, presenta riesgos frente altas temperaturas e incendios, pudiéndose deshacer fácilmente las capas. Además requiere personal altamente capacitado.

#### 6.4.3. Capas impermeabilizantes de polímeros – Membranas.

Son materiales de polímeros, con propiedades de resistencia a la tensión, alta deformación de rotura e impermeables, entre los compuestos más utilizados en los trabajos de tunelería se encuentran:

- Copolimero de etileno y betún modificado (BCE).
- Polietileno (PE).
- Polisobutileno. (PIB).
- Cloruro de polivinilo blando (PVC).
- Resinas de poliéster insaturado (UP).
- Resina epoxi (EP).
- Poliuretano (PUR).

Tabla 46. Características de las membranas impermeabilizantes.

Característica	Und.	Mínimo según UNE 104424	PVC	POLIOFELINAS
Espesor Nominal.	mm	> 2	2	2
Resistencia a la tracción.	Mpa	> 15	> 17	> 44
Alargamiento a rotura.	%.	> 300	> 300	> 800
Plegado a baja temperatura.	A -20 °C	Sin fisuras	Sin fisuras	Sin fisuras
Resistencia al desgarro.	N	> 60N	> 80	> 128
Comportamiento al calor.	%	< 2	-	-
Envejecimiento térmico.	%	< 1	-	-
Resistencia a percusión.	Altura mm	> 750	> 1100	> 3000 N (CBR)
Comportamiento al fuego.	-	Auto extingible	-	B1/B2
Resistencia microorganismos.	-	Resistente	Resistente	Resistente
Resistencia a las raíces.	-	Resistente	Resistente	Resistente

Fuente: (AENOR, 2015). Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P

### Instalación.

Los pasos para la instalación varían de acuerdo al uso y destino (impermeabilización preliminar, principal o mantenimientos), la secuencia constructiva habitual para la construcción e instalación de membranas en túneles es:

- Capas de soporte exterior, concreto u acero, para la estabilización del macizo.
- Láminas de protección en geotextiles.
- Membranas de impermeabilización.
- Revestimiento interior.

Una capa inicial de geosintéticos se coloca en los respaldos, hastiales y claves del túnel, la cual protegerá las membranas posteriores frente a reacciones químicas de la roca, además contra irregularidades en la superficie de la excavación y que pudieren generar cortes en el material.

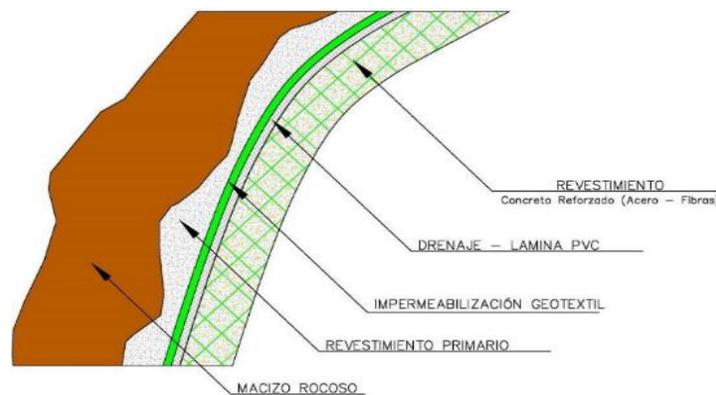


Figura 138. Características en la impermeabilización con membranas

Fuente: Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels — Civil Elements

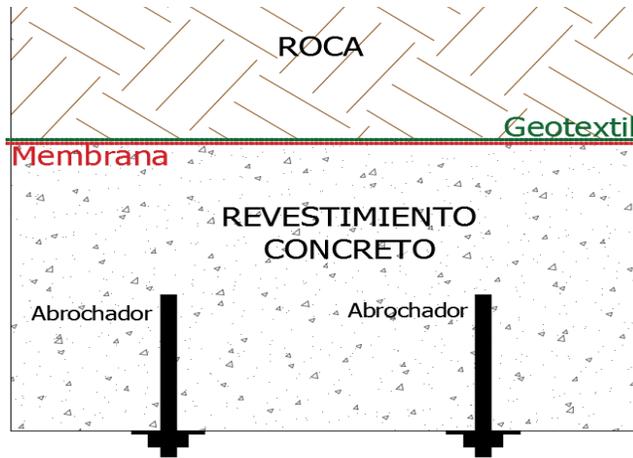


Figura 139. Impermeabilización con membrana de plástico de una sola capa en los lados y la corona.

Esta capa se fija con arandelas de acero de 20 mm de diámetro, en la corona del túnel se reducen los elementos de fijación, en caso de que la sección sea asimétrica o irregular las arandelas se instalan en los puntos más profundos para que la membrana no se rompa o las fijaciones se salgan, además la capa externa no requiere costuras soldadas, sino que deben ser solapadas.



Figura 140. Elementos de fijación, soldadura y anclaje de la membrana al macizo  
Fuente: Adaptado, (AENOR, 2015). . Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P

En zonas de alta convergencia se recomiendan espesores menores a 3 mm en la membrana, en bóvedas profundas los puntos de fijación por metro cuadrado será de 1 en los lados y 2 a 3 en las coronas.

Las tiras o láminas prefabricadas deberán traslaparse en sus bordes, por lo menos 5 cm, con costuras soldadas dobles, en 15 mm de ancho y fijadas por una máquina de soldar automática, durante el armado y construcción del revestimiento del túnel se deberá evitar la dilatación por

filtración del agua subterránea del macizo, la cual podrá estirar y romper las membranas en este paso constructivo.

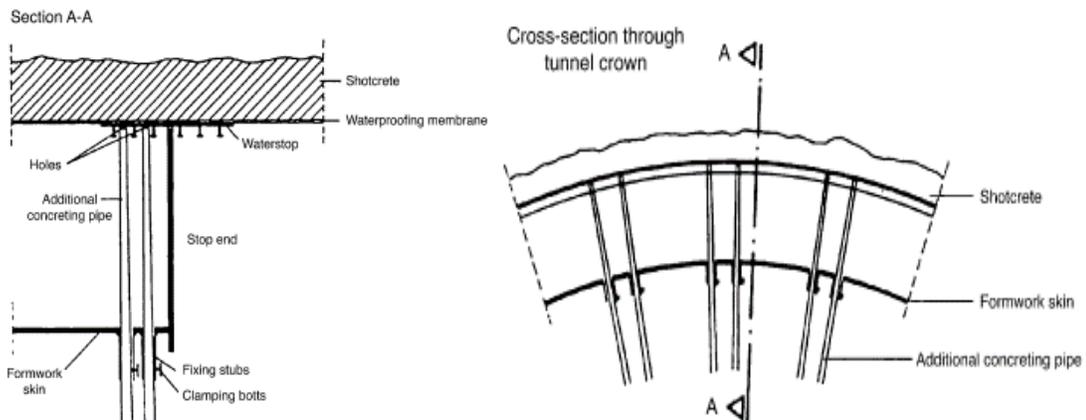


Figura 141. Instalación de tubos de hormigón en la zona de corona del túnel

Fuente: (Maidl, Handbook of Tunnel Engineering II, Basics and Additional Services for Design and Construction, 2014)

Posteriormente a la colocación de los elementos de impermeabilización y con la instalación del hormigón en el revestimiento se impone un peso a las membranas, lo que hace que los elementos de fijación realicen su trabajo. Las técnicas constructivas actuales requieren andamios con equipos de tendido mecánico montados en equipos sobre orugas, los cuales se adaptan al perfil del túnel, permitiendo la instalación de capas o membranas de hasta 6 metros, la longitud del perímetro del túnel o media sección de este, siendo importante instalar secciones mayores a 1 metro de ancho, esto para permitir el menor número posible de costuras.

Con la instalación final de los elementos de hormigón se dejan juntas donde se ha vaciado el material durante su instalación, lo cual requiere el llenado en estas juntas con el hormigón.

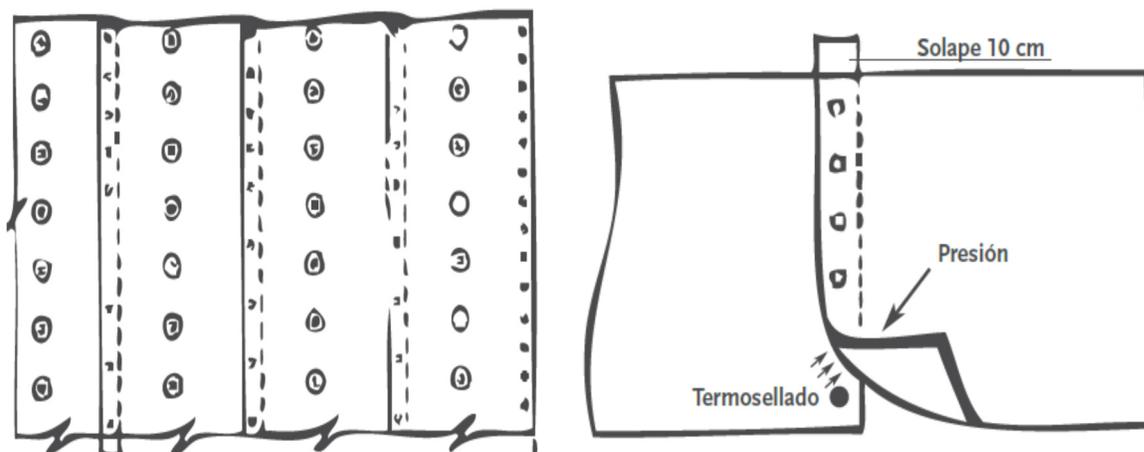


Figura 142. Características de los solapes entre las capas de impermeabilización

Fuente: (Trocellen). Guía de Obras Civiles de Impermeabilización de Túneles.

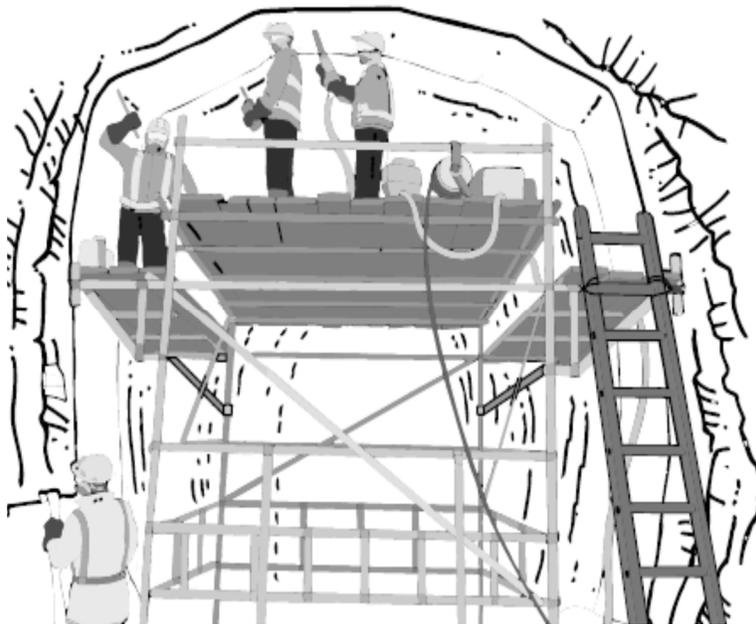


Figura 143. Esquema típico de la instalación de andamios para la colocación de las membranas y elementos de impermeabilización.

Fuente: (ACHS). Control de Riesgos en Obras de Construcción - Construcción de Túneles

#### Juntas de sellado.

El objetivo de estos elementos es el de asegurar la hermeticidad donde se instalaron las membranas de impermeabilización, también para segmentar en los diferentes tramos del túnel y acortar zonas donde se pueden presentar rupturas de las capas. Estos dispositivos son de material de PVC o polietileno y de una tonalidad traslucida para tener un mayor control en los procesos de termo soldadura.

#### Elementos de unión e inspección.

Se emplean para facilitar la inspección, e inyección a zonas internas dentro de las capas de impermeabilización, sus geometrías varían de forma y dimensión, principalmente en forma de embudo y cilíndrica, las cuales se encuentran integradas y unidas a la membrana por procesos de termo soldadura.

#### Arandelas o discos de soporte.

Son estructuras redondas, con un radio entre 4 a 5 cm, generalmente del mismo material de polímero del que es construida la membrana, su función será de fijación de la membrana y por ello deberá tener características de resistencia más altas que las capas impermeables, son elementos que se integran al sistema de revestimiento en la bóveda por tornillos.

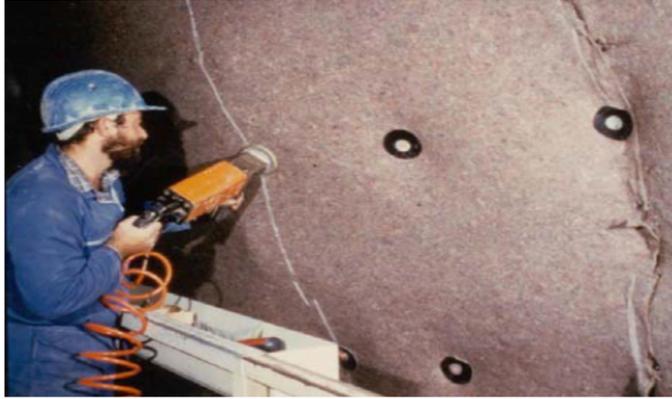


Figura 144. Fijación de las membranas con elementos de soporte  
Fuente: Manual Renolit Alkorgeo, impermeabilización Subterránea

### Elementos de fijación.

Normalmente se utilizan clavos metálicos entre 25 a 30 mm de longitud y arandelas de 13/16, los cuales se fijan al soporte o directamente al macizo, estas dimensiones podrían variar debido a las secciones e irregularidades del perfil de la bóveda.

Están destinados a unir de manera temporal las diferentes capas impermeables e integrarlas al revestimiento del túnel, es común instalar 5 unidades de fijación por metro cuadrado, pero esta densidad puede variar por las características temporales o definitivas de la obra en el instante que el revestimiento de concreto pueda aportar en mayor medida el peso de las capas de impermeabilización.

Se utilizan cartuchos de fulminante para permitir una fijación directa de estos clavos al soporte natural o que se tenga en el cuerpo del túnel.

### Filtros de protección.

Cuando se requiera proteger las membranas con macizos térreos, se usa un material tipo fieltro o geotextiles, que proporcionan protección al rozamiento o reacciones químicas inadecuadas sobre la membrana.

Esta capa debe tener propiedades de flexibilidad y resistencia frente al punzonamiento de la roca o sostenimiento sobre el filtro.

### Herramientas de soldadura.

Para el empalme de las diferentes tiras de geotextiles se emplea una máquina que trabaja con una cuña de calor eléctrica, y que presenta unos rodillos que trabajan a presión de forma independiente.

La cuña caliente se guía entre las membranas superpuestas; los dos rodillos de presión hacen avanzar la maquina a una velocidad determinada. Temperatura, presión y velocidad se ajustan antes de ejecutar la soldadura final.



Figura 145. Tipos de soldaduras en el solape de las capas de impermeabilización.  
Fuente (SIKA & Maldonado, Impermeabilización de Túneles - Sistemas Flexibles, 2015)

### Parches.

Están compuestos por material de polímero similar al de las membranas, en el mercado se encuentran con formas circulares de radio entre 5 a 6 cm, están destinados para sellar los puntos de anclajes o fijación que se presentan en este sistema de impermeabilización por donde se puede presentar una filtración de agua.

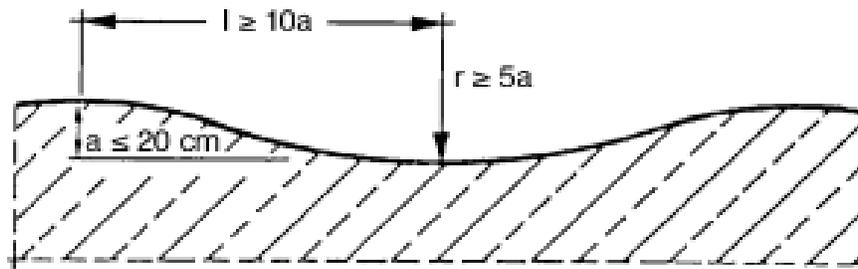


Figura 146. Irregularidades permisibles de impermeabilización en el soporte.  
Handbook of Tunnel Engineering II, Basics and Additional Services for Design and Construction.

Muy frecuentemente se encuentran superficies irregulares, que dificultan la instalación de los elementos de impermeabilización, estas variaciones no deben ser mayores de 20 cm con el eje central del túnel.

En zonas donde la geometría e irregularidad sean máximas, como en el caso de nichos, se deben establecer métodos de fijación que se adapten a estas superficies; además dichos cambios se podrán suavizar con métodos mecánicos que permitan un perfilado de la sección del túnel.

#### 6.4.4. Materiales de impermeabilización proyectados.

El procedimiento constructivo es rociar en las capas de soporte o en el macizo directamente con soluciones líquidas de materiales cementicias de impermeabilización, las cuales se encuentran compuestas por:

- Resinas.
- Compuestos de concreto y polímeros.
- Polímeros.
- Mezclas de betún y polímeros.
- Adición con fibras de vidrio, mejora flexibilidad y condiciones de permeabilidad el material.

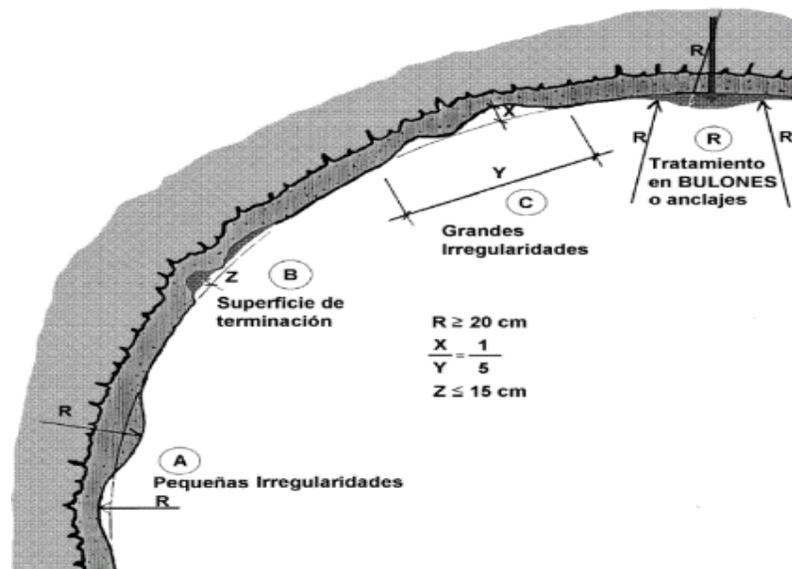


Figura 147. Requisitos de soporte para la fijación de las membranas Fuente: Adaptado, (AENOR, 2015). . . Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P

Las técnicas de rociado generarán capas de material impermeable libre de costuras y juntas, permitiendo una mayor flexibilidad en las técnicas constructivas, generando reducción de costos y tiempos. Sin embargo, se requiere de superficies parejas, libres de protuberancias que permitan una simetría en el grosor del concreto lanzado o material de rociado vertido.

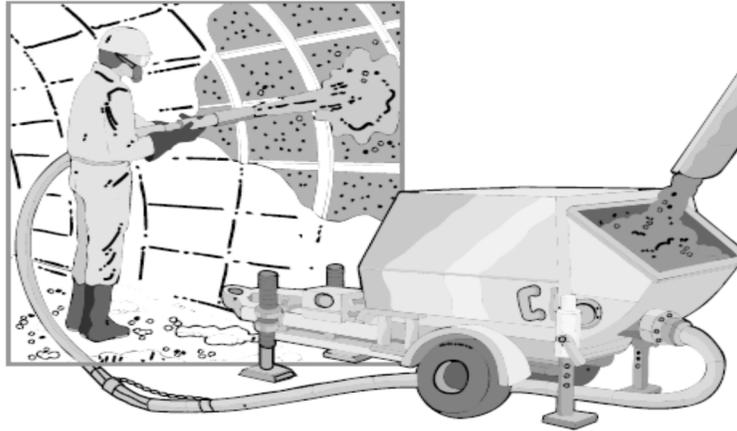


Figura 148. Esquema de rociado con equipos mecánicos del sistema de revestimiento.  
Fuente: (ACHS). Control de Riesgos en Obras de Construcción - Construcción de Túneles

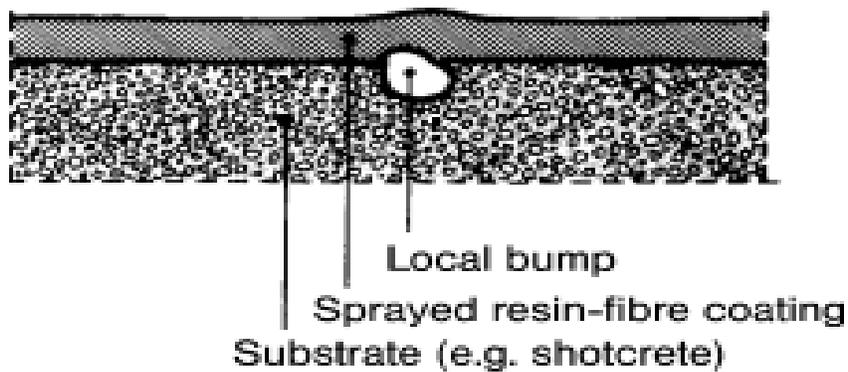


Figura 149. Impermeabilización con resina, sobre los elementos de soporte.  
Fuente: (Maidl, Thewes, & Maidl, Handbook of Tunnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction, 2014, p. 232)

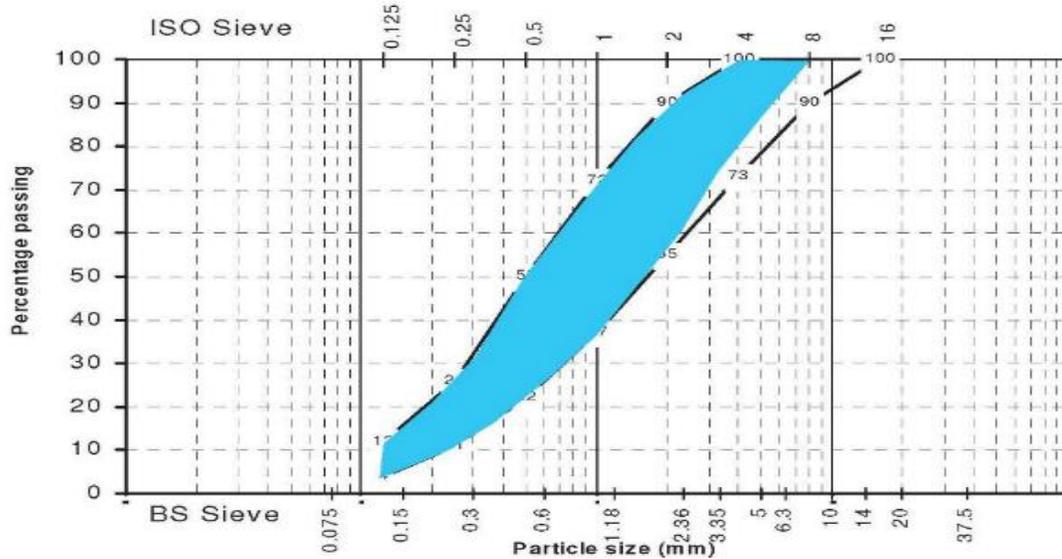


Figura 150. Características Granulométricas propuestas en la mezcla de hormigón proyectado.  
Fuente: (BASF, 2014). Pre inyecciones de Excavación para túneles en roca.

Los revestimientos de concreto lanzado deberán permanecer en el tiempo de duración de la obra, resistiendo el ambiente interno de una excavación subterránea, permitiendo además mantenimientos y reparaciones en la estructura.

En la Figura 151, se exponen las diferentes características del ambiente de la obra, logística, y materiales que deberán considerarse durante el diseño del sistema de concreto lanzado como sistema de soporte y revestimiento del túnel.

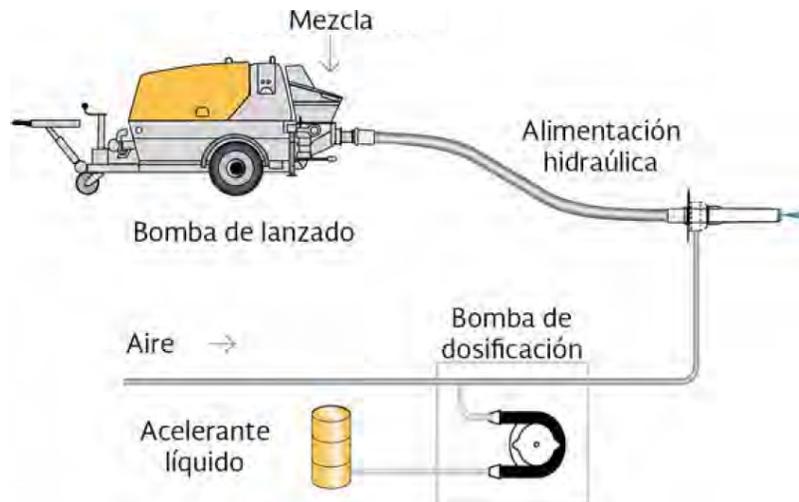


Figura 151. Montaje típico en las tareas de lanzamiento de concreto.  
Fuente: Putzmeister (2011), (SCT, 2016, págs. 8 - 16), Manual diseño y construcción de túneles en carretera.

Las propiedades de los revestimientos en concreto lanzado están definidas de acuerdo al uso y características del ambiente de la obra, como se presenta en la Figura 152, los requerimientos de elaboración e instalación de este tipo de materiales estarán en función del tipo de equipos, herramientas, uso y especificaciones de los materiales.

A continuación se realiza la descripción de los requerimientos para la durabilidad del hormigón:

- Bajas permeabilidades de la mezcla, evitando la penetración de soluciones o elementos nocivos y la pérdida de resistencia del concreto.
- Granulometrías apropiadas para la aplicación por bombeo, garantizando mantener las características de Trabajabilidad, reducción del rebote y adecuada compactación.
- Proporciones del cementante en la mezcla, garantizando no disminuir propiedades de resistencia y permeabilidad.
- Relaciones de agua / cemento definidas para los aditivos requeridos.
- Incorporar materiales de puzolana y micro sílice (humos de sílice) y cenizas volantes, los cuales generaran efecto de relleno y distribución homogénea en la mezcla, además se

establecerá una menor permeabilidad, resistencia frente a sulfatos, contracciones y dilataciones por efectos de temperatura.

- Controles a la fisuración del concreto por cambios de temperatura, mediante refuerzos con fibras, mallas.
- Se pueden agregar aditivos para el control de la hidratación, una prehidratación puede generar pérdida de la resistencia, densidad y aumento en los valores de permeabilidad.

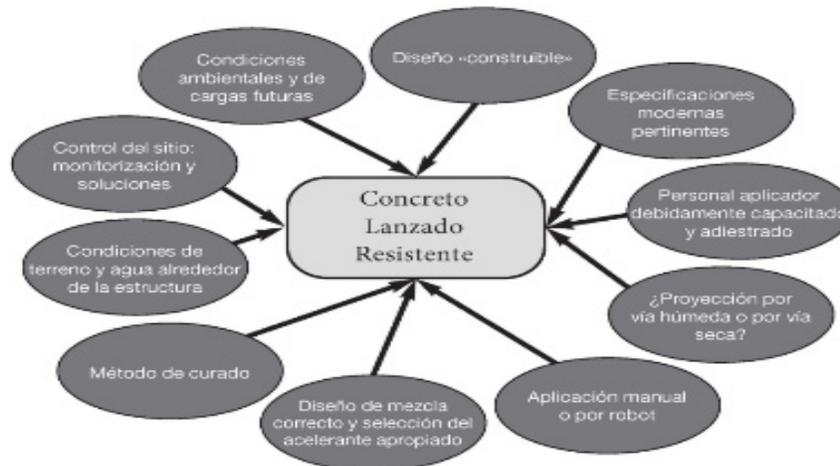


Figura 152. Variables que rigen la durabilidad en el concreto lanzado  
Fuente: (DEGUSSA & MEYCO, 2002). Shotcrete para soporte de Rocas, pág. 118.

#### 6.4.5. Materiales de impermeabilización Metálicos.

Es una técnica poco usual debido a la restricción dada por la susceptibilidad a corrosión de los materiales metálicos en condiciones naturales de alta humedad y presiones.

En túneles a presión se requiere un revestimiento con láminas de aluminio o cobre que permitan un sellamiento completo, las juntas o uniones son casi imperceptibles.

#### 6.4.6. Capas de materiales epóxicos.

Constituye un sistema rígido, con una capacidad de alargamiento muy escasa y baja flexibilidad; por lo tanto, altas deformaciones podrían romper la membrana, se instala en el hormigón a una edad mayor a 18 días; estos materiales son altamente inflamables y por lo tanto constituyen un elemento de cuidado y protección frente a los agentes ambientales en el túnel.

#### 6.4.7. Geles polímero de caucho.

Este material se constituye por un compuesto de caucho reciclado, formado por polímeros en membranas flexibles que conforman capas plásticas, es el método utilizado principalmente en

Asia. Se aplica en aerosol, es un material viscoso, presenta una elevada resistencia a los hidrocarburos y ataques químicos, es extremadamente adhesivo, tiene una gran elongación, flexibilidad y es recomendado para sección con solera curva.

#### 6.4.8. Geotextiles

Estos materiales están constituidos por fibras de origen químico y orgánico, se encuentran entrelazadas por elementos polipropileno, tienen altas características de resistencia frente a ambientes agresivos y de esfuerzos. La finalidad de este tipo de elementos será la protección de las capas y geomembranas frente a puntos de corte, además de servir como mantos de evacuación del agua.

Estos materiales deben tener un espesor constante, uniformidad en toda su superficie, además la unión entre las diferentes fibras se realiza por aguetado.

Tabla 47. Propiedades mecánicas e hidráulicas mínimas del geotextil, según el tipo de túnel

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	ENSAYO	A CIELO ABIERTO		CON HORMIGÓN PROYECTADO			DOVELAS
			BAJO SISTEMA	SOBRE SISTEMA	ARIDO 0-4MM	ARIDO 0-8MM	ARIDO 0-16MM	
VALORES MÍNIMOS ABSOLUTOS <sup>1</sup>								
RES. TRACCIÓN <sup>2</sup>	kN/m	UNE EN ISO 10319	≥ 15	≥ 31	≥ 12	≥ 15	≥ 18	≥ 15
ALARGAMIENTO <sup>2</sup>	%	UNE EN ISO 10319	≥ 45	≥ 45	≥ 45	≥ 45	≥ 45	≥ 45
RES. CBR	N	UNE EN ISO 12236	≥ 2500	≥ 5000	≥ 1900	≥ 2500	≥ 3000	≥ 2500
EFICIENCIA	%	UNE EN 13719	≤ 2,1	≤ 1,1	≤ 2,2	≤ 2,1	≤ 2,0	≤ 2,1
RES. CONO	mm	UNE EN ISO 13433	≤ 24	≤ 12	≤ 27	≤ 24	≤ 21	≤ 24
CAP. FLUJO (20 kPa i=1)	m <sup>2</sup> /s	UNE EN ISO 12958	^10 <sup>-6</sup>	^10 <sup>-6</sup>	^10 <sup>-6</sup>	^10 <sup>-6</sup>	^10 <sup>-6</sup>	^10 <sup>-6</sup>
DURABILIDAD			RESISTENTES A SOLUCIONES DE ALTA ALCALINIDAD					
1) Valor mínimo absoluto es el valor medio corregido por la tolerancia para un nivel de confianza del 95%.								
2) Valores a considerar en los sentidos longitudinal (L) y transversal (T) de la fabricación.								

Fuente: (AENOR, 2015, pág. 19). Norma UNE - 104424. Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P.

Este tipo de materiales tendrá una presentación en rollos, los cuales se encuentran rotulados, con las especificaciones y características del fabricante, deberá resistir un periodo posterior a la instalación, como mínimo dos semanas, y quedar a la interperie el menor tiempo posible.

La instalación de este tipo de elementos en el contorno de la excavación se hace mediante tacos, clavos con arandelas y discos del material de la membrana.

Las tiras se colocan de manera transversal al frente del túnel, cada línea se solapa sobre el anterior, como mínimo 20 cm, el material deberá cubrir gradualmente toda la superficie de la excavación, si el solape se termofija se debe tener como mínimo 10 cm entre cada tira.

El geotextil debe envolver el tubo de drenaje para facilitar la dirección del agua hacia los drenes longitudinales.

#### 6.4.9. Sistemas impermeabilización especiales

##### Waterstop

En tuneles estancos se utiliza sistema de membranas PVC y geotextiles de protección en la zona de contacto con la capa de soporte, las capas de PVC deben estar termosoldadas, donde se instalan un inyector en la capa de concreto de revestimiento, la cual se utiliza para manejo de filtraciones entre los diferentes compartimientos, esquema que se presentan en la Figura 153.

En este sistema se pueden inyectar soluciones dentro del revestimiento para reducir y sellar las filtraciones, lo cual genera un sistema completo en el control de las filtraciones.

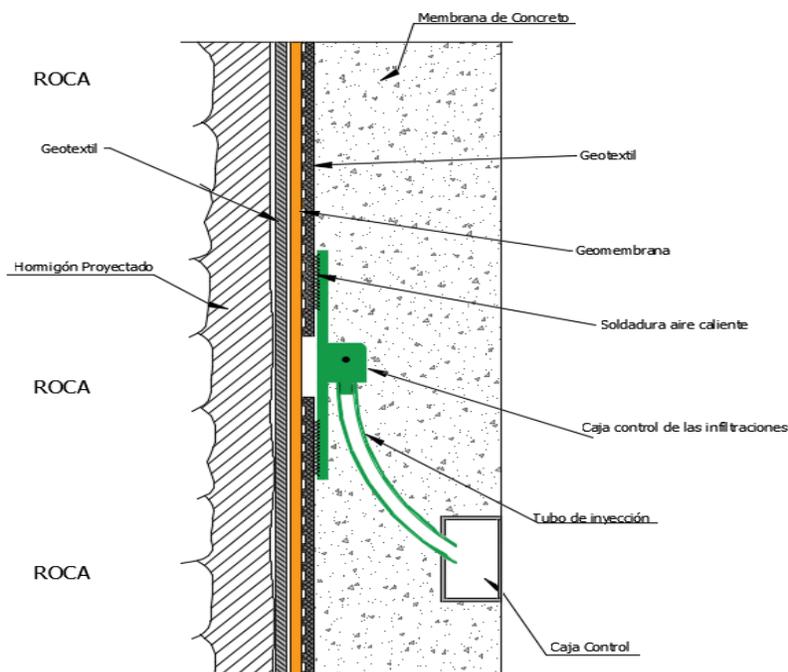


Figura 153. Sistema de impermeabilización compartimentado WATERSTOP e inyectores a través del hormigón de revestimiento

Fuente: (AENOR, 2015, pág. 36). Norma UNE - 104424. Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P.

##### Sistema Activo de control

Se utiliza en tuneles de impermeabilización en la sección completa, con la instalación de una doble lámina membrana, con geotextiles en las zonas de contacto con el soporte, cuentan con dispositivos para inyecciones de reparación en caso de filtraciones a través del hormigón de revestimiento.

Así mismo, frente a una eventual pérdida de vacío se pueden definir inyecciones para reducir las filtraciones de agua.

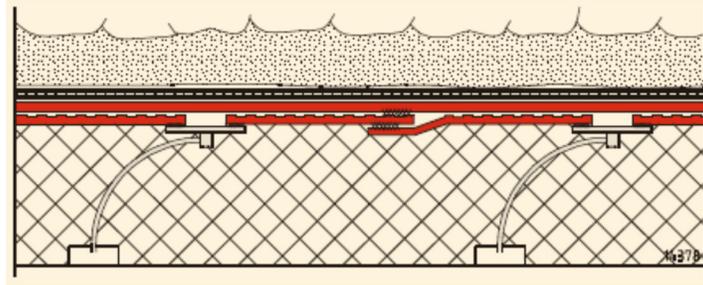


Figura 154. Sistema de impermeabilización Activo de Control e inyectores para control de vacío través del hormigón de revestimiento  
 Fuente: (AENOR, 2015, pág. 36). Norma UNE - 104424. Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P.

### Sistema Anchor

En las capas de revestimiento primario se perfora, coloca bulones y sistemas de arandelas especiales. Luego, se instala directamente capas de impermeabilización sobre el revestimiento, que se fijan por tornillos y topes del mismo material de la membrana, como se puede observar en la Figura 155.

Posteriormente, con las arandelas y sistemas de fijación se colocan mallas electrosoldadas y se vierte concreto proyectado para generar una capa final de revestimiento.



Figura 155. Sistema Anchor.  
 Fuente: (AENOR, 2015, pág. 36). Norma UNE - 104424. Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P. & SIKA.

## 6.5. Control de la infiltración con técnicas de mejoramiento del terreno.

Debido a las características del macizo y filtraciones excesivas, se necesita incorporar medidas de mejoramiento de la roca y sellamiento de las fracturas, con procesos de inyección y refuerzo de las diferentes zonas de la excavación.

### 6.5.1. Inyecciones.

Es una técnica destinada a impregnar en los conductos naturales del macizo soluciones cementicias, que realicen un sellamiento de las fracturas, lo cual genera una densificación y mejora de las propiedades de resistencia del macizo, situación que se muestra en la Figura 156.

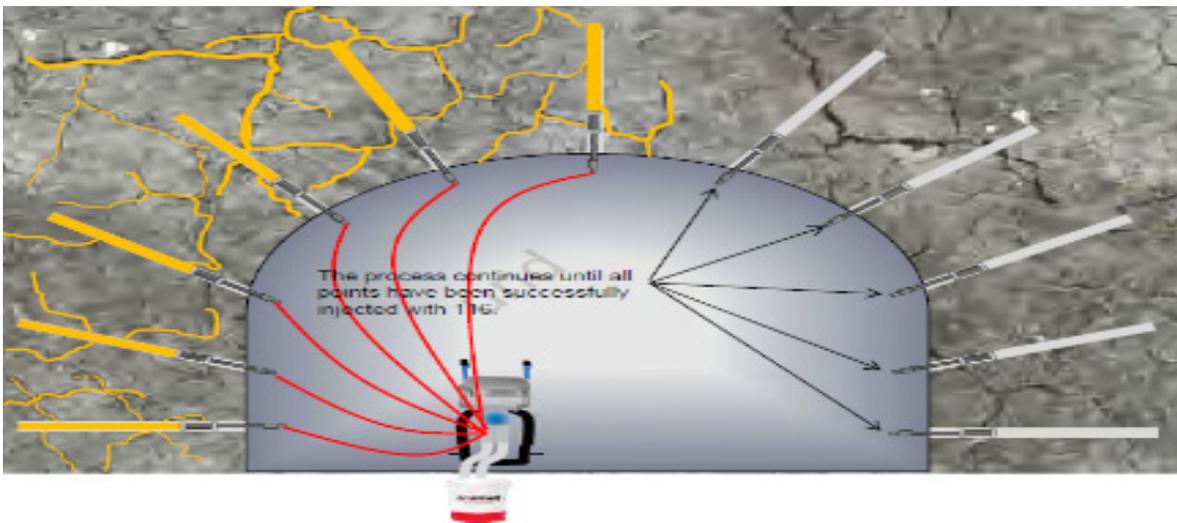


Figura 156. Inyecciones de lechada impermeabilizante en el anillo de roca fracturada en el túnel.  
Fuente: (AITES, 2016). Presentación Ground Water Control With use of Modern Pre/Post Injection Techniques and Materials.

A continuación, se presentan las características que deben evaluarse en las campanas de inyección para un proyecto subterráneo.

- Fracturación del macizo.
- Características físico químicas (mineralogía) de la roca.
- Permeabilidad, porosidad y parámetros hidráulicos del macizo.
- Caudales y tasas de infiltración.
- Cobertura y facilidades del área a pre inyectar.
- Esfuerzos in situ, para no activar procesos de fracturación hidráulica.

Para llevar a cabo el mejoramiento del macizo se utilizan materiales a base de cementos, soluciones químicas y coloidales minerales, las cuales requieren una evaluación previa con

respecto a las características mineralógicas del macizo con el fin de no afectar las propiedades de los cementos o soluciones utilizadas y que desde el punto de vista ambiental, no incidan y generen reacciones o elementos nocivos o contaminantes.

De acuerdo a (AITES, 2013), se podrían clasificar las inyecciones en:

- Inyecciones de impregnación: Consisten en soluciones químicas que penetran las fracturas del macizo como un relleno sólido, generando un tapón y sellamiento, están diseñadas para no activar o reaccionar con la mineralogía de la roca.
- Inyecciones de compactación o desplazamiento: las soluciones y mezclas en forma de morteros secos desplazan los materiales disgregados de baja calidad, generan un bulbo de inyección en el contorno del túnel, muy común en zonas Karstificadas o terrenos tipo IV – V.
- Inyecciones de fracturación: las soluciones químicas rellenan las fracturas, y generan cambios mineralógicos de la roca, mejorando las estructuras contra la acción del agua.

#### 6.5.2. Pre Inyecciones.

En zonas de trabajo donde se presentan problemas de filtraciones, la irrupción del agua puede ser perjudicial en los equipos, personal y construcciones; las medidas de inyección están enfocadas para mejorar terrenos malos y disgregados.

Donde se requiere la evacuación del agua, se realizan perforaciones en terreno in situ, previas a la excavación, lo cual densifica el terreno que se va a excavar.

En estos puntos las soluciones y lechadas se inyectan a la zona fracturada, con un adecuado fraguado se definirán nuevas condiciones del terreno aptas para la excavación y avances de los trabajos sin problema de estabilidad, como se representa en la Figura 157.

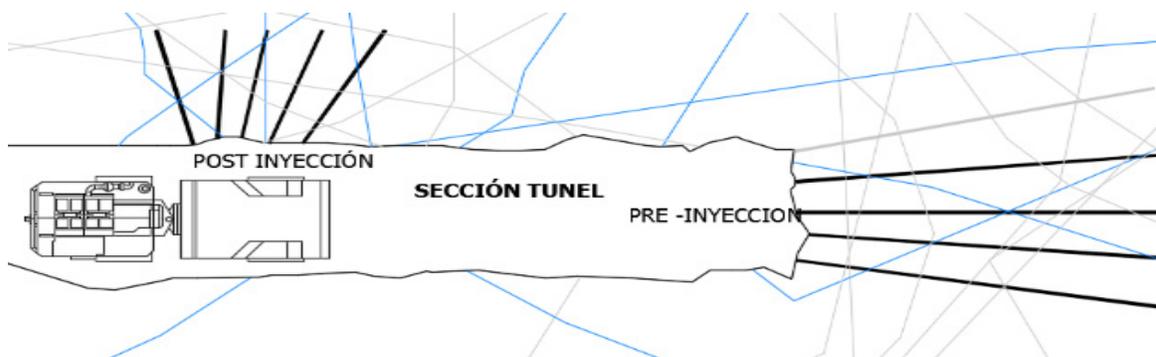


Figura 157. Preinyección y post – inyección de una sección del túnel – Planta.  
Fuente: Adaptado, (BASF, 2014). Pre inyecciones de Excavación para túneles en roca.

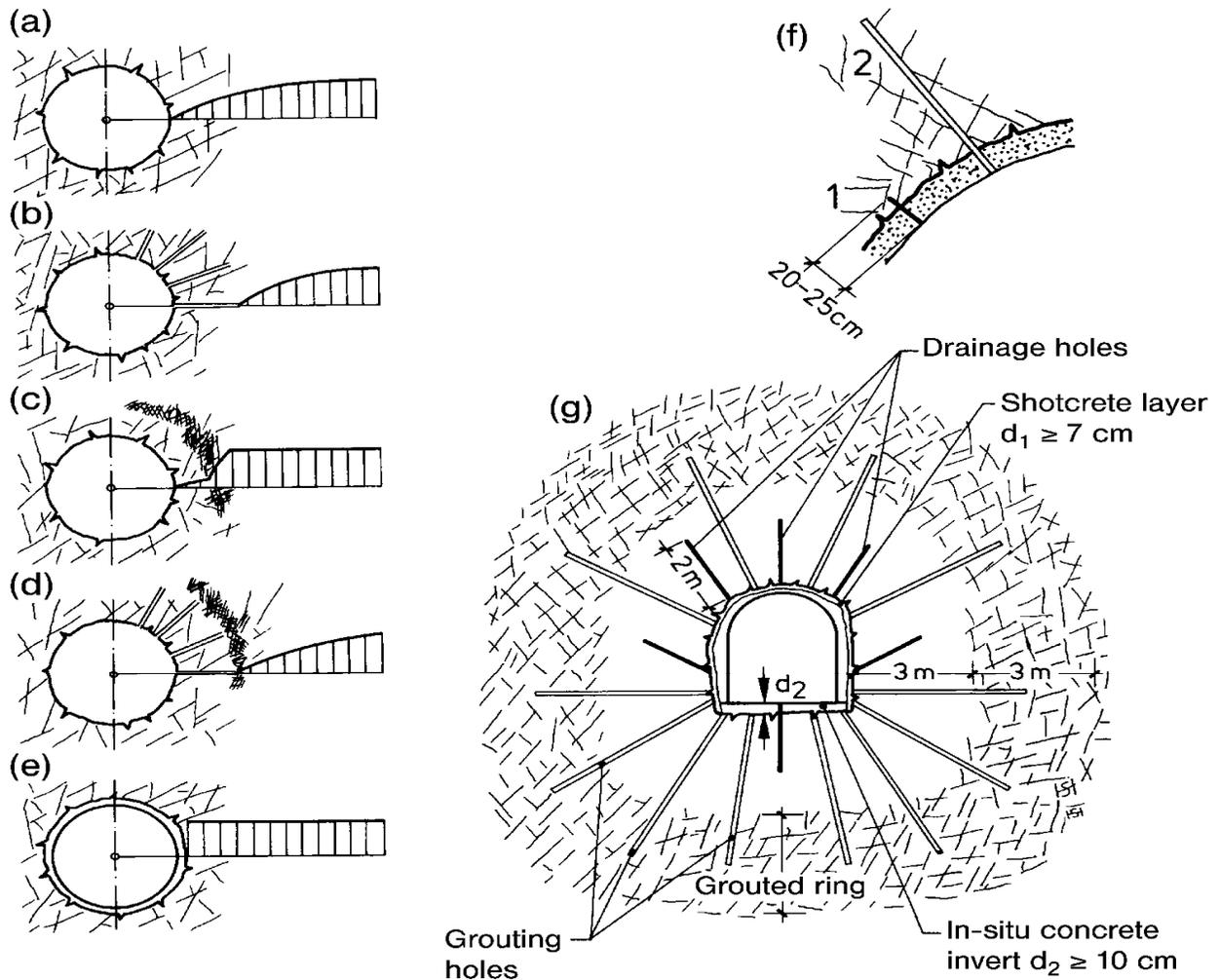


Figura 158. Distribución de la presión hidráulica alrededor de la excavación.

Fuente: (Maidl, Thewes, & Maidl, 2014, p. 197). Handbook of Tunnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction.

Los efectos de las inyecciones y perforaciones de alivio en el macizo se representan en la Figura 158, los cuales presentan las siguientes características:

- a) Cambios en el estado inicial, sin irrupciones y presiones hidráulicas.
- b) Presión hidráulica reducida por las perforaciones de descompresión.
- c) Inyecciones y mejoramiento del macizo.
- d) Inyecciones y perforaciones de descompresión, alivio de las presiones hidráulicas.
- e) Presiones hacia el revestimiento, instalación de capas impermeables, túnel estanco.
- f) Perforaciones de consolidación del terreno e impermeabilización con lechadas cementicias.
- g) Capas de inyección y agujeros de alivio de presión en el bloque de la excavación.

### 6.5.3. Post Inyecciones.

En zonas donde se ha realizado un avance en la excavación se pueden presentar fenómenos de goteo o filtraciones desmejorando la estabilidad, e incrementado el riesgo en los trabajos, máquinas y personal. Los sistemas de inyecciones posteriores a los procesos de excavación se usan para mejorar el contorno de la bóveda abierta frente a la estabilidad y control de las posibles filtraciones.

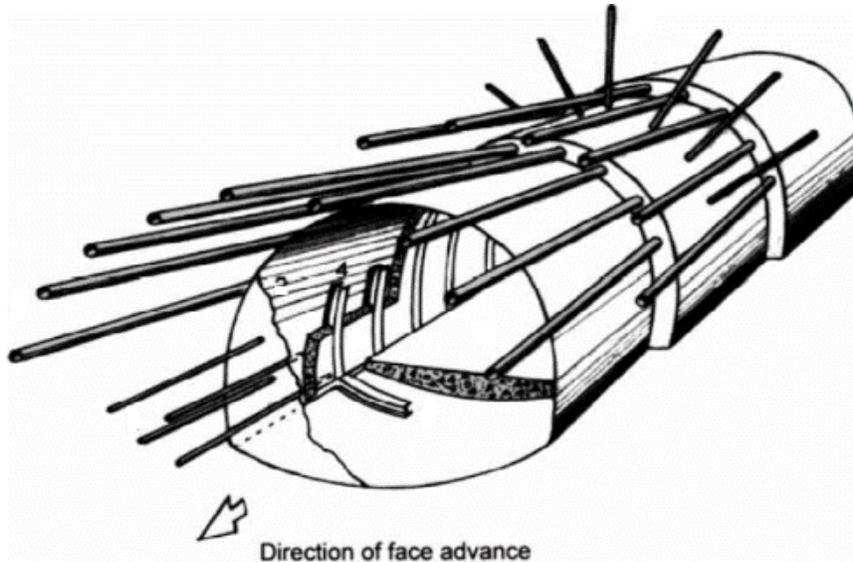


Figura 159. Métodos de mejoramiento progresivo del túnel, tipo paraguas e inyecciones progresivas. Fuente: (Pinillos, 2013). Túnel en macizos calcáreos Karstificadas, pág. 287.

En la Figura 159, se representan los procesos de inyección previa y posterior a la excavación del túnel, los cuales se ejecutan en el contorno del túnel y paralelamente con la construcción de la bóveda subterránea.

### 6.5.4. Características de las soluciones cementicias en las inyecciones.

Para una penetración efectiva de las inyecciones en las fracturas del macizo se requiere un diámetro de la partícula muy pequeño. De acuerdo con (BASF, 2014) y la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) estos cementos ultra finos se caracterizan por una finura  $d_{95} < 16 \mu m$ , lo cual permitirá una mayor superficie específica, su contacto con la zona a rehabilitar, un ingreso efectivo y sellamiento de las zonas débiles.

Los procesos de inyecciones se realizan a presión, se necesita evaluar el contenido de agua en las soluciones, el tiempo de fraguado y evitar procesos de fracturamiento adicional de la roca debido a la inyección.

Para el diseño de las soluciones de inyección se deberá evaluar:

- Características hidráulicas del macizo.
- Selección del tamaño máximo de partículas en la mezcla.
- Los procesos de floculación, con bloqueos e ineficiencia en la penetración de la inyección.
- Una menor proporción de agua en la mezcla podría mejorar la resistencia, sin embargo variara la viscosidad deseada.
- Estabilidad química frente a soluciones coloidales o el agua del macizo. (Durabilidad).
- Características de resistencia final requerida.
- Capacidad de deflexión en la resistencia final deseada.
- Densidad de las soluciones.
- Trabajabilidad y fraguado de la lechada.
- Presión de la lechada.
- Llenado óptimo de las discontinuidades y sus juntas de diaclasas.
- Alcance y volumen de la lechada.
- Características de los acelerantes o aditivos a aplicar en la solución.
- Características de la perforación (rotación – percusión – mixta).
- Tipo de equipos perforadores, rendimientos.
- Pruebas previas de presión mínima requerida.
- Velocidad de bombeo de la inyección.
- Tipo y características de los obturadores.

Las inyecciones se verterán al macizo hasta cuando ocurra un leve aumento de la presión de relleno, evitando generar fracturamiento hidráulico por la presión de vertimiento de la lechada en la fractura; también se podrá instalar tubería de drenaje donde la lechada saldrá en caso de una saturación total de las fracturas.

#### Soluciones de Bentonita.

La función de estos compuestos de arcillas de Sodio o Calcio es la de estabilizar la mezcla cementicia que se está inyectando, lo que mejora la estructura y homogeneidad de la solución, pero estos compuestos inyectados presentaran menores valores de resistencia frente a presiones in situ del macizo.

Para fines de impermeabilización, las lechadas con estos elementos son eficientes, ya que este material presenta una baja reacción con una solución o líquido que entre en contacto; sin embargo, debido a que los diámetros de las partículas podrían ser mayores a los del micro cemento podría haber problemas para que penetren las fracturas del macizo.

#### Soluciones de Puzolanas.

En condiciones naturales, son elementos de origen volcánico, no se diluyen con el agua, pero bajo condiciones ambientales podrían entrar en procesos de reacción química.

En la industria, las puzolanas se encuentran como subproducto de la combustión de carbón y otros materiales, su forma física es de residuos de ceniza pulverizados.

En las inyecciones, se combinan con el agua, cal, gravas y arenas, formando suspensiones estables, es común también combinar sus constituyentes con cementos tipo Portland, lo cual mejora sus propiedades hidráulicas, además de economizar costos.

#### Soluciones Químicas.

En el mercado se han establecido una serie de productos a base de polímeros que actúan en fase acuosa penetrando en el terreno de acuerdo con la viscosidad de la lechada y presión de inyección, genera una reacción química con la roca, y sella efectivamente la fractura; además no se diluyen en el agua pero si reaccionan en su presencia.

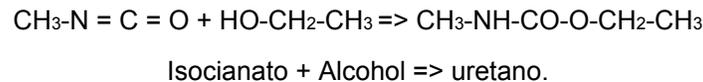
Otro tipo de inyección química son las formadas por geles que presentan una baja viscosidad, la finalidad para el proceso de inyección será generar una polimeración y una red en fase sólida que sellará la fractura.

Comercialmente se puede encontrar inyecciones químicas como:

- Grouts químicos disponibles son en base a silicatos.
- Resinas fenólicas.
- Ligno sulfatos.
- Acrilamidas.
- Acrilatos.
- Carbometil - celulosas de sodio.
- Resinas amino.

- Epoxis.
- Poliuretanos.
- Silicatos de poliurea.

En el caso del poliuretano, la reacción final puede generar elementos de baja porosidad, con textura tipo espuma y pastosa debido a la reacción con el agua que tiende a formar moléculas de dióxido de carbono, con un aumento de volumen o fisuras adicionales, lo cual deberá evaluarse cuidadosamente. La reacción que representa lo expuesto es la siguiente:



#### Soluciones a base de silicato.

Este compuesto se ha utilizado por muchos años en la construcción de túneles, esta solución presenta una baja viscosidad y es relativamente económica, pudiendo ser fácilmente aplicable.

Sin embargo, presenta problemas debido a su alta reactividad, agresividad química en otros materiales, fluidos y afectaciones a la salud de los trabajadores.

En el macizo se vuelve inestable y no es un producto recomendable a largo plazo, además necesita productos catalizadores para su aplicación, debido a su agresividad química puede entrar en procesos de disolución con la roca propiciando nuevos conductos por donde ingresará el agua.

#### 6.5.5. Equipos.

Para la aplicación de las inyecciones se utilizan materiales y equipos como:

- Equipos de perforación.
- Equipos de dosificación y mezcla.
- Bombas.
- Tubería inyección para cementantes.

## **Capítulo VII - Ensayos en concreto impermeable aplicado a túneles.**

Dentro de los sistemas de impermeabilización de túneles se encuentran las membranas, capas de bitumen, blindajes en acero, inyecciones y concretos de baja permeabilidad, entre otros.

En este capítulo se pretende investigar la permeabilidad del concreto normal, prefisurado, con grietas y el efecto de aditivos adicionados en la mezcla o aplicados en la superficie del concreto.

Para llevar a cabo la investigación se elaboraron concretos de baja permeabilidad a los cuales se les efectuaron ensayos de permeabilidad y relación de vacíos, con el fin de evaluar y comparar las cualidades hidráulicas del material en combinación con aditivos minerales, elementos de cristalización y fibras.

Los materiales y proceso de elaboración de las muestras se realizaron de manera que representen casos de túneles con fisuras en el soporte o revestimiento, con el fin de desarrollar medidas de tratamiento superficial e interno de capas de revestimiento para prevenir las filtraciones y mejorar las propiedades de durabilidad en concretos poco permeables, respondiendo también a las restricciones que están incorporando las autoridades ambientales actualmente.

Se elaboraron diferentes probetas con las siguientes características:

- Muestras con microfisuración producida por procesos de carga.
- Muestras con aditivos por cristalización agregados al cemento en la mezcla.
- Muestras con adición de metacaolín durante el mezclado.
- Muestras con fibras y grietas producidas por procesos de carga.
- Muestras con combinación de fibras.

Los especímenes que se fabricaron con la combinación de minerales de metacaolín en polvo buscan analizar los efectos de la adición del mineral en la estructura del concreto.

Además, se estimaron las características de filtración y propiedades de los elementos de concreto combinados con aditivos por cristalización, en los cuales se evaluó el poder de sellamiento de la red capilar de la pasta de concreto frente a la filtración del agua y verificar el efecto de estos aditivos en muestras fisuradas.

También, se evaluó la combinación del concreto con fibras sintéticas y metálicas, especímenes que fueron evaluados a partir de la investigación Académica de la Ing. Paola Acero Pachón, la cual se denomina “Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles”, los cuales presentan una relación  $A/C = 0.45$  (típica de concreto para soportes), para definir las características del material frente al paso del agua y filtraciones de los elementos.

De acuerdo con (Benavides, 2014), en la elaboración de un concreto de alto desempeño, frente a la acción del agua se busca que la red capilar sea más fina sellando los vacíos, generando una restricción al paso del agua, esto aumenta también el poder de absorción del material.

Así mismo, el grado de absorción y porosidad es un elemento importante que se debe evaluar en el material frente a soluciones químicas agresivas que se infiltran, se disuelven y generan procesos de deterioro.

Para evaluar el efecto de infiltración del agua en las muestras se ejecutó el ensayo de permeabilidad, que en Colombia se encuentra normalizado por la directriz NTC-4483, el cual mide el nivel de infiltración con respecto a una presión hidráulica que se ejerce en muestras cilíndricas de concreto.

Finalmente, se compararon los resultados obtenidos con investigaciones similares realizadas en especímenes de concreto elaborados en túneles, principalmente enfocadas en el uso de materiales de fibra.

#### 7.1. Recomendaciones en la selección del tipo de ensayos.

En las obras de ingeniería es usual realizar pruebas para evaluar el tipo de membrana y revestimiento a instalar en la excavación, a continuación se presentan consideraciones importantes en la selección del tipo de materiales utilizados para el control y manejo del agua, de acuerdo criterios de la Asociación internacional de túneles y espacios subterráneos – ITA, (AITES, 2013):

- Los ensayos deberán implementarse en revestimientos y medidas comunes para el control del agua en una excavación subterránea.
- Se debe concertar entre diseñadores y dueños del proyecto el plan de calidad y tareas requeridas para la instalación del revestimiento, además los fabricantes deberán aprobar las características de instalación, dosificación y calidad de los elementos aplicados.

- Se deben realizar pruebas de laboratorio a los materiales de revestimiento aplicados.
- Los ensayos deben ejecutarse con el espesor mínimo para la membrana propuesta.
- Las características de los materiales y condiciones del ensayo deben ser representativas de las condiciones y ambientes de obra.
- Los productos vía lanzada, deben ajustarse a las propiedades de rendimiento y durabilidad de los materiales de revestimiento.
- La selección de equipos, metodología constructiva y material es responsabilidad del contratista, para garantizar la similitud del ensayo con la realidad del proyecto.
- Se deben tener presentes otras medidas de manejo de agua complementarias aplicadas al revestimiento.
- Se deben tener en cuenta el alisado y emboquille final de las capas expuestas al ambiente.
- Se deberán analizar las características de los equipos y habilidad de los operadores en la aplicación, el grado pulverización y la integración con el macizo rocoso del revestimiento.
- Se debe garantizar la calidad de la cobertura y grosor mínimo de las membranas y capas de revestimiento.
- Si la prueba se realiza in situ, se debe asegurar que la completa estanqueidad del agua se logre antes de la instalación de una segunda capa de revestimiento.
- Se deben establecer técnicas de reparación en fisuras y defectos en el revestimiento con elementos lanzados de refuerzo con técnicas de tratamiento.
- Se debe garantizar que el hormigón lanzado pueda aplicarse en membranas y revestimientos previos instalados, en los elementos de la parte alta (corona) del túnel sin grandes defectos de inestabilidad o fisuras del hormigón.
- Se debe especificar las técnicas de reparación en caso de filtración, posterior a la instalación del revestimiento.
- Se deberá demostrar la preparación e instalación de las zonas y juntas de solapamiento, así mismo la aplicación de la membrana en zonas de juntas constructivas del concreto.
- Las membranas y capas de revestimiento serán instaladas de acuerdo con las características de los materiales, para evaluar el diseño óptimo de mezclas entre las diferentes capas.
- En caso de presentarse daños o filtraciones en revestimientos primarios se deben utilizar medidas de control de agua, para garantizar la instalación correcta de las medidas de estabilización e impermeabilización posteriores en toda la longitud del túnel.

- Los drenajes deberán tener la capacidad para el flujo de agua, deben ser resistentes y flexibles a los cambios y deformaciones del macizo.
- Una capa de concreto impermeable, puede tener un espesor mínimo de 500 mm, una geometría que permita la conducción del agua a los costados del tunel.
- Las medidas de manejo de las filtraciones deben ser ejecutadas por medio de lechadas, deben contar con protocolos y aprobación de los contratistas.

#### 7.1.1. Otros requerimientos.

Se debe evaluar el acabado superficial en los revestimientos, las características para lograr una integración con los materiales a instalar y aplicar un agregado fino rociado para mejorar la adherencia entre los diferentes elementos.

Los sustratos de roca o revestimientos primarios deberán estar suficientemente secos, por lo menos 24 horas antes de la aplicación de capas de lechada o membranas secundarias.

Las perforaciones de alivio o mejoramiento del terreno deberán ser realizados antes de la aplicación de la membrana, además las barras de unión deben estar limpias para dar una integración adecuada con las membranas secundarias.

#### 7.2. Elaboración de los especímenes de concreto.

De acuerdo a las especificaciones técnicas para los ensayos en permeabilidad y características de los materiales utilizados se elaboraron cilindros en concreto, con algunas adiciones con elementos impermeabilizantes. A continuación, se describe las actividades realizadas y las características de los elementos elaborados.

##### 7.2.1. Preparación de la probeta.

Los especímenes deberán adaptarse a las condiciones y características de los equipos, con una dimensión promedio de 102 mm de diámetro (4 pulgadas) por 200 mm altura, de acuerdo a la normativa NTC 1377 o NTC 550, donde se fijan los estándares mínimos para los ensayos de laboratorio en muestras de concreto.

### 7.2.2. Referencias.

Para la elaboración de las muestras se deben tener en cuenta pautas técnicas y recomendaciones, en la caracterización de los materiales, dentro de las que se destacan:

- NTC 110: Método para determinar la consistencia normal.
- NTC 220: Mezcla mecánica para la preparación de morteros.
- NTC 111: Prueba para determinar la fluidez de morteros de cemento.
- NTC 118: Tiempo de fraguado.
- NTC 221: Peso específico del cemento.
- NTC 33: Finura Blaine.
- NTC 220: Resistencia a la compresión.
- NTC 237: Método para determinar el peso específico y la absorción.
- NTC 77: Granulometría.

Las especificaciones técnicas para caracterizar los materiales utilizados (grava, arena y cemento) definen los requerimientos para la elaboración de los especímenes. Con base en esto, se realizaron actividades previas para la consecución de los materiales, préstamo de equipos, y otras tareas, las cuales se presentan en la Figura 160.



Figura 160. Actividades y elementos utilizados para caracterizar los materiales de la mezcla.  
Fuente: Elaboración Propia, proceso de caracterización de los agregados de la mezcla, laboratorio ECI.

Se debe tener en cuenta, que en los procesos de ensayo en especímenes de concreto los efectos del clima, radiación y alta humedad pueden generar en el material cambios, pueden afectar las muestras y caracterización de los materiales elaborados.

### 7.2.3. Herramientas y equipos.

Se utilizaron las instalaciones de los laboratorios de Estructuras y Geotecnia de la escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, además de equipos y herramientas para determinar las características de los materiales.

Los elementos utilizados para preparar las diferentes muestras fueron:

- Taras y equipos de pesado de materiales.
- Recipientes plásticos y metálicos.
- Bolsas plásticas.
- Carpas.
- Mallas y tamices granulométricos.
- Hornos y equipos de calentamiento.
- Cono y varilla de medición de condición saturada superficialmente seca (SSS).
- Picnómetros.
- Cono y barra metálica para medición de asentamiento de la mezcla.
- Carretillas.
- Moldes metálicos y plásticos cilíndricos.
- Mazos de caucho y varillas metálicas.
- Sacos y bolsas plásticas.

### 7.3. Características de los materiales de la mezcla.

El material utilizado en el ensayo debe tener unas características similares a los usados en las obras de ingeniería, de acuerdo a requerimientos para los agregados en el concreto, y que se describen a continuación.



Figura 161. Fuente de materiales de agregados rio Somondoco.  
Fuente: Agregados Gravimax SAS

### 7.3.1. Características de los agregados (grava / arena).

Se utilizó material de arena y grava de rio, empleada en obras de ingeniería, los cuales se aplicó en los ensayos para determinar características, como: granulometría, propiedades de los materiales finos y gruesos de la mezcla, finalmente, ajustando las características de los materiales a las especificaciones técnicas.

Para este proceso, se ejecutaron ensayos de densidad, masa unitaria compacta, contenido humedad y absorción, evaluación granulométrica de las fracciones de arena y grava, resultados que se reseñan en la Tabla 48

Tabla 48. Propiedades estimadas de los agregados utilizados.

ITEM	Grava	Arena
Densidad aparente, kg/m <sup>3</sup>	2680	2688
Masa unitaria compacta MUC, kg/m <sup>3</sup>	1523	1569
Contenido de humedad, %	0.46	11.35
Absorción, %	0.9	2.9

Fuente: Datos obtenidos de la caracterización de agregados de la mezcla.



Fotografía 1. Características y distribución granulométrica de los agregados.

### 7.3.2. Características del cemento.

El material de cemento deberá cumplir las condiciones de resistencia y composición, de acuerdo a las condiciones de las obras y equipos. El material fue suministrado por la empresa Argos y presenta condiciones de material estructural para uso de obras de ingeniería.

Con las pruebas de laboratorio, se realizaron ensayos de densidad, por medio de un equipo Picnómetro, el cual determinó un valor medio de 3.07 gr / cm<sup>3</sup> para el material, dato que se incorporó en el diseño de la mezcla.

### 7.3.3. Diseño de la mezcla.

Con las características de los materiales, se ajustaron las proporciones de elementos de la mezcla y se estimó las cantidades de adición combinados con el concreto, en este caso para evaluar su desempeño frente a las filtraciones inducidas de agua.

En el diseño, la granulometría del agregado grueso no deberá sobrepasar el tamaño ½ pulgada, debido a las condiciones de trabajo y equipos de bombeo utilizados en las obras, con un tamaño máximo nominal (TMN) de 3/8 Pulgadas (9.51 mm), para la gradación se evaluó un porcentaje promedio de aire atrapado de 3%, siguiendo los criterios de (ASOCRETO, 1995) y presentados en la Tabla 49.

Tabla 49. Contenido de aire atrapado frente a granulometría gruesa.

Agregado grueso		Porcentaje promedio aproximado de aire atrapado
Pulgadas	Mm	
3/8	9.51	3
½	12.5	2.5
¾	19.1	2
1	25.4	1.5
1 ½	38.1	1
2	50.8	0.5
3	76.1	0.3
6	152.4	0.2

Fuente: (ASOCRETO, 1995). Tecnología del Concreto, Tomo 1 - Materiales, propiedades y diseño de Mezclas, pág. 138.

Frente a las condiciones de asentamiento (10 cm) y granulometría de los agregados (9.51mm) se estimó la cantidad de agua para la mezcla en 225 Kg/m<sup>3</sup>, de acuerdo al contenido de aire en la mezcla, valores de acuerdo a la Tabla 50.

Tabla 50. Proporción de agua de acuerdo al TMN y Asentamiento requerido para la obra

Condición del contenido de aire	Asentamiento (cm)	Agua en kg/m <sup>3</sup> de concreto para los TMN del agregado indicados							
		10	12.5	20	25	40	50	70	150
Concreto sin aire incluido	3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-
	Aire atrapado	3	2.5	1.5	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido	3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	-
	Aire atrapado	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

Fuente: (ASOCRETO, 1995). Tecnología del Concreto, Tomo 1 - Materiales, propiedades y diseño de Mezclas, pág. 191.

En la siguiente tabla, se presentan las características que debe cumplir el concreto de acuerdo a la trabajabilidad, asentamiento y condiciones de durabilidad requeridas para la obra.

Debido al espacio estrecho de un túnel, las condiciones para colocar los elementos serian difíciles, el asentamiento recomendado se encontraría en rangos de 10 a 15 cm, una condición humedad que permitirá la manipulación y trabajabilidad adecuada para los equipos y ambiente de trabajo.

Tabla 51. Asentamientos de cono recomendados para diversos tipos de construcciones.

Tipo de estructura – Condiciones de Colocación	Consistencia	Grado de trabajabilidad	Asentamiento en cm	
	Tipo de concreto		Máximo	Mínimo
Vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaleta	Muy seco	Muy pequeño	0	2.0
Pavimentos vibrados con maquina mecánica	Seco	Pequeño	2	3.5
Construcciones en masa voluminosas, losas medianamente reforzadas con concreto simple pavimentos con vibradores normales	Semi – seco	Pequeño	3.5	5.0
Losas medianamente reforzadas y pavimentos compactados a mano, columnas, vigas, fundaciones y muros con vibración	Media	Medio	5	10
<b>Secciones con mucho refuerzo, trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimientos de túnel, no recomendable para compactarlo con demasiada vibración</b>	<b>Humedad</b>	<b>Alto</b>	<b>10</b>	<b>15.0</b>

Fuente: (ASOCRETO, 1995). Tecnología del Concreto, Tomo 1 - Materiales, propiedades y diseño de Mezclas, pág. 187.

Para estimar la proporción de agua / cemento, se consultó a expertos en el uso de concreto en obras subterráneas, frente a las características que debería cumplir la mezcla en los proyectos, teniendo en cuenta el rendimiento de los aditivos para el control de la infiltración.

Además, se debe prever las características de resistencia mínima requerida (26 Mpa) para los concretos elaborados bajo la normativa – NTC 4483, debe ajustar la relación A/C acorde con las características de la obra, materiales y propiedades de los elementos utilizados.

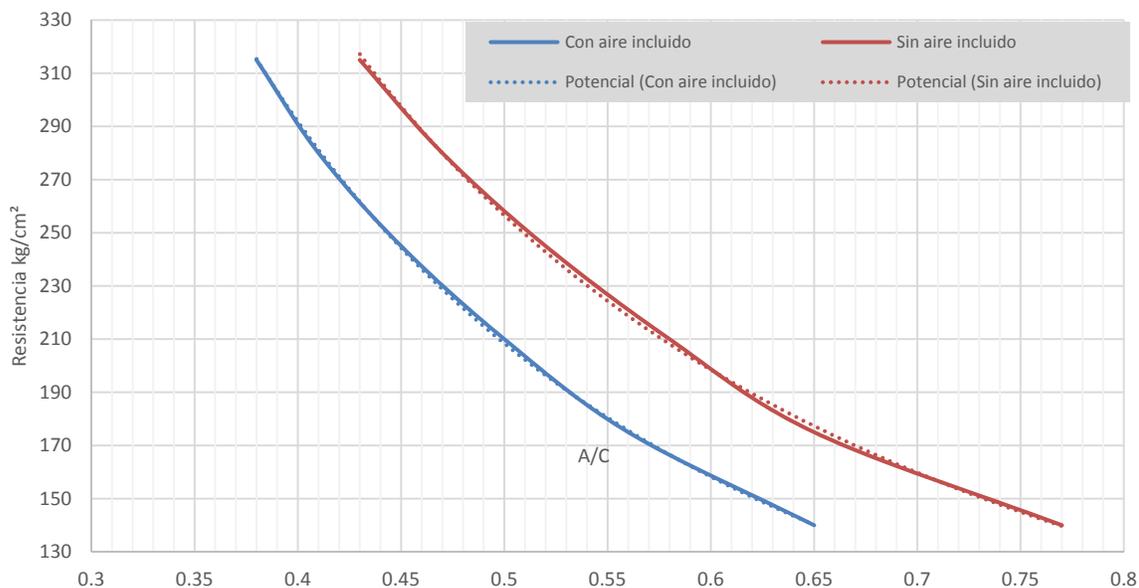


Figura 162. Resistencia a compresión frente a la relación Agua / cemento.

Fuente: Adaptado. (ASOCRETO, 1995). Tecnología del Concreto, Tomo 1 - Materiales, propiedades y diseño de Mezclas, pág. 192.

Bajo estas consideraciones se evaluó la relación A/C (0.49) apta para las condiciones de obra, que permitió ajustar proporciones de 225 Kg/m<sup>3</sup> de agua y 461 Kg/m<sup>3</sup> de cemento, además este índice permite visibilizar los efectos de las diferentes adiciones de materiales impermeabilizantes.

Con las características granulométricas de arena y grava de los materiales, se calibraron las proporciones de elementos en la mezcla, con base en la metodología de la Note Road Laboratory (RNL), por medio grafico se ajustan las diferentes cantidades de agregados, como se representa en la Figura 163.

Este método evalúa las fracciones óptimas de arena y grava, la proporción de estos elementos en la mezcla, que permitió definir las cantidades del 55 % de Arena y 45% para la parte gruesa de la mezcla.

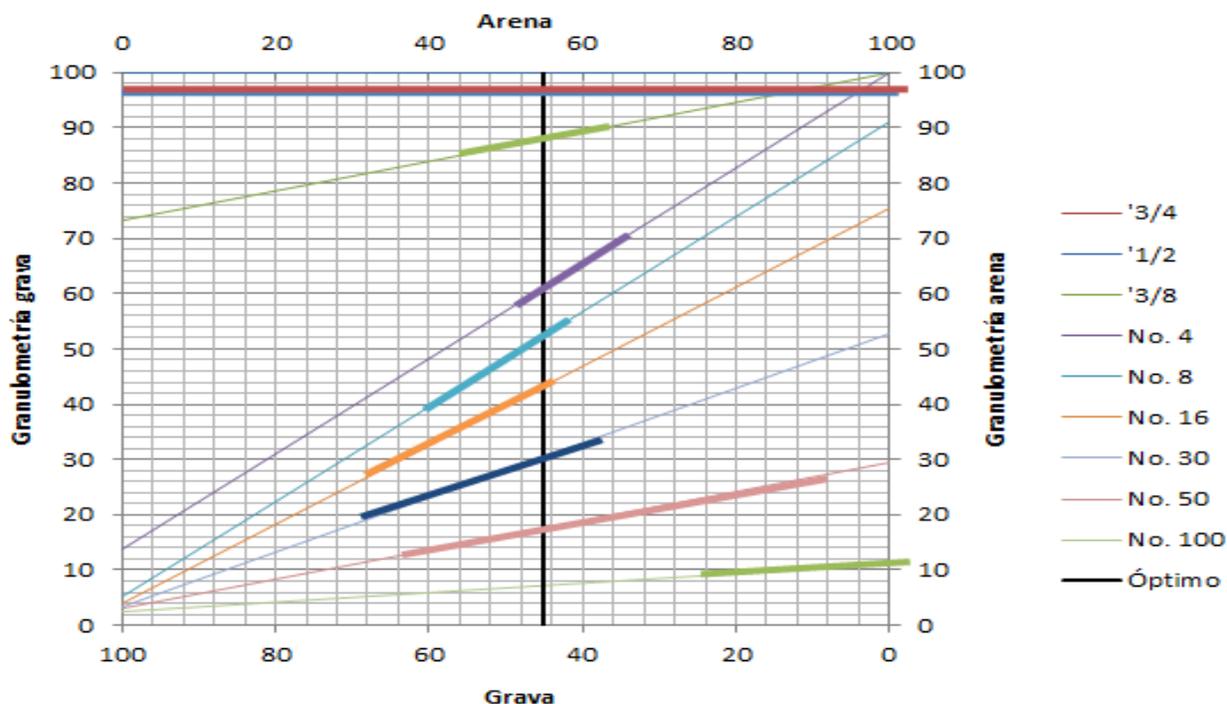


Figura 163. Granulometría del material, rangos de optimización frente a la mezcla.

Fuente: Adaptado. (ASOCRETO, 1995). Tecnología del Concreto, Tomo 1 - Materiales, propiedades y diseño de Mezclas, pág. 200.

Además, si la humedad intrínseca de los agregados es mayor a la absorción, deberá ajustarse los valores, en caso de una cantidad de agua en exceso, se requiere descontar del valor de agua inicialmente calculada.

Finalmente, se definen las cantidades de los diferentes materiales de la mezcla de acuerdo al volumen requerido por espécimen cilíndrico de concreto, cuyas dimensiones promedio son: 102 mm, altura 200 mm, y un volumen medio de 0.0016 m<sup>3</sup> y con proporciones de materiales que se presentan en la Tabla 52.

Tabla 52. Cantidad de materiales en la mezcla para la elaboración de concreto.

Material	Volumen, V m <sup>3</sup>	Densidad, D kg/m <sup>3</sup>	Peso por cilindro, W g
Cemento	2.36E-04	3072	724
Agua	3.53E-04	1000	353
Aire	4.71E-05	0	0
Grava	4.21E-04	2680	1129
Arena	5.13E-04	2688	1380
<b>Total</b>	<b>1.57E-03</b>		<b>3586</b>

Fuente. Elaboración propia, proceso de diseño de mezcla para los cilindros de concreto.

#### 7.3.4. Especímenes de concreto elaborados.

Los cilindros de concreto se elaboraron con base en la normativa NTC 550, la cual define las pautas para la preparación y curado de cilindros de concreto en las obras de ingeniería. Dentro de las consideraciones que se destacan en la norma, se puede reseñar:

- Las muestras deberán ser lo más representativas de concreto fresco utilizado en la obra.
- Se debe comparar los resultados de resistencia y parámetros evaluados para los especímenes con otros métodos de ensayo en la obra.
- El concreto utilizado para los diferentes especímenes deberá tener el mismo nivel de asentamiento, contenido de aire y agregados que el diseño previamente establecido.

Además, la NTC 550 está complementada por normativas que describen los procedimientos y elementos requeridos en la elaboración de los cilindros de concreto, las cuales se destacan:

- NTC 396 de 1992 – ASTM C-143. Método de ensayo para determinar el asentamiento en el concreto.
- NTC 454 de 1998 – ASTM C-192. Tomas de muestras en el concreto fresco.
- NTC 504 de 1995. ASTM C-617. Refrentado de los especímenes cilíndricos de concreto.
- NTC 1000 de 1993. ISO 1000. Sistema internacional de unidades.
- NTC 1028 de 1994. ASTM C-173. Determinación del contenido de aire en el concreto fresco.
- NTC 1032 de 1994. ASTM C-231. Método de ensayo para determinar el contenido de aire en el concreto fresco.
- NTC 1929 de 1995. ASTM C-138. Método de ensayos para determinar la masa unitaria, rendimiento y contenido de cemento y aire por gravimetría.
- NTC 3357 de 1992. ASTM C1064. Método de ensayo para determinar la temperatura del concreto fresco.
- NTC 3512 de 1993. ASTM C 511. Cámaras, cuartos húmedos y tanques para el almacenamiento de agua, empleadas en los ensayos de cementos hidráulicos y concretos.
- ASTM C 470. Especificaciones para los moldes de los especímenes de concreto.

De acuerdo a (ICONTEC, NTC - 550. Elaboración y curado de los especimientes de concreto en obra, 2000), se señala que los moldes para la elaboración de especímenes de concreto deben

ser de acero, hierro fundido o de cualquier material no absorbente y no reactivo con el concreto que contiene cemento Pórtland y otro cemento hidráulico, se deberá mantener sus dimensiones y formas para su uso.

Los moldes deberán ser herméticos, se podrá utilizar elementos sellantes apropiados como grasa espesa, platina o ceras micro cristalinas para evitar el escurrimiento, el elemento deberá aceitarse con una capa delgada de aceites antes de su uso, en la Figura 164, se representan las dimensiones y elementos característicos del molde metálico utilizado para la elaboración de los cilindros de concreto.

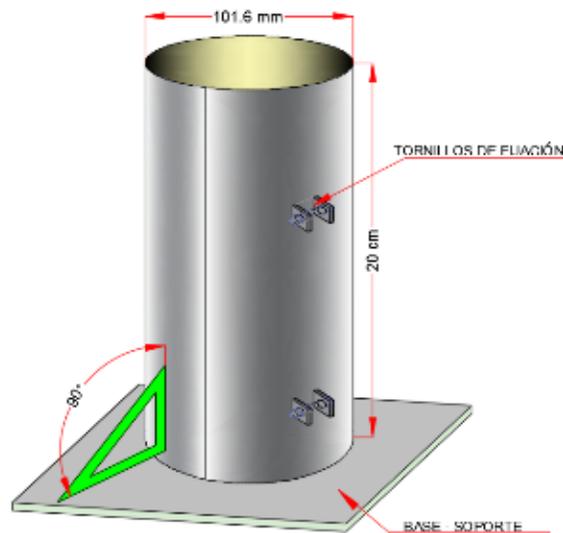


Figura 164. Dimensiones del molde para preparación del espécimen  
Fuente: Elaboración Propia.

En la Fotografía 2, se presenta las características del ambiente y herramientas utilizadas, durante el proceso de elaboración de los cilindros de concreto, en instalaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, entre el periodo de Agosto de 2016 a Febrero de 2017.



Fotografía 2. Materiales y elementos utilizados en la elaboración de los especímenes.  
Fuente. Elaboración propia, durante el proceso la producción de los cilindros de concreto.

Así mismo, para la elaboración de los especímenes se requieren herramientas y elementos como:

- Taras y equipos de pesado de materiales.
- Recipientes plásticos y metálicos.
- Bolsas plásticas.
- Carpas.
- Cono y barra metálica para medición de asentamiento de la mezcla.
- Carretillas.
- Moldes metálicos y plásticos cilíndricos.
- Martillos de caucho.
- Palas, palustres y cucharones.
- Varillas compactadoras metálicas, de acuerdo a la siguiente tabla y la (ICONTEC, NTC - 550. Elaboración y curado de los especímenes de concreto en obra, 2000), se utilizaron varillas con diámetro 10 mm, y longitud de 300 mm, durante la preparación se ejecutan 25 golpes por capa vertida en el cilindro, esto para una compactación uniforme.
- Sacos y bolsas plásticas.

Tabla 53. Especificaciones de las varillas compactadoras en relación con el diámetro del cilindro.

Diámetro del cilindro, mm	Diámetro de la varilla, mm	Longitud de la varilla, mm	Numero de golpes/capa
< 150	10	300	25
150	16	600	25
200	16	600	50
250 o mayores	16	600	75

Fuente: (ICONTEC, NTC - 550. Elaboración y curado de los especímenes de concreto en obra, 2000, pág. 5)

La mezcla elaborada se vertió sobre una superficie plástica plana y limpia, previamente instalada, como se presenta en la Fotografía 3, se realizó un proceso de remezclado con un palustre para la homogeneizar el material, los cilindros fueron fundidos y fraguados en posición vertical a una altura del doble del diámetro.



Fotografía 3. Elaboración y encofrado de los especímenes cilíndricos para la prueba.  
Fuente. Elaboración propia, durante el proceso la producción de los cilindros de concreto.

Se utilizó un método de compactación manual por apisonamiento en 3 capas de aproximadamente 70 mm de espesor, vertidas en el interior del molde cilíndrico, luego se apisono cada capa por el extremo redondeado de la varilla metálica, distribuyendo los golpes en toda la sección de cada capa, la varilla debe ingresar el espesor de cada una, posteriormente, se golpea los bordes del molde por medio de un martillo de caucho entre 10 a 15 veces, con la finalidad de retirar el mayor número de vacíos y burbujas de aire atrapadas.

Así mismo, durante el vertido de cada capa de la mezcla se movió la cuchara en todo el perímetro del molde, para su distribución correcta y una segregación mínima.

Posterior al proceso de compactación del molde elaborado, se enraso la superficie superior expuesta, por medio de la varilla compactadora, ocasionalmente con palustre, para definir una superficie lo más plana posible, siguiendo las especificaciones de la norma (ICONTEC, NTC 504. Refrentado de especímenes cilíndricos de concreto., 2005).

Cada espécimen se identificó con marquillas de papel colocadas en la superficie expuesta, como se presenta en la Figura 165.

<b>S-1</b>	Maestría en Geotecnia - Tesis Tuneles
	Luis Alejandro Ruíz
	Tipo de aditivo, Numero de muestra
	Fecha elaboración:



Figura 165. Marquillas de identificación de los especímenes elaborados.  
Fuente. Elaboración propia, durante la elaboración de los especímenes.

Posterior al proceso del moldeo, se realiza el curado inicial, los especímenes aun con los moldes se ubicaron en zonas húmedas y protegidas de radiaciones para evitar la evaporación y pérdidas de humedad, en las áreas expuestas del concreto elaborado se protegió por medio de plásticos y material no absorbente, por un periodo de 24 horas.

Luego, se realizó el desencofrado de los moldes, identificación de los cilindros de concreto, su ubicación en la piscina de almacenamiento y curado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por un periodo de 28 días, como se presenta en la Fotografía 4.



Fotografía 4. Especímenes sumergidos durante 28 días en las instalaciones de la Escuela.  
Fuente. Elaboración propia, proceso curado de los especímenes, piscina ECI.

#### Verificación de la resistencia de los especímenes.

Para determinar las características mecánicas de los especímenes elaborados, se ejecutaron pruebas de resistencia a la compresión en los cilindros con las características del diseño de la mezcla.

En los túneles, el material de revestimiento tendrá la finalidad de generar una adecuada apariencia exterior y el control del agua, además deberá soportar las cargas producidas por la presión hidráulica del agua que irrumpe en la excavación. Este material será un refuerzo a los elementos principales de estabilidad del túnel (roca natural, arcos, pernos, concreto reforzado), también deberá asimilar las convergencias desarrolladas en la obra.

Los especímenes se elaboraron de acuerdo con lo establecido en la normas (ICONTEC, NTC - 673. Ensayo de Resistencia a la compresión de especímenes cilindricos de concreto, 2010), (ICONTEC, NTC - 550. Elaboración y curado de los especímenes de concreto en obra, 2000).

En la Tabla 54, se presentan las dimensiones de las probetas de concreto elaboradas para la evaluación de las características de resistencia.

Tabla 54. Dimensiones de cilindros evaluados en los ensayos de resistencia.

Muestra	Fecha	Edad	Diámetro promedio - mm	Área cm <sup>2</sup>	Altura cm - Promedio	Observación del tipo de concreto
CRA-26-1	21/7/16	28	102.02	81.74	20.13	Mezcla patrón definida.
CRA-26-2	21/7/16	28	101.30	80.60	20.17	Mezcla patrón definida.
CRA-26-3	21/7/16	28	101.57	81.02	20.10	Mezcla patrón definida.
CRA-26-4	17/8/16	30	101.69	81.22	20.23	Aditivo Xipex 2% frente al contenido del cemento.
CRA-26-5	17/8/16	30	102.03	81.76	20.20	Aditivo Xipex 2% frente al contenido del cemento.
CRA-26-6	17/8/16	30	102.46	82.46	20.23	Aditivo Xipex 2% frente al contenido del cemento.
MC- 5	20/10/16	33	102.14	81.94	20.27	Mezcla de concreto con aditivo metacaolín.
MC-6	20/10/16	33	101.85	81.47	20.13	Mezcla de concreto con aditivo metacaolín.
MC-2	20/10/16	33	102.10	81.87	20.33	Mezcla de concreto con aditivo metacaolín.
C11 **	-	28	-	-	-	Fib Sintética 0.8 Kg/m3, Fib Metálica 18 Kg/m3 y A/C=0.45
E5 **	-	28	-	-	-	Fib Sintética 0.5 Kg/m3, fib Metálica 22 Kg/m3 y A/C=0.45
E7 **	-	28	-	-	-	Fib Sintética 5 Kg/m3, fib Metálica 33 Kg/m3 y A/C=0.45

Fuente. Elaboración propia, durante el proceso evaluación de resistencia en los especímenes.  
 \*\* (Acero, 2017). Resultados de ensayos de concreto con fibras.

Como se presenta en la Tabla 55, en los ensayos se obtuvieron valores de carga entre 29 y 41 Mpa, en muestras con edades entre 28 y 33 días. Las presiones obtenidas fueron superiores a las requeridas para las especificaciones del ensayo (26 Mpa), y las esperadas para un material de revestimiento de túneles, estos resultados se presentan de manera gráfica en la Figura 166.

Tabla 55. Valores de resistencia obtenidas en los ensayos de compresión.

Muestra	Fecha	Edad	Carga Kg - f	K/cm2	Mpa
CRA-26-1	21/7/16	28	24300	297.27	29.16
CRA-26-2	21/7/16	28	25000	310.18	30.43
CRA-26-3	21/7/16	28	25500	314.75	30.88
CRA-26-4	17/8/16	30	29200	359.51	35.27
CRA-26-5	17/8/16	30	31000	379.17	37.20
CRA-26-6	17/8/16	30	29200	354.13	34.74
MC- 5	20/10/16	33	27260	332.69	32.64
MC-6	20/10/16	33	24210	297.15	29.15
MC-2	20/10/16	33	25600	312.68	30.67
C11 ***	-	28	-	360.56	35.37
E5 ***	-	28	-	417.78	40.98
E7 ***	-	28	-	374.44	36.73

Fuente. Elaboración propia, durante el proceso evaluación de resistencia en los especímenes.  
 \*\*\* (Acero, 2017). Resultados de ensayos de concreto con fibras.

Las muestras fueron elaboradas con el diseño de la mezcla para una relación A/C=0.49, con un tamaño máximo nominal de partículas de 3/8 Pulgadas (9.51mm), edades entre 28 y 33 días,

señalando que los especímenes C11, E5 y E7 fueron evaluados a partir de la investigación Académica de la Ing. Paola Acero, la cual se denomina “Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles”, los cuales presentan un índice A/C = 0.45.

Los resultados demuestran que los especímenes Cr26-1, Cr26-2 y Cr26-3, para un concreto sin aditivos presentaron valores de resistencia entre 29 y 30 MPa, es decir, se presentó un incremento entre el 12 al 20% del valor requerido para la (NTC 4483 - Metodo de Ensayo para determinar la permeabilidad en el concreto al agua, 1998), como se puede apreciar en la Figura 166.

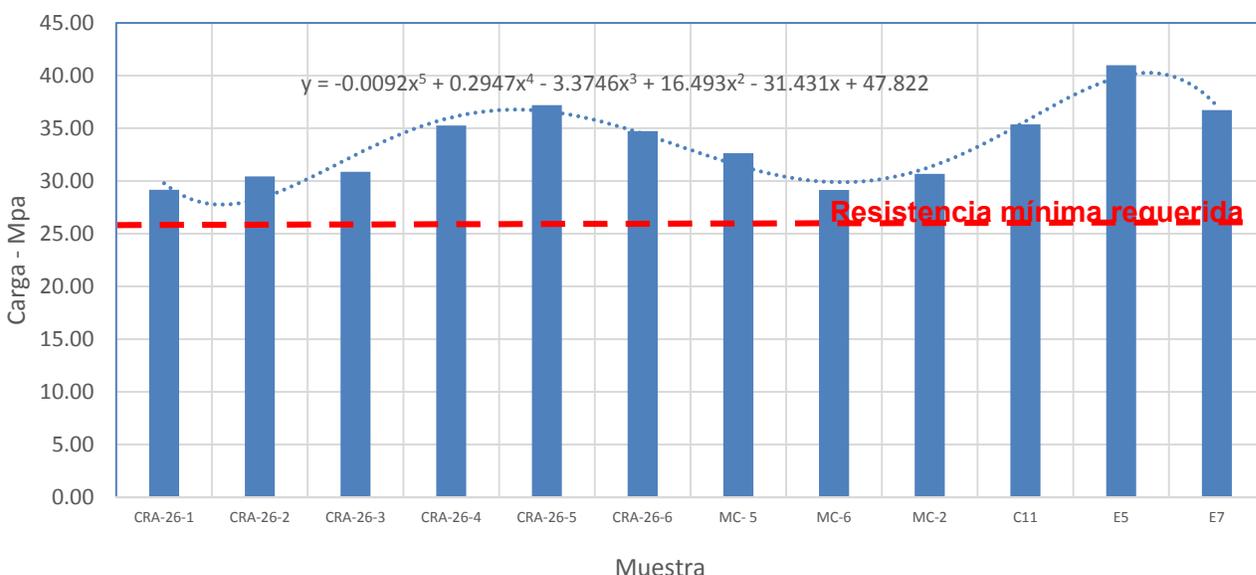


Figura 166. Valores de carga máxima para los diferentes especímenes evaluados. Fuente. Elaboración propia, durante el proceso evaluación de resistencia en los especímenes.

Para los especímenes con aditivo Xipex – Admix en una dosificación del 2% con respecto a la proporción de cemento se obtuvieron valores de carga máxima hasta 37 Mpa, presentando un incremento del 43% con respecto al mínimo valor requerido por la norma (26 Mpa), posiblemente por efecto de los aditivos por cristalización que generaron un sellamiento y cristalización de los poros, cierre de zonas abiertas de la pasta de concreto, mejorando la estructura de la pasta del agregado.

Mientras que con las muestras con adiciones de metacaolín se obtuvieron valores de carga máxima hasta de 32.6 MPa, es decir, que se logró un aumento de resistencia entre el 12 y 25% con respecto a la requerida.

Así mismo, las mezclas de concreto con fibras presentaron valores de resistencia entre 35 y 40 MPa, debido a que se trata de una mezcla con dosificaciones típicas para concretos de soporte de túneles.

En la Fotografía 5, se pueden apreciar las actividades realizadas, geometrías de los especímenes y características de los equipos utilizados durante las pruebas de resistencia sobre los cilindros de concreto evaluados.



Fotografía 5. Prueba de resistencia en los cilindros elaborados.  
Fuente. Elaboración propia, durante el proceso evaluación de resistencia en los especímenes.

Las características de rotura en los ensayos, de acuerdo a la NTC -673, pág. 9, presentaron fisuras verticales encolumnadas, en algunos casos en ambos extremos del espécimen. El estado final de rotura, característico para algunas de las muestras egaludas, se muestra en la Fotografía 6.



Fotografía 6. Estado de rotura en algunos especímenes ensayados a compresión.  
Fuente. Elaboración propia, durante el proceso evaluación de resistencia en los especímenes.

Con los resultados de resistencia se demuestra que los valores de carga se encuentran por encima del mínimo requerido en la norma de infiltración para concretos de revestimiento.

A partir de los resultados, se concluye que los picos en los valores de resistencia, se encuentran influenciados por la mejora de la estructura del concreto con las fibras y aditivos, con una reducción de la microfisuración y también de las propiedades mecánicas de los elementos evaluados.

#### 7.3.5. Características de los aditivos utilizados.

Para evaluar las proporciones de aditivos de impermeabilización utilizados se estudiaron las especificaciones de los materiales y recomendaciones de fabricantes de los materiales, estas adiciones tienen la finalidad de:

- Mejorar las fisuras del concreto debido a los procesos de contracción o por los esfuerzos que se aplican en los materiales en las obras de ingeniería.
- Generar superficies de cristalización para el sellar la estructura porosa del concreto.
- Densificar la estructura del concreto.

#### Metacaolín.

Es un silicato, su estructura está compuesta por capas de sílice y alúmina, organizadas en forma tetraedral y ortoaedral, eléctricamente neutras, con un tamaño de partículas finas, en la clasificación mineralógica se denomina como di silicato de aluminio  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  , es una

puzolana amorfa con propiedades hidráulicas que permiten emplearlo como material suplementario cementante.

Es un subproducto de la arcilla caolinita que se produce en elevadas temperaturas, en esta investigación se utilizaron materiales producidos a temperaturas entre 650 y 750 °C, presenta un color blanco, es utilizado para la fabricación de porcelana y producción de papel. En la antigüedad se mezclaba con morteros hechos a base de cal, los cuales presentan una alta cohesión y adherencia de los agregados.

Actualmente, el material se utiliza en mezcla de concretos y morteros de alta resistencia, masillas de emboquillado, recubrimiento de piscinas y tanques de almacenamiento de agua.

En Colombia, la extracción de este material se produce en la Unión – Antioquia, Aguador, San Félix – Caldas, Santa Rosa, Duitama, Paipa, Tuta – Boyacá, La Cruz, Maqui, Pasto, San Pablo – Nariño, Risaralda, Huila, en el municipio de Oiba – Santander, vereda Barroblanco, en esta última zona minera fue suministrado el material para la mezcla como aditivo en los ensayos de concreto.



Figura 167. Zona de extracción de Metacaolín de la empresa Easycem, Oiba – Santander.  
Fuente: El Autor.

El material se somete a procesos de secado natural y cocción en hornos a temperaturas entre 400 a 900 °C, que genera pérdida de la humedad natural (cerca del 14% de la masa), este proceso fracciona la estructura del mineral, se ha reportado 750 °C como una temperatura óptima lo que genera un material cerámico relativamente inerte.

La calcinación se produce en hornos rotatorios en tiempos controlados, que requieren un molido del material previamente.

Los ensayos más comunes se han enfocado en mezclas de concreto con metacaolín para evaluar el incremento en la resistencia de los materiales, las cuales han concluido en factores como: el efecto del relleno, la aceleración de hidratación del cemento y la reacción puzolana del Metacaolín con el cemento utilizado, densificando su estructura, mejorando la resistencia y las propiedades hidráulicas del material.

De acuerdo con investigaciones previas (Agudelo & Espitia, 2006), en un módulo dinámico de elasticidad para una relación A/C=0.5 en concretos con porcentajes entre 10 % a 20% de Metacaolín se evidencio aumentos desde 38 KN /mm<sup>2</sup> hasta 50KN/mm<sup>2</sup>.

Así mismo, para el modulo estático de elasticidad se ha evaluado un incremento por el uso del Metacaolín, en mezclas con relaciones de A/C = 0.4, 5% a 10% de Metacaolín, donde se evidencio que a 28 días de curado los valores en el módulo de elasticidad aumento en un 15%.

Tabla 56. Módulo de elasticidad Mezclas Metacaolín para concreto con relación A/C=0.4.

Edad del Ensayo - Días	Modulo Elasticidad		
	Patrón	5 % MC	10% MC
28	4805	5515	5640
91	4980	5685	880

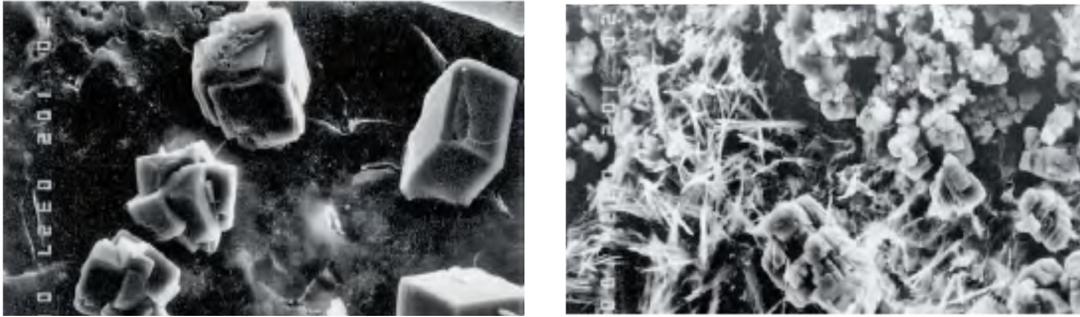
Fuente: 1994. (Agudelo & Espitia, 2006). Efecto del metacaolín en el comportamiento del concreto

El Metacaolín produce una reducción en los efectos sílice – álcali. (Agudelo & Espitia, 2006), debido al refinamiento y densificación de la microestructura del concreto, con la reducción de la permeabilidad y restringiendo el paso de agua, además de la reducción del pH de los poros en la mezclas, importante en procesos de disolución de materiales debido a la agresividad de las aguas subterráneas.

#### Materiales de cristalización.

Este tipo de aditivos son materiales no solubles de cuarzo, generados por la propagación de una solución química en la mezcla de concreto, este proceso genera capas de cristales impregnados con las soluciones de los aditivos, microscópicamente conformando una estructura cristalina establ. Hacia el interior del elemento de hormigón la eficiencia del proceso dependerá del porcentaje de absorción y reacciones de los componentes activos con el agua.

Figura 168. Impermeabilización del concreto por cristalización.



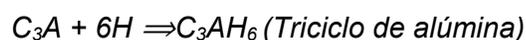
Fuente: (CIPSA, 2015). Especificaciones de impermeabilización del concreto por cristalización. Pág. 9.

Estos aditivos contienen proporciones de cemento Portland, arena sílicea y materiales inorgánicos variados, al ser aplicados en forma de revestimiento pastoso (lechada), dan lugar a una reacción catalítica en los poros y en los conductos capilares del substrato del concreto, comercialmente se presenta como un agregado granular fino que reacciona con el agua y producirá carbonato de calcio y silicatos de agua soluble.

El aditivo usa el agua como un medio de migración y penetración en los capilares del concreto, los materiales precipitados forman una reacción química entre el aditivo, la humedad y los productos químicos provenientes de la hidratación del cemento (sales minerales, hidróxidos de calcio, óxidos minerales y partículas no hidratadas del cemento).

En este balance químico por el cemento de hidratación formara un silicato de calcio hidratado CSH.

Reacciones comunes de la mezcla.



En este proceso de hidratación los cristales reaccionaran con el hidróxido de calcio, óxidos y sales minerales generando el crecimiento de cristales fibrosos no solubles, que se desarrollan internamente en el concreto, cerrando y sellando herméticamente los conductos frente a la penetración al agua en cualquier dirección, bajo estas condiciones los poros y vacíos se sellan, haciéndose impermeables, eficientes con respecto a las condiciones de filtración del agua.

### Otros aditivos comerciales.

Otro tipo de aditivos se basan en la mezcla de cementos, agregados minerales, amino alcoholes, sales de cloruro y fillers, que generan elementos insolubles en la estructura porosa y capilar del concreto, sellando las fisuras y hermetizando la estructura del hormigón, estos materiales se presentan en proporción entre el 1 y 2% del contenido total de cemento, los cuales se adicionan a la mezcla al agregado fino y grueso.

#### 7.4. Ensayo de infiltración de Agua a presión en el Concreto.

El ensayo permite evaluar el flujo del agua a través de la red capilar del concreto, durante la ejecución del método se determina la profundidad de infiltración del agua en los especímenes elaborados, ejerciendo sobre la cara del cilindro una presión equivalente a 0.5 Mpa (50 m de agua), este esfuerzo será constante por un periodo mínimo de 96 horas.

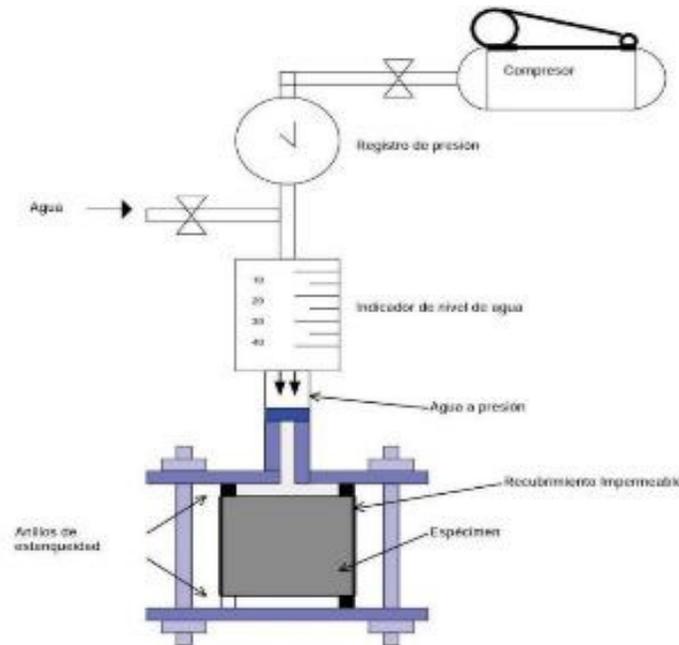


Figura 169. Dispositivo y esquema típico del montaje  
Fuente: (Icontec, 1998). Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua, pág. 3

Durante el ensayo se registra hasta donde el líquido ingresa en la muestra, midiendo el espesor de infiltración del agua, previamente se deberá hacer un corte perpendicular al cilindro, de acuerdo con (ICONTEC, NTC-722. Metodo de ensayo para determinar la resistencia a la tension indirecta de especímenes cilindricos de concreto., 2000)

##### 7.4.1. Preparación de la probeta.

Las muestras de concreto se deben elaborar con base en las normativa NTC1377, cada una de las caras del espécimen se deben cortar, para generar una superficie plana en el interior del núcleo de concreto, y hacer más representativo el material evaluado. Posteriormente, se recubre lateralmente la muestra con pintura epoxica para evitar filtraciones y generar la hermeticidad de los costados del cilindro durante el ensayo.



Fotografía 7. Recubrimiento con pintura epoxica en la parte lateral de los cilindros.  
Fuente: Elaboración propia, proceso de impregnación epoxica lateral de las muestras.



Fotografía 8. Actividad de acerrado de la muestras en las dimensiones requeridas.  
Fuente: Elaboración propia, proceso de corte de las muestras, laboratorios ASOCRETO.

#### 7.4.2. Características del montaje y equipos de ensayo.

El ensayo se realiza por medio de un dispositivo, con el cual se ejerce una presión de agua a los cilindros elaborados, las celdas de medición constan de platos de acero inoxidable con orificios centrales, los cuales tienen empaques de Neopreno. Este sistema genera un sello frente a la filtración de agua durante el ensayo, en el centro de cada plato se monta la muestra cilíndrica fijada por tornillos y tuercas de sujeción para quedar ajustadas y presurizadas. El esquema típico del ensayo durante las pruebas en cada uno de los núcleos se puede apreciar en la Fotografía 9.



Fotografía 9. Característica del montaje de una muestra cilíndrica en la celda.  
Fuente: El autor, instalaciones y herramientas de ASOCRETO.

Con este montaje, el agua se fuerza a migrar dentro del concreto a una tasa de avance que depende de la permeabilidad del material, al finalizar el tiempo previsto de cuatro días se evalúa la tasa de infiltración del agua en cada muestra.

#### 7.4.3. Procedimiento de ensayo.

Antes del montaje, se cubrirán con grasa mecánica o vaselina los empaques de neopreno, platos, los anillos y cualquier zona de contacto con las superficies de concreto para evitar fugas de agua.

Cuando el dispositivo de ensayo esté totalmente colocado y ensamblado, se integran los acoples de la tubería de agua y presión, se purga el sistema con la abertura de las válvulas de entrada y de desahogo de la tapa, hasta que salga agua, para confirmar que no quede aire atrapado. La siguiente fotografía muestra el montaje descrito:



Fotografía 10. Montaje de los especímenes en los equipos para la presión hidráulica.  
Fuente: Elaboración propia, celdas medición de permeabilidad laboratorio ASOCRETO.

Posteriormente, se verifican las condiciones de presión de agua, se procede a presurizar el sistema accionando las válvulas de aire comprimido, se confirma la presión requerida, esto se realiza en paralelo con muestras de tres cilindros de las mismas características de edad y mezcla.

Al finalizar el tiempo requerido para el ensayo, como mínimo 96 horas, se cierran las válvulas de suministro, se despresuriza el sistema, se retira la muestra de la celda de montaje, midiendo la cantidad de agua que atravesó la probeta en su longitud; se necesitan mínimo tres mediciones de cada muestra para obtener valores confiables.

La aplicación de la presión de agua se debe ejercer en el sentido del vaciado del concreto, los valores que deberán tenerse en cuenta frente a los índices de permeabilidad se presentan en la Tabla 57.

Tabla 57. Relación de permeabilidad en concreto con el coeficiente de permeabilidad y profundidad de penetración.

Valor	Permeabilidad K (m/seg)		
	Baja	Media	Alta
Coefficiente de permeabilidad (m/s)	$<10^{-12}$	$10^{-12}$ - $10^{-10}$	$>10^{-10}$
Profundidad de penetración (mm)	$<30$	30-60	$>60$

Fuente: (Icontec, 1998). Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua, pág. 2

La siguiente figura muestra los equipos empleados para ocasionar la fractura de la muestra:



Fotografía 11. Corte del espécimen y toma de datos de profundidad de penetración del agua

Fuente: Elaboración propia, tensión indirecta de especímenes cilindricos de concreto

En el momento que se retiran las muestras se debe revisar la penetración del agua, para esto se realizó un corte de la probeta lateralmente, registrando la lectura de la profundidad de penetración del agua a cada cilindro.



Fotografía 12. Infiltración del agua en algunos especímenes de concreto sin aditivos y pre fisurado

Fuente: Elaboración propia, toma de datos infiltración de agua en los especímenes de concreto.

Los valores de profundidad de infiltración se presentan de manera detallada para cada muestra evaluada en la Figura 170.

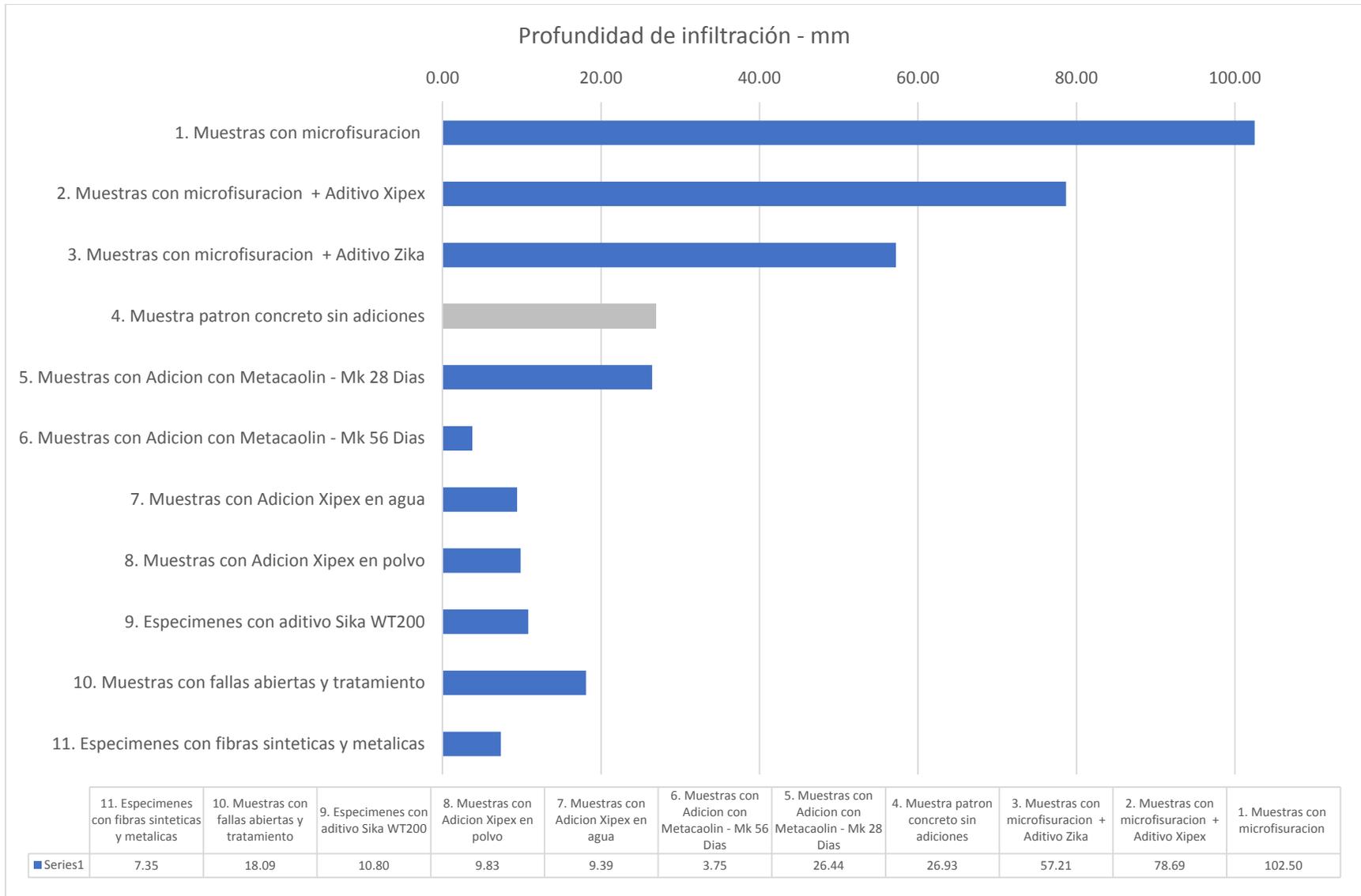


Figura 170. Profundidad de infiltración del agua en los diferentes especímenes de concreto ensayados.  
 Fuente: Elaboración propia, valores de infiltración en el concreto de acuerdo a las pruebas de permeabilidad ejecutadas.

#### 7.4.4. Características de las muestras y resultados.

Algunos de los especímenes de concreto presentaron adiciones de elementos químicos y minerales, para evaluar su efecto en la estructura del agregado, frente al contacto con el agua; algunas muestras se realizaron procesos de carga para originar microfisuración inducida y otras se llevaron hasta el agrietamiento del material con fracturas visibles.

Las muestras con microfisuración se empleo de aditivos de cristalización, cuentan con una relación  $A/C=0.49$ , mientras que los especímenes C11, E5 y E7, muestras con fibras, fueron evaluados a partir de la investigación Académica de la Ing. Paola Acero Pachón, la cual se denomina “Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles”, con una relación  $A/C = 0.45$ .

La finalidad de estos procesos de carga fue la formación de fisuras en las muestras, para evaluar medidas de tratamiento con aditivos y evaluar su eficacia. A continuación se describen con más detalle:

##### 1. Muestras pre fisuradas si adiciones.

Estas muestras presentan una relación  $A/C=0.49$ , no se realizó ninguna adición, contaron con un proceso de elaboración y curado por un periodo de 28 días, posteriormente los especímenes fueron sometidos a procesos de carga hasta de 23 MPa, lo cual indujo una microfisuración en el material. Finalmente, se realizaron las pruebas de permeabilidad e índice de porosidad, donde se obtuvo altos valores de infiltración y 100 % saturación, como se muestra en la Figura 171.

##### 2. Muestras pre fisuradas con tratamiento de aditivo Xipex Admix.

Este grupo de muestras se elaboró con la mezcla definida y con relación  $A/C=0.49$ , no se emplearon adiciones. Luego del proceso de curado a los 28 días, los cilindros fueron sometidos a procesos de carga hasta 23 MPa, después se indujeron una microfisuración en la estructura del material. Posteriormente, las muestras fueron impregnadas con soluciones de aditivos Xipex - Admix por un periodo de 5 a 10 horas, donde se retiró la pátina y capas de aditivos que sobresalían quedando expuesto el núcleo del espécimen de concreto.

Posteriormente, los cilindros se sometieron a pruebas de permeabilidad a presión de agua, en los cuales se registraron valores de infiltración de hasta el 78.69 mm en promedio de la altura de la muestra, valores que se presentan en la Figura 171.

### 3. Muestras pre fisuradas con tratamiento de aditivo Sika.

Este tipo de material presenta las mismas condiciones de mezcla y relación A/C que las muestras descritas anteriormente, no se adicionaron aditivos a la mezcla. Luego del curado los especímenes fueron sometidos a procesos de carga hasta de 23 Mpa, para generar una fisuración en la estructura del concreto.

Posteriormente, los cilindros fueron impregnados con soluciones de aditivos Sika por periodos de 5 a 10 horas.

Luego, las muestras se sometieron a pruebas de permeabilidad a presión de agua, con las que se obtuvieron valores de infiltración de 57 mm de altura en promedio de la muestras, valores que se presentan en la Figura 171, para las diferentes muestras prefisuradas con este aditivo.

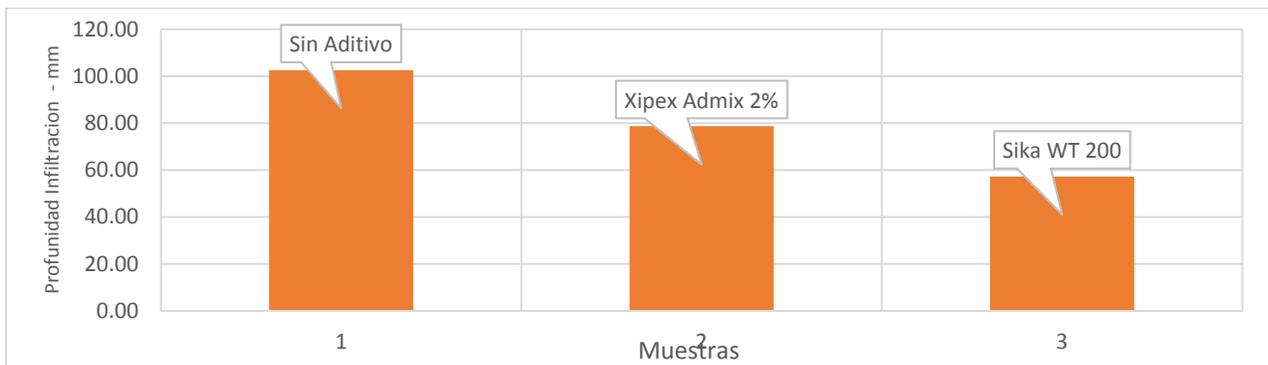


Figura 171. Profundidad de infiltración del agua en especímenes prefisurados, y que posterior al curado se impregnaron con soluciones de aditivos de cristalización.

Fuente: Elaboración propia, ensayos de Permealidad en concreto.

### 4. Muestras Patrón – Concreto sin adiciones.

Muestra patrón, elaborada bajo el diseño de la mezcla descrita anteriormente, presentan una relación A/C=0.49, y edad de 30 días, se realizó la prueba de permeabilidad a presión de agua y se obtuvieron valores de infiltración promedio de 27 mm, ver Figura 172.

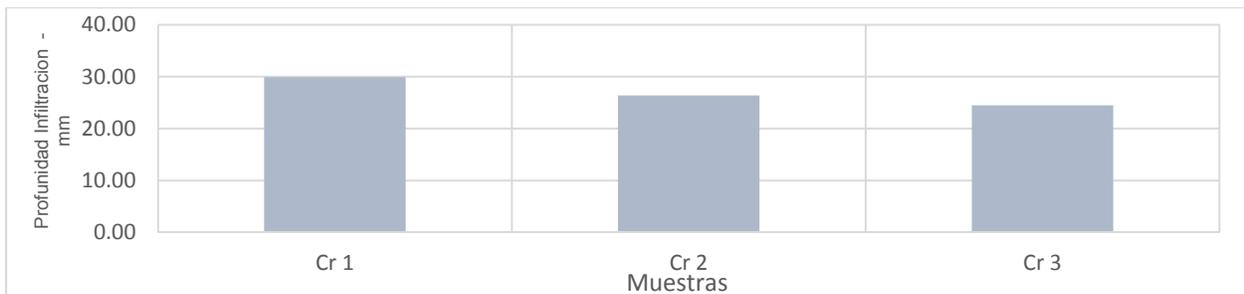


Figura 172. Profundidad de infiltración del agua en las muestras patrón para la mezcla elaborada.

Fuente: Elaboración propia, ensayos de Permealidad en concreto

##### 5. Muestras con adición de metacaolín 28 días.

Muestras elaboradas bajo el mismo diseño de mezcla descrito, con una relación  $A/C=0.49$ , tuvieron adiciones de mineral de metacaolín al 2% con relación al peso del cemento.

Luego del proceso de curado, hacia los 28 días las muestras fueron sometidas a la prueba de permeabilidad, en la cual se reporto un valor promedio de 26 mm de infiltración de agua. Esta reducción en los niveles de infiltración se preveé por la densificación de la pasta y leve reducción de la porosidad a causa de la mezcla del material caolín con los agregados del concreto, resultado que se puede observar en la Figura 173.

##### 6. Muestras con adición de metacaolín 56 días.

Las muestras se elaboraron con las características de mezcla descrita, con una relación  $A/C=0.49$ , adición de cenizas de metacaolín al 2%, luego del curado y hacia los 56 días las muestras fueron ensayadas bajo la prueba a presión de agua, las cuales determino un valor promedio de infiltración de 4 mm.

Los bajos valores de la penetración del agua se deben a los efectos de la edad y la densificación de la estructura del concreto por las partículas del metacaolín, también por el mayor aporte de iones de Silicato de Calcio que conlleva la mejora de la muestra, ver Figura 173.

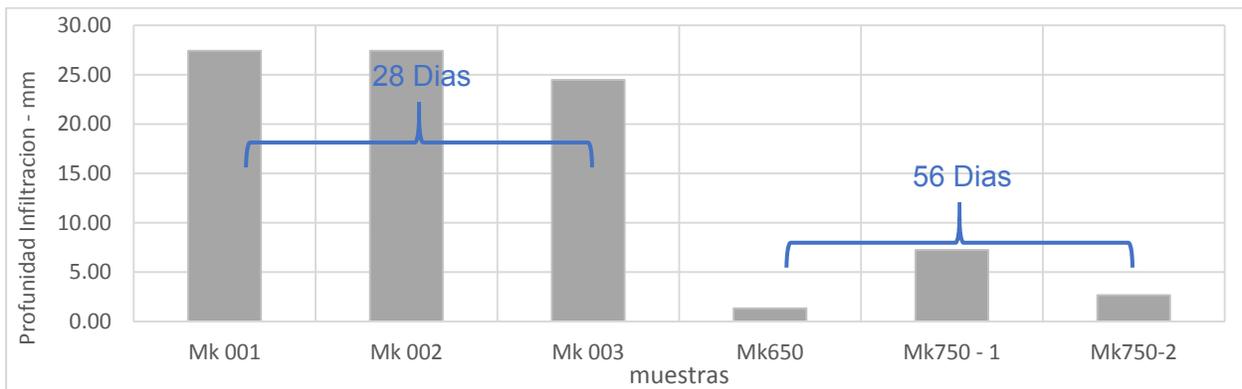


Figura 173. Profundidad de infiltración del agua en especímenes con adición de metacaolín.  
Fuente: Elaboración propia, ensayos de Permealidad en concreto.

##### 7. Muestras con adición de Xipex Admix en Agua.

Para evaluar la eficacia de los elementos de cristalización en la disminución de la permeabilidad mezclados desde la elaboración del concreto, se adicionó un concentrado de Xipex – Admix al 2% del peso de cemento, aditivo mezclado en el agua.

Luego del curado, se ejecutó el ensayo de presión de agua para evaluar las características de permeabilidad de los especímenes, en las que se registraron valores de infiltración promedio de 9 mm de profundidad.

#### 8. Muestras con adición de Xipex Admix en Polvo.

Con similares características que los descritos en el numeral anterior, se realizó la mezcla del aditivo en el polvo del cemento, luego hacia los 31 días se ejecutó el ensayo de permeabilidad.

Los valores de infiltración obtenidos del ensayo para los especímenes fueron de 9.83 mm en promedio, ver Figura 174.

#### 9. Especímenes con aditivo Sika WT200

Con la mezcla de concreto definida para una relación A/C=0.49, se realizó adición de un elemento SIKA reductor de la permeabilidad, aditivo que actúa por cristalización, en una proporción del 2% con respecto al contenido del cemento.

Durante los ensayos para estas muestras se reportaron valores de 10.8 mm en promedio, con edades de los especímenes de 28 días, como se muestra en la Figura 174.



Figura 174. Profundidad de infiltración del agua en especímenes aditivos por Cristalización.  
Fuente: Elaboración propia, ensayos de Permeabilidad en concreto.

#### 10. Especímenes agrietados y medidas de tratamiento.

Algunas de las muestras evaluadas se les aplicó cargas hasta de 35 Mpa, hasta la falla, para tratar de mantener una integridad de los cilindros se emplearon muestras que contenían fibras y relación A/C = 0.45, como se puede apreciar en la Figura 175 – foto (a), los especímenes presentaban zonas agrietadas

Debido a esto, las superficies abiertas en el material presentaron altos índices de permeabilidad, mayores a  $1e^{-5}$  m/seg, con una filtración del agua continua y evidente.

Estas muestras fueron obtenidas a partir de la investigación Académica de la Ing. Paola Acero Pachón, la cual se denomina “Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles”.

Para determinar la efectividad de los aditivos de Cristalización en las muestras fisuradas, se impregnaron soluciones concentradas de aditivos, en periodos de alta saturación de las muestras, que en la Figura 175 muestra las condiciones antes (foto a) con las superficies fisuradas, y después (foto b), pasadas seis semanas de inmersión de las muestras en soluciones de aditivos.

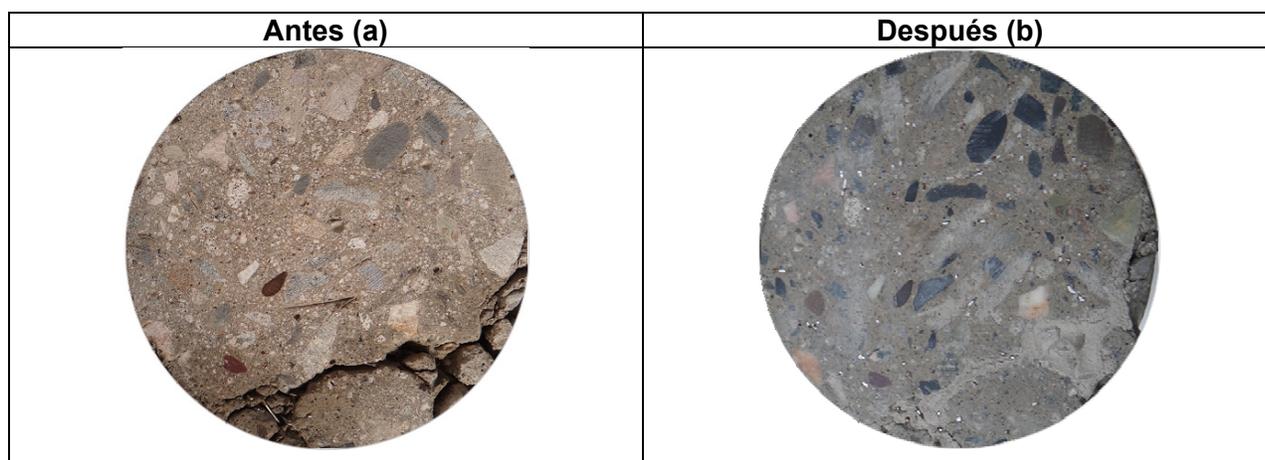


Figura 175. Características de concreto agrietado con medidas de mejoramiento con aditivos  
Fuente: Elaboración propia.

Las etapas para evaluar la efectividad de los aditivos en las muestras fisuradas consistieron en:

- Caracterización de especímenes de concreto con índice  $A/C=0.45$ , con fibras sintéticas y metálicas, en proporciones de fibra entre 1 a 20 Kg/m<sup>3</sup>.
- Ejecución de procesos de carga entre 30 a 40 Mpa hasta la falla de cada espécimen.
- Luego de la falla, se obtuvieron especímenes con fracturas expuestas en la superficie del cilindro.
- Se realizó limpieza y corte de las zonas más fracturadas, en la que se mantuvo una geometría apta para realizar la impregnación de aditivos y ensayos de permeabilidad.
- Posteriormente, se colocó cinta adhesiva de alta resistencia en el contorno de los cilindros, solo dejando expuesta la cara superior e inferior de cada cilindro. Ver anexos ensayos de laboratorio.

- Por goteo, se aplicaron soluciones de aditivos en las caras de los especímenes, en 2 partes de polvo y 6 de agua, por un periodo de dos semanas.
- Posteriormente, se removió la pátina formada por los aditivos en la cara de las muestras, se retiró la cinta adhesiva de los cilindros, y se sumergieron los especímenes en soluciones de 90% de agua - 10% de Sika WT200, por un periodo de cuatro semanas.
- Se pulio la superficie lateral y caras de los cilindros.
- Se caracterizó las muestras, para determinar el peso, las dimensiones de altura, área y volumen de cada cilindro.
- Luego, se procedió a realizar el montaje de las muestras para determinar la profundidad de infiltración e índice de vacíos de cada muestra.

Finalmente, se registraron los valores de profundidad de infiltración de agua, los cuales presentaron valores de infiltración hasta de 18 mm en promedio, como se muestran en la Figura 176, para cada una de las muestras evaluadas.

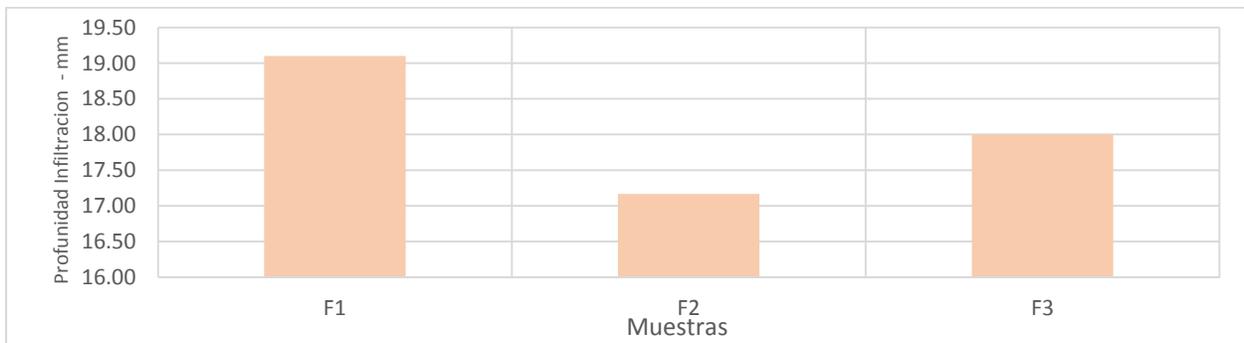


Figura 176. Profundidad de infiltración del agua en especímenes agrietados y con procesos de tratamiento con aditivos por cristalización.

Fuente: Elaboración propia, ensayos de Permeabilidad en concreto.

#### 11. Especímenes con fibras metálicas y sintéticas.

También, se evaluaron especímenes elaborados con mezclas de fibras sintéticas y metálicas, las cuales se referencian en la Figura 170, aportados del proyecto de investigación académica de la Ing. Paola Acero, denominada “Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles”. Las características de elaboración de estas muestras presentaban condiciones similares de agregados, tamaño máximo nominal y relación A/C = 0.45.

Los valores reportados en las pruebas de evaluación de la permeabilidad fueron de 7.35 mm en promedio, como se puede observar en la Figura 177

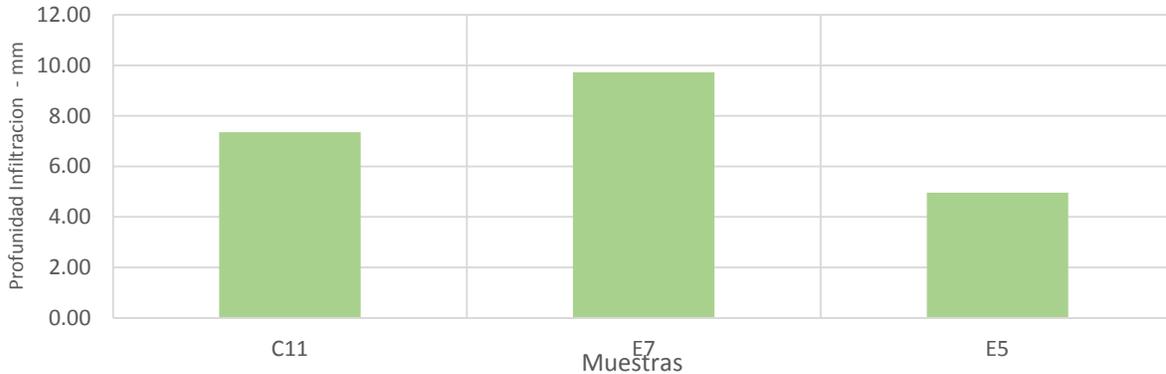


Figura 177. Profundidad de infiltración del agua en especímenes con fibras, A/C=0.45  
Fuente: Elaboración propia, ensayos de Permealidad en concreto.

#### 7.5. Pruebas para determinar la gravedad específica, absorción y vacíos en el Concreto.

Paralelamente a las pruebas de presión de agua en los especímenes de concreto se realizaron ensayos para determinar propiedades como: la porosidad, absorción y relación de vacíos, parámetros requeridos para estimar los concretos de baja permeabilidad, siguiendo las especificaciones (ICONTEC, NTC 5653. Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido, 2008).

Durante las pruebas se utilizaron equipos y herramientas como:

- Balanzas para determinar la masa de los especímenes en diferentes estados de saturación.
- Hornos para el calentamiento y secado de los especímenes.
- Sistemas de calentamiento para hervir agua y saturar los cilindros de concreto elaborados.
- Tanques de almacenamiento de agua con la capacidad de sumergir los especímenes.
- Sistemas de recipientes metálicos en malla, con la posibilidad de integrarse a las balanzas para el pesado de los cilindros en agua.

#### Procedimiento.

Los especímenes evaluados deberán tener masas superiores a 800 g, representativas para los materiales ensayados en la prueba a permeabilidad, en los cuales se realizaron los siguientes procedimientos.

- Secado en horno a periodos mayores a 24 horas, hasta que la masa del material permanezca constante, para retirar la humedad y huella de agua en cualquier punto de la muestra, luego se determina el peso seco del espécimen.



Fotografía 13. Horno para el calentamiento de las muestras en temperaturas entre 100 a 110°C  
Fuente: Elaboracion propia, laboratorio de suelos y rocas ECI.

- Se debe saturar en agua las muestras evaluadas, por un periodo mayor a 48 horas, hasta que se genere una colmatación y saturación total del espécimen, corroborando que la masa permanezca constante con el peso adicional, luego, se determina el peso frente a este nuevo estado, como se puede observar en la Fotografía 14.



Fotografía 14. Recipiente para saturación de los especímenes evaluados.  
Fuente: Elaboracion propia, laboratorio ASOCRETO.

- Se deberá hervir agua en recipientes metálicos, con los especímenes, por un periodo mayor a 5 horas, luego, se enfría por irradiación natural del calor en un tiempo de 14 horas, se retira la humedad superficial de la muestra y se determina la masa del espécimen hervido superficialmente seco, tareas y herramientas con las que se presenta en la Fotografía 15.



Fotografía 15. Recipiente metálico, proceso de cocción y saturación de especímenes con agua hervida  
Fuente: Elaboración propia, laboratorio ASOCRETO.

- Posteriormente, las muestras se sumergen en el tanque de almacenamiento de agua, con un recipiente metálico en malla y alambre para medir el peso sumergido de la muestra.



Fotografía 16. Recipiente metálico, proceso de cocción y saturación de especímenes con agua hervida  
Fuente: Elaboración propia, laboratorio ASOCRETO.

### Cálculos.

Con los estados de saturación y secado registrados de los especímenes, para cada fase, se evalúan los parámetros obtenidos de acuerdo a la norma (ICONTEC, Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido, 2008), pág. 3. Por medio de las siguientes expresiones matemáticas:

$$\text{Absorción después de la inmersión \%} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (74)$$

$$\text{Absorción después de la inmersión y hervido \%} = \frac{C - A}{A} \times 100 \quad (75)$$

$$\text{Densidad seca g1} = \frac{A}{C - D} \times \rho \quad (76)$$

$$\text{Densidad después de la inmersión} = \frac{B}{C - D} \times \rho \quad (77)$$

$$\text{Densidad despues de la inmersión y hervido} = \frac{C}{C-D} \times \rho \quad (78)$$

$$\text{Densidad Aparente, } g2 = \frac{A}{A-D} \times \rho \quad (79)$$

$$\text{Volumen de poros permeables (vacíos)\%} = \frac{g2 - g1}{g2} \times 100 \quad (80)$$

$$\text{Volumen de poros permeables (vacíos)\%} = \frac{C - A}{C - D} \times 100 \quad (81)$$

Donde,

A = Masa en gramos de la muestra seca en el horno.

B = Masa en gramos de la muestra saturada y superficialmente seca después de la inmersión.

C = Masa en gramos de la muestra saturada y superficialmente seca al aire después de la aire después de la inmersión y hervido.

D = Masa en gramos de la muestra en agua después de la inmersión y hervido.

g1 = Densidad seca Mg / m<sup>3</sup>.

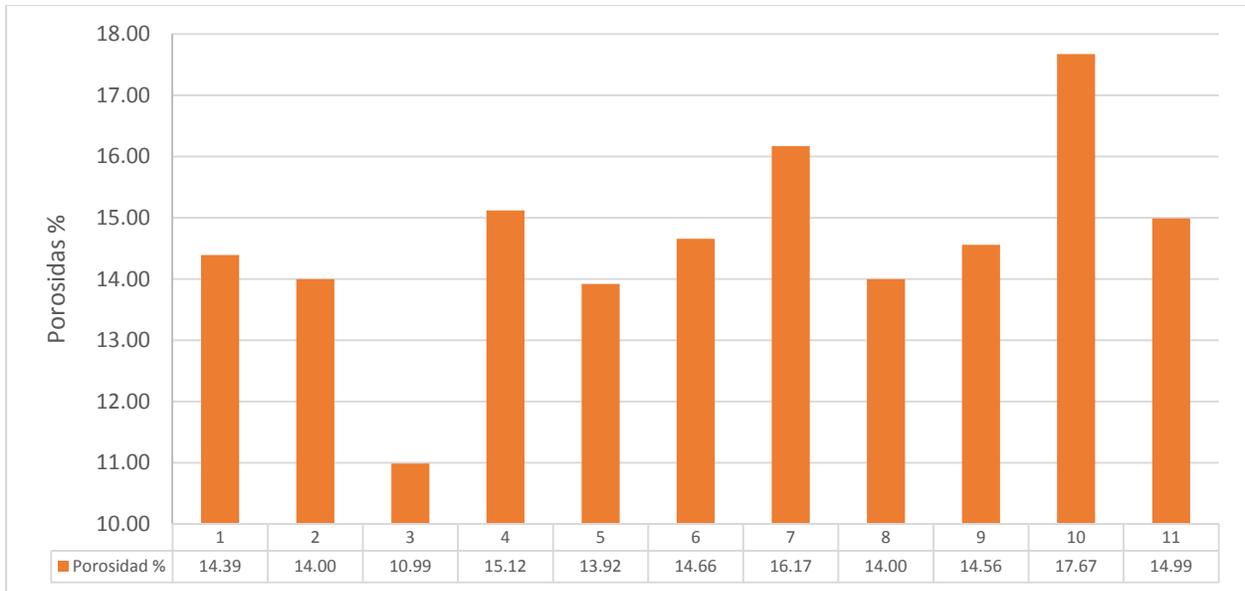
g2 = Densidad aparente Mg / m<sup>3</sup>.

ρ = Densidad del agua, se considera 1 Mg / m<sup>3</sup> = 1 gr/ cm<sup>3</sup>.

#### 7.6. Resultados obtenidos en los ensayos.

Con base en los resultados de las pruebas de infiltración y relación de vacíos se estimaron las tasas de permeabilidad de los especímenes evaluados, de acuerdo con la norma NTC 4483, metodología recomendada para concretos de baja permeabilidad.

Para las diferentes muestras se obtuvieron valores de porosidad entre 10.99 y 17.67% para muestras pre fisuradas, con procesos de carga y agrietados, además de procesos de tratamiento posterior. Se obtuvieron valores medios de 14.5 % de porosidad, densidad aparente de 2.4 g/cm<sup>3</sup> y absorción de 6.91%. El comportamiento para las diferentes muestras se puede apreciar en la Figura 178, de acuerdo con los criterios de la norma NTC 5653.



1. Muestras con microfisuración inducida. 2. Muestras con microfisuración y tratamiento superficial con Aditivo Xipex por 5 horas. 3. Muestras con microfisuración y tratamiento superficial con Aditivo Sika por 5 horas. 4. Muestra patrón concreto sin adiciones. 5. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk con edad de 28 días. 6. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk con edad de 56 días. 7. Muestras con Adición Xipex en agua. 8. Muestras con Adición Xipex en polvo. 9. Especímenes con aditivo Sika WT200. 10. Muestras agrietadas y tratamiento interno de aditivos, A/C=0.45. 11. Especímenes con fibras sintéticas y metálicas, A/C=0.45.

Figura 178. Valores de Porosidad de los especímenes evaluados.

Fuente: Elaboración propia, ensayos de permeabilidad, gravedad específica y relación de vacíos.

En la norma (ICONTEC, NTC 4483 - Metodo de Ensayo para determinar la permeabilidad en el concreto al agua, 1998), pág. 5, se establece la expresión para estimar los valores de tasas de infiltración en cada una de las muestras:

$$k = \frac{D^2 \cdot v}{2 \cdot T \cdot h} \quad (82)$$

k = Coeficiente de permeabilidad en m/seg.

D = Profundidad de penetración del agua en la muestra de concreto, en m.

T = Tiempo para penetrar la profundidad D, en segundos.

h = Cabeza de presión en metros.

v = Porosidad del concreto en el ensayo, determinada mediante la norma ASTM C -642.

En la siguiente tabla, se presentan los resultados de los ensayos para determinar la relación de vacíos e infiltración obtenidos para cada una de las muestras elaboradas. Además, los valores estimados de conductividad hidráulica.

Tabla 58. Valores obtenidos en los especímenes de concreto elaborado.

MUESTRA	A/C	Profundidad de Infiltración - mm	Porosidad %	k (m/seg)
1. Muestras con microfisuración.	0.49	102.50	14.39	<1.00E-10
2. Muestras micro fisuradas con tratamiento superficial por aditivo Xipex.	0.49	78.69	14.00	2.51E-11
3. Muestras micro fisuradas con tratamiento superficial por aditivo Sika.	0.49	57.21	10.99	1.04E-11
4. Muestra patrón concreto sin adiciones.	0.49	26.93	15.12	3.17E-12
5. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk 28 días.	0.49	26.44	13.92	2.82E-12
6. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk 56 días.	0.49	3.75	14.66	8.85E-14
7. Muestras con Adición Xipex en agua.	0.49	9.39	16.17	4.13E-13
8. Muestras con Adición Xipex en polvo.	0.49	9.83	14.00	3.92E-13
9. Especímenes con aditivo Sika WT200.	0.49	10.80	14.56	4.91E-13
10. Muestras agrietadas y tratamiento interno por aditivos Xipex – Sika.	0.45	18.09	17.67	1.68E-12
11. Especímenes con fibras sintéticas y metálicas.	0.45	7.35	14.99	2.34E-13

Fuente: Elaboracion propia, ensayos de permeabilidad, gravedad especifica y relacion de vacios.

Los valores de infiltración mayores a 100 mm, se presentan para el concreto pre fisurado, donde el agua penetró totalmente la muestra, ver anexos ensayos de laboratorio.

En la Figura 179, se presentan los resultados de la infiltración del agua en los especímenes frente a los valores de permeabilidad estimados bajo la norma (ICONTEC, NTC 4483 - Metodo de Ensayo para determinar la permeabilidad en el concreto al agua, 1998). Para una penetración del agua mayor a 70 mm se presentan tasas en la conductividad hidráulica mayores a  $1E^{-10}$  m/seg, considerados como concretos permeables.

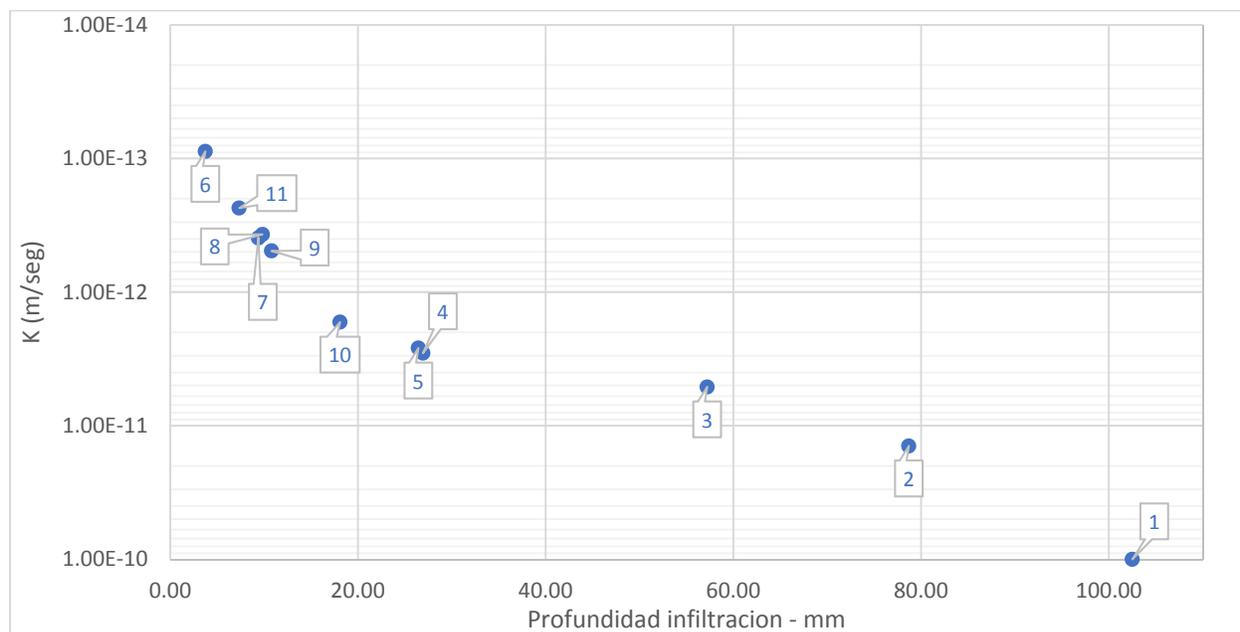
Para infiltraciones en el rango de 30 a 60 mm se presentan tasas de conductividad hidráulica en el orden de  $1e^{-11}$   $1e^{-12}$  m/seg, que para la norma NTC 4483 se denominan concretos de media permeabilidad, este caso se da principalmente en algunas muestras pre fisuradas con tratamiento de aditivos en periodos cortos.

En las muestras patrón de concreto sin adiciones, para el diseño de la mezcla establecida en con A/C = 0.49 y edades entre 28 a 30 días se presentaron valores de infiltración en promedio de 27 mm, considerados como concretos de baja permeabilidad de acuerdo con la norma NTC 4483.

Para los especímenes de concreto con adiciones de elementos por cristalización en proporciones del 2% frente al contenido de cemento, se obtuvieron valores entre 9 a 11 mm y tasas en la conductividad hidráulica del material en orden de  $1e^{-13}$  m/seg.

En elementos de concreto con fibras metálicas y sintéticas en diferentes proporciones, edades mayores a 50 días, A/C = 0.45, se reportaron valores de infiltración entre 5 a 7 mm y tasas de permeabilidad menores a  $1e^{-13}$  m/seg.

Mientras que los especímenes con adiciones de metacaolín registraron valores medios de 26 mm para muestras de edad 28 días, y para una maduración mayor en el material hacia los 56 días se reportaron valores de hasta 3.7 mm como profundidad de infiltración.

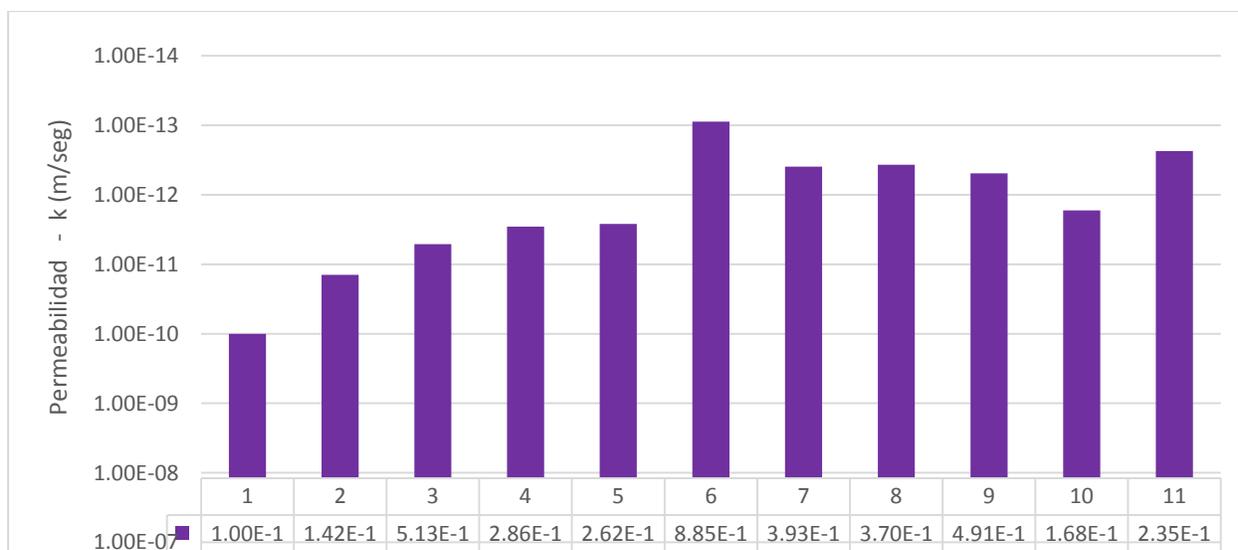


1. Muestras con microfisuración inducida. 2. Muestras con microfisuración y tratamiento superficial con Aditivo Xipex por 5 horas. 3. Muestras con microfisuración y tratamiento superficial con Aditivo Sika por 5 horas. 4. Muestra patrón concreto sin adiciones. 5. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk con edad de 28 días. 6. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk con edad de 56 días. 7. Muestras con Adición Xipex en agua. 8. Muestras con Adición Xipex en polvo. 9. Especímenes con aditivo Sika WT200. 10. Muestras agrietadas y tratamiento interno de aditivos, A/C=0.49. 11. Especímenes con fibras sintéticas y metálicas, A/C=0.49

Figura 179. Valores de permeabilidad frente a la infiltración obtenida de los especímenes evaluados.  
Fuente: Elaboración propia, ensayos de permeabilidad, gravedad específica y relación de vacíos.

Los valores menores a 30 mm indican concretos de baja permeabilidad, con tasas de flujo menores a  $1e^{-12}$  m/seg. Para los especímenes evaluados, en concretos con maduración mayor a 56 días se obtuvieron tasas de permeabilidad hasta de un orden  $1e^{-14}$  m/seg, considerados como un material de muy baja permeabilidad.

En la Figura 180 se presentan los valores de conductividad estimados en cada una de las mezclas de concreto elaboradas, cuyos resultados individuales se presentan en los Anexos – Ensayos de Laboratorio.



1. Muestras con microfisuración inducida. 2. Muestras con microfisuración y tratamiento superficial con Aditivo Xipex por 5 horas. 3. Muestras con microfisuración y tratamiento superficial con Aditivo Sika por 5 horas. 4. Muestra patrón concreto sin adiciones. 5. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk con edad de 28 días. 6. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk con edad de 56 días. 7. Muestras con Adición Xipex en agua. 8. Muestras con Adición Xipex en polvo. 9. Especímenes con aditivo Sika WT200. 10. Muestras con grietas y tratamiento interno de aditivos, A/C=0.49. 11. Especímenes con fibras sintéticas y metálicas, A/C=0.49.

Figura 180. Valores de Permeabilidad estimados para cada espécimen elaborado.  
Fuente: Elaboración propia, ensayos de permeabilidad, gravedad específica y relación de vacíos.

### 7.7. Evaluación de los resultados.

De acuerdo a (Gomez J, 2004), en una pasta madura de concreto el coeficiente de permeabilidad puede ser muy pequeño aún con una alta porosidad, esto se debe a que el agua no puede transitar a través de los pequeños poros de gel; la infiltración está controlada por la red de poros y capilares interconectados (porosidad efectiva). En la Tabla 59, se presenta la transición en los valores permeabilidad y características de porosidad en función de la edad del material.

Tabla 59. Efectos de la edad en el coeficiente de permeabilidad, con pastas A/C=0.51

Edad (Días)	$K_p$ (m/seg)	Observaciones
Pasta Fresca	1.00E <sup>-05</sup>	Independiente de A/C
1	1.00E <sup>-08</sup>	Poros capilares interconectados
3	1.00E <sup>-09</sup>	
4	1.00E <sup>-10</sup>	
7	1.00E <sup>-11</sup>	
14	1.00E <sup>-12</sup>	
28	1.00E <sup>-13</sup>	
100	1.00E <sup>-18</sup>	Poros capilares discontinuos
240	1.00E <sup>-18</sup>	

Fuente: (Gomez J. , 2004, págs. 4 -10). Permeabilidad del concreto y su valoración.

La porosidad está controlada por la relación de vacíos del cemento y de los agregados que componen la mezcla, la compactación y colocación del material en la obra.

Durante los periodos de elaboración e hidratación del concreto la red de capilares se podrá obstruir por la formación de silicatos de calcio, y disminuir los valores de infiltración del material.

La relación de A/C es un parámetro que también afecta la conductividad hidráulica del material, coeficientes altos de A/C podrían generar zonas impermeables si los poros son completamente aislados, y por efectos de hidratación con la producción de silicatos de calcio los valores de permeabilidad tenderán a disminuir en varios ordenes de magnitud, aspectos que tienden a simular los aditivos por cristalización.

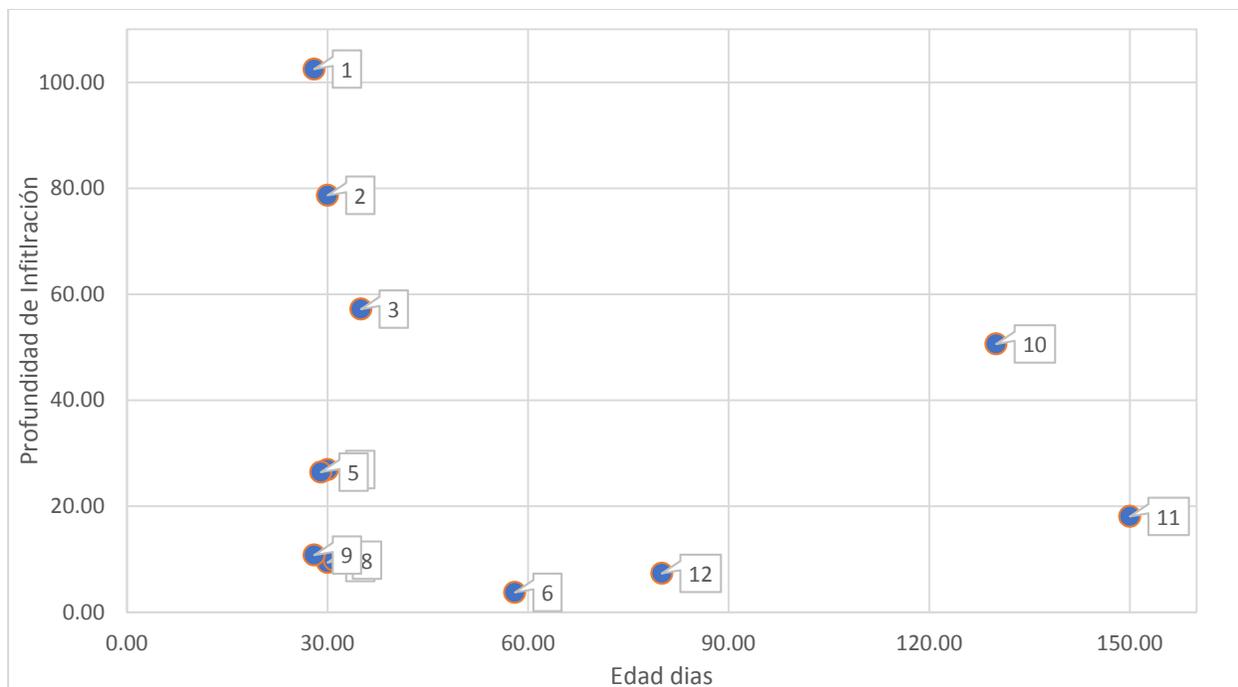
Gómez J (2004) estableció un valor límite de K en un orden de  $1e^{-22}$  m/seg, cuando el elemento ha generado un sello en la red capilar de la estructura del concreto.

En pastas maduras, el valor de conductividad estará en función del tamaño, forma y concentración de las partículas del gel y el grado de continuidad de la red de capilares de la estructura.

En las obras de ingeniería la relación A/C máxima para obtener concretos de baja permeabilidad se recomienda como 0.5, para construcciones sismo resistente de acuerdo con la NSR-2010. (Minambiente, 2010) Capítulo C.23 – Tanques y estructuras de ingeniería ambiental de concreto, en condiciones especiales de exposición se establece una relación de agua /cemento de 0.45. Sin embargo, estas relaciones presentan problemas para la manejabilidad en obra de la mezcla, conllevando al uso de aditivos o incorporación de agua en la mezcla y el uso adicional de cemento.

En la Figura 181, se presenta la relación de la edad del concreto frente a los valores de infiltración obtenidos, con el avance en la maduración del espécimen ocurrirá una disminución en los valores de permeabilidad de acuerdo a (Neville, 2011), en tiempos de curado mayores a 28 días, para la relación A/C= 0.49 con aditivos por cristalización se obtuvieron tasas de conductividad del orden de  $1E^{-13}$  m/seg, menores que las establecidas para concretos comunes.

Este mismo efecto se pudo visibilizar en las muestras con contenido de fibra y relación A/C =0.45, donde se tuvo una permeabilidad en el mismo orden de magnitud, ver tabla 58 – Valores obtenidos en los ensayos de permeabilidad.



1. Muestras con microfisuración inducida. 2. Muestras con microfisuración y tratamiento superficial con Aditivo Xipex por 5 horas. 3. Muestras con microfisuración y tratamiento superficial con Aditivo Sika por 5 horas. 4. Muestra patrón concreto sin adiciones. 5. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk con edad de 28 días. 6. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk con edad de 56 días. 7. Muestras con Adición Xipex en agua. 8. Muestras con Adición Xipex en polvo. 9. Especímenes con aditivo Sika WT200. 10. Muestras con grietas y tratamiento interno de aditivos, A/C=0.49. 11. Especímenes con fibras sintéticas y metálicas, A/C=0.49.

Figura 182. Edad de los especímenes frente a valores de infiltración reportados.  
Fuente: Adaptado. (Neville, 2011). Properties of concrete -Fifth Edición. Ensayos Proyecto ECI.

En la Figura 183 se presentan los rangos de A/C para diferentes mezclas de concreto, de acuerdo con (SIKA, Sika Concrete Handbook, 2013, p. 134), las relaciones A/C menores a 0.5 son las recomendadas para obtener concretos de baja permeabilidad y tasas de infiltración menores a 30 mm. Si continúa bajando este índice, de acuerdo a la gráfica se presentaría una mejora en el material frente al paso del agua, sin embargo limitaría la trabajabilidad de los elementos de concreto en el momento de su elaboración.

Además, se incluyó en la Figura 183 la clasificación para los concretos de baja, media y alta permeabilidad (línea punteada), con base en la profundidad de infiltración, de acuerdo con la norma NTC 4483.

Los concretos se elaboraron bajo una relación A/C =0.49, ver Figura 183 – puntos 1 a 9, con base en los resultados obtenidos se presentan diversos comportamientos y denominación para los especímenes.

Para las muestras pre fisuradas por procesos de carga, se presentaron altos valores de infiltración, por lo cual se saturaron el 100% de las muestras (punto 1), además este tipo especímenes fueron impregnados superficialmente con aditivos y generaron una leve reducción en el valor de infiltración (entre 60 y 80 mm) con respecto a la muestra de control. Las profundidades de infiltración permiten clasificar a estos concretos como de media y alta permeabilidad, ver Figura 183 – Puntos 2 y 3.

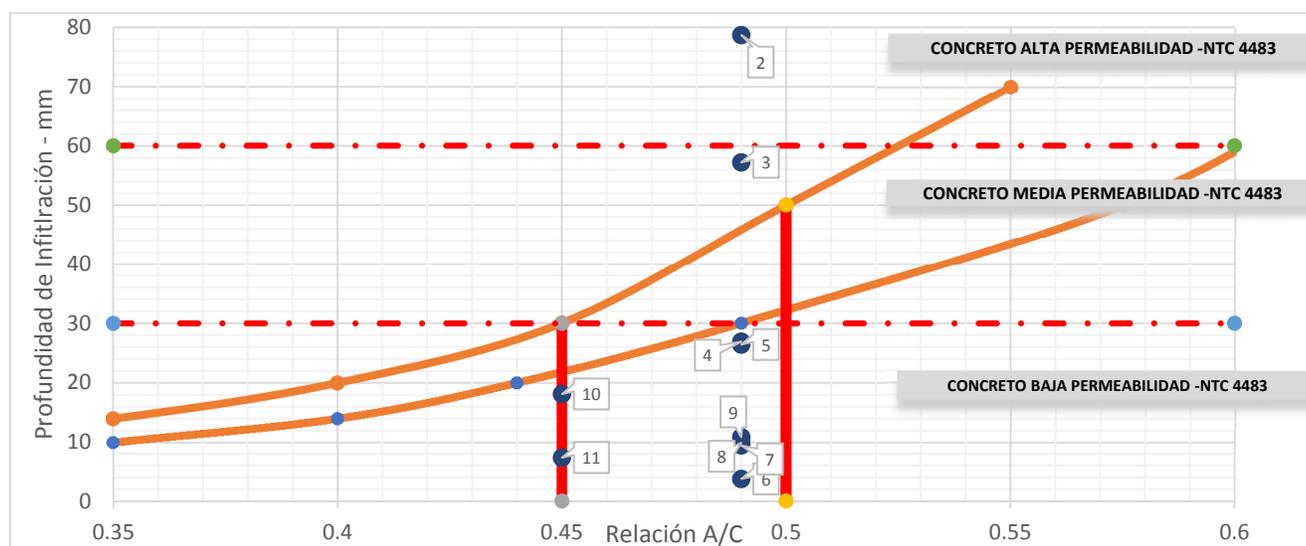


Figura 183. Valores de Infiltración al agua, recomendaciones a/c fabricantes y calificación NTC 4483  
Fuente: Adaptado. (SIKA, Sika Concrete Handbook, 2013, p. 134), EN 12390-8.

1. Muestras con microfisuración inducida. 2. Muestras con microfisuración y tratamiento superficial con Aditivo Xipex por 5 horas. 3. Muestras con microfisuración y tratamiento superficial con Aditivo Sika por 5 horas. 4. Muestra patrón concreto sin adiciones. 5. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk con edad de 28 días. 6. Muestras con Adición con Metacaolín - Mk con edad de 56 días. 7. Muestras con Adición Xipex en agua. 8. Muestras con Adición Xipex en polvo. 9. Especímenes con aditivo Sika WT200. 10. Muestras con grietas y tratamiento interno de aditivos, A/C=0.49. 11. Especímenes con fibras sintéticas y metálicas, A/C=0.49.

Para las muestras de concreto sin adiciones (muestra patrón), ver Figura 183 - punto 4, se presentó una profundidad de infiltración menor a 30 mm, bajo la NTC 4483 pueden ser calificados como hormigones de baja conductividad hidráulica, con tasas de permeabilidad estimadas en orden de  $1e^{-12}$  m/seg.

En las mezclas con adiciones de elementos de cristalización se obtuvo un valor de infiltración entre 9 y 11 mm, como se observa en la Figura 183 – (puntos 7, 8 y 9), por lo que pueden ser considerados como hormigones de baja permeabilidad y con tasas de infiltración en el orden de  $1e^{-13}$  m/seg. Los valores obtenidos posiblemente son el resultado del sellamiento de la red e interconexión de capilares del material por parte de iones de silicato de Calcio y otras sales de los elementos aditivos.

Los materiales de metacaolín, ver Figura 183 – puntos 5 y 6, reportaron 26 mm de infiltración para muestras de edad 28 días, y para una maduración mayor en el material (56 días) se reportaron valores de 3.7 mm como profundidad de infiltración. El efecto de la edad presenta una marcada incidencia en los bajos valores, lo cual puede ser determinado por la formación de iones de silicato de calcio que cierran los poros e interconexiones en la red interna de la pasta del concreto, con el avance del tiempo y mineralogía del material de caolín.

Otro tipo de muestras se evaluaron a partir de la investigación Académica de la Ing. Paola Acero Pachón, ver Figura 183 – punto 11, la cual se denomina “Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles”. Estos especímenes presentaban una maduración mayor a 60 días, con  $a/c = 0.45$ , y mezclas de fibras sintéticas y metálicas, en las que se obtuvieron valores de infiltración entre 4 a 7 mm, calificados bajo la normativa NTC 4483 como materiales de baja permeabilidad, también se presentaron tasas de conductividad hidráulica en el orden  $1e^{-13}$  a  $1e^{-14}$  m/seg, debido del avance en la edad de maduración de la pasta y mejora de la estructura del compuesto por el efecto de las fibras.

Además, las muestras en combinación con fibras muestran mejoras frente a la reducción de la porosidad efectiva y sellamiento de la red capilar de la estructura del concreto, las fibras generan una liga más fuerte entre las partículas de agregado y brindan una mayor integridad de la estructura del material elaborado.

Estos materiales presentaron valores de profundidad de infiltración bajos, además presentan cualidades de elongación y deformación que las hacen muy recomendables como elementos estructurales en una obra de ingeniería.

Los bajos valores en los índices de permeabilidad presentan relación con la resistencia a compresión determinada para las muestras. Los especímenes con elementos de fibras y aditivos tipo Xipex presentan una mejora en las características mecánicas dadas por una mejora en la estructura del concreto y sello de las fisuras.

Otro tipo de especímenes que fueron sometidos a procesos de carga con agrietamiento visible, pudieron mantener su estructura por el refuerzo de fibra, presentando índices de porosidad hasta 22% y tasas elevadas de permeabilidad del orden  $1e^{-5}$  m/seg, debido a su deterioro.

Posteriormente, se sumergieron este tipo de muestras en soluciones con aditivos, donde se obtuvo un mejor desempeño frente a la transmisión del agua, consiguiendo reducir la porosidad a 17%, las tasas de infiltración a rangos entre 17 a 19 mm y tasas de conductividad hidráulica de  $1.68 \text{ e}^{-12} \text{ m/seg}$ , ver Figura 183 – punto 10.

El efecto de la reducción de porosidad y tasa de infiltración se consiguió por la exposición de las zonas fracturadas de los especímenes al contacto con las soluciones concentradas de aditivos por cristalización, lo cual permitió el sellamiento gradual de las fisuras, una mejor estructura de las zonas expuestas, el cerramiento de los poros internos del material y la formación de iones de silicatos en la red interna de la estructura del concreto.

Esto último, presenta una ventaja para los materiales deteriorados, con daños en su estructura, como los que se presentan en los fenómenos de convergencia en una excavación subterránea.

Finalmente, los resultados demuestran que con las técnicas de diseño, elaboración y curado establecido para los materiales de concreto se podrán elaborar elementos impermeables con coeficientes promedio de  $1 \text{ e}^{-12} \text{ m/seg}$ , y que constituyen una verdadera capa de restricción frente al paso del agua. Además, con la combinación de fibras en la pasta del agregado se podrían obtener cualidades mecánicas y de resistencia frente a procesos de tensión, muy comunes en las obras subterráneas.

## Capítulo VIII – Caso de análisis flujo de agua en túnel de roca.

Este capítulo busca establecer el método de análisis del flujo de agua más ajustado a las condiciones reales de una obra subterránea.

Para efectos de analizar el tema de infiltración de agua en túneles, se adoptó el caso de un proyecto subterráneo, en el cual se presentó un caudal máximo de 329 Lt/seg, esta obra fue excavada en rocas metamórficas de la formación Cajamarca.

Se tomó información de obra, donde se analizó el caudal de infiltración estimado con métodos analíticos y numéricos, discretizando el túnel en varios sectores, donde se aplicaron formulaciones acuerdo a Goodman, Perrochet y otras metodologías, en la evaluación numérica se utilizó el código RS<sup>2</sup>.

A partir de los caudales medidos en obra se establecieron los valores de permeabilidad con base en los métodos analíticos y numéricos, posteriormente dichos valores de permeabilidad se compararon con los valores típicos del material.

A continuación, se describen las características del proyecto hidráulico, excavado en roca de esquistos del grupo Cajamarca.

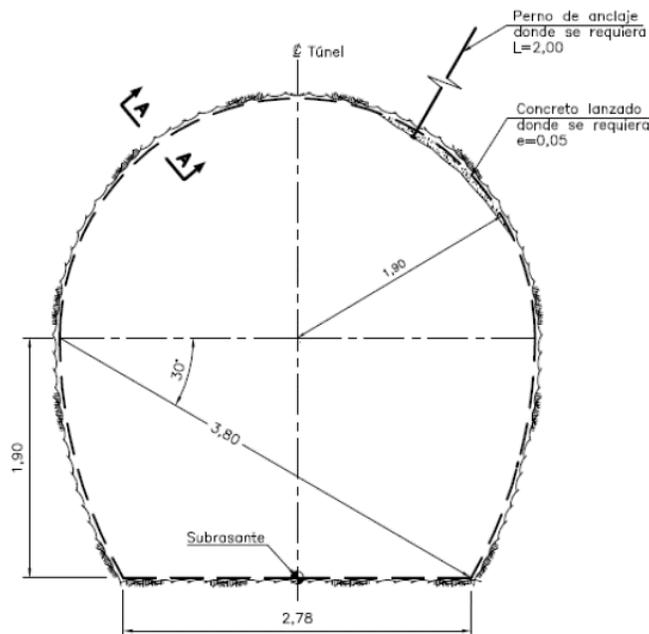


Figura 184. Sección geométrica de la excavación.

Fuente. (INGETEC, Analisis parcial del comportamiento del cono de abatimiento del nivel freatico, proyecto Tunel el Manso, 2013)

La obra se localiza en el municipio de Samaná, departamento de Caldas, sobre la cordillera central, cuyo propósito es la conducción de agua para la generación de energía eléctrica, consiste en un túnel a flujo libre, con una longitud de 4.015 m, una sección tipo herradura en solera plana de 3.9 m de diámetro, como se presenta en la figura 184, tiene un área aproximada de 12,7 m<sup>2</sup> y una pendiente de 0.4 %, la excavación logra una cobertura máxima de 280 m.

El túnel presenta un trazo recto en la mayor parte de su recorrido, sin embargo tiene un ligero cambio en el rumbo hacia el noroeste.

En la Figura 185, se muestran las características constructivas de la obra, de acuerdo a la sección en herradura típica a lo largo del eje del túnel, donde se aplicaron medidas para el control de las filtraciones, implementando técnicas de encofrado para la elaboración de las capas de revestimiento en concreto y con inyecciones de mejoramiento al macizo.



Figura 185. Características constructivas y colocación del revestimiento del túnel.

Fuente: (INGETEC, Analisis parcial del comportamiento del cono de abatimiento del nivel freatico, proyecto Tunel el Manso, 2013)

Durante la construcción del túnel se proyectó que todos los terrenos llevarían como protección y revestimiento del piso, una solera en concreto convencional con espesor de 20 cm. Además, los tramos con terreno tipo III, se revistieron completamente en concreto convencional ( $f'c = 21$  MPa), con espesor mínimo de 20 cm, cubriendo completamente el sostenimiento colocado durante la excavación.

### 8.1. Características generales.

Para acceder al área se adecuaron vías de acceso durante el año 2.008, luego entre 2.009 a 2.011, se realizaron los trabajos de perforación y voladura controlada para reducir el fisuramiento de la roca en la periferia de la excavación, algunos tuvieron un revestimiento en concreto.

De acuerdo con los trabajos de excavación se encontraron tres clases de terreno, los cuales se puede apreciar en la Figura 186.

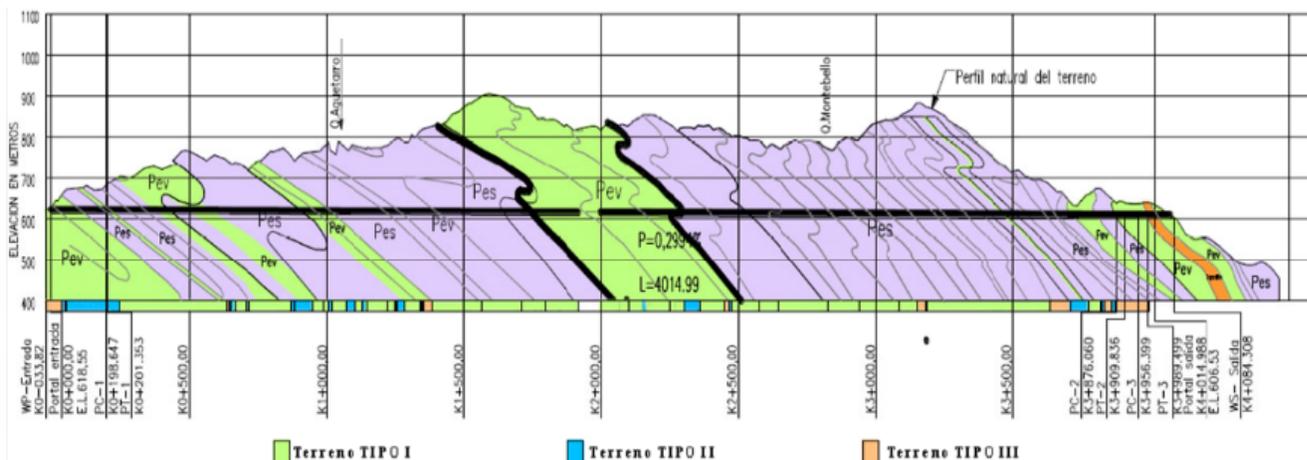


Figura 186. Perfil topográfico, geológico y tipos de terrenos del túnel.  
Fuente. INGETEC, Gutiérrez, R. Informe de consultoría e Hidrogeología proyecto Manso.

Los tipos de terrenos mencionados presentan las siguientes características:

- Terreno tipo I, macizo de roca sana, resistencia media, y masiva, con una foliación esporádica, poco fracturada y estable, propiedades de roca auto soportante.
- Terreno tipo II, rocas de resistencia media, foliadas o de foliación incipiente, de fracturadas a poco fracturadas, con algunos trazos de meteorización, requirió la aplicación de concreto lanzado (e = 10 cm) reforzado con fibra metálica en toda la sección en forma sistemática y la colocación de pernos de anclaje en la bóveda sistemáticos.
- Terreno tipo III, corresponden a rocas de resistencia media a baja, foliadas, fracturadas a muy fracturadas, con planos de discontinuidad alterados, donde hubo necesidad de hacer énfasis en sostenimiento inmediato en el frente de excavación con arcos metálicos y la colocación de concreto lanzado reforzado con fibra metálica (e = 0,15 m) y pernos de anclaje en bóveda y paredes, sistemáticamente.

### 8.1.1. Geología Básica.

La obra fue excavada en la estribación oriental de la cordillera Central, en un macizo compuesto por rocas metamórficas del Paleozoico del grupo Cajamarca, la cual comprende una secuencia de esquistos Cuarzo-Sericíticos y esquistos verdes intercalados, instruidos localmente por pequeños cuerpos ígneos y cubiertos en superficie por depósitos Cuaternarios de poco espesor, materiales aluviales y coluviones.



Figura 187. Características del macizo, intercalación de los diferentes paquetes de roca.  
Fuente. 2014 - INGETEC, Gutiérrez, R. Informe de consultoría e Hidrogeología proyecto Manso.

Estructuralmente, la zona se encuentra influenciada por algunas fallas regionales y locales, que interceptan la obra con fracturas o diaclasas y pliegues.

Los esquistos cuarzo-sericíticos son de color gris oscuro a negros, laminados e intensamente replegados, cuya mineralogía está representada principalmente por Cuarzo y Sericita, estos esquistos en superficie se encuentran frescos, masivos y duros.

Los esquistos verdes o cloríticos presentan una coloración que varía de verde a verde grisáceo, con esquistosidad, predominan minerales como clorita, albita y epidota con foliación poco desarrollada.

#### 8.1.2. Geomecánica.

El macizo donde se emplaza el proyecto presenta un comportamiento anisotrópico, con evidencias de los esfuerzos compresionales de la cordillera por la estructura laminada generada por la foliación, bastante cerrada, imprimiéndole a la roca intacta una permeabilidad primaria relativamente baja.

Los esquistos cuarzo-sericíticos y verdes a nivel del macizo rocoso en el túnel, se presentaron de ligeramente fracturados a fracturados, con características de auto soporte.

Tabla 60. Parámetros de la roca intacta de los tipos de roca encontrados en el túnel.

Roca	$\sigma_c$ (Mpa)	E (Gpa)	$m_i$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	MR
Esquistos Grises	24,0	7,5	15,0	27,0	312,5
Esquistos Verdes	40,0	10,0	29,0	27,7	250,0

Fuente: (INGETEC, Modelación del comportamiento de aguas de infiltración en el túnel del Manso con la construcción del revestimiento Completo, 2012)

La zona se ubica en la región andina, cordillera central, departamento de Caldas, presenta un régimen de lluvias de tipo bimodal, siendo el período más lluvioso hacia Octubre - Noviembre y las épocas más secas hacia Abril y Agosto respectivamente.

Las fuentes de recarga superficial aún en épocas de estiaje mantienen los valores de caudal, reportados en la campanas de evaluación hidrogeológica antes y después de la excavación del túnel.

### 8.2. Obras de impermeabilización y manejo del agua subterránea.

El agua que se infiltra a través del túnel se conduce en la longitud del mismo, sin embargo, para evitar cualquier afectación a las comunidades vecinas del proyecto en superficie, además prevenir inconvenientes por la irrupción del agua en los equipos, materiales de revestimiento y soporte del túnel, con la excavación se ejecutaron varias campañas de post-inyecciones de impermeabilización, además de la instalación de un revestimiento en concreto lanzado para reducir cualquier infiltración en la obra.



Figura 188. Irrupción de agua subterránea en uno de los tramos del proyecto.  
Fuente. (INGETEC, Analisis parcial del comportamiento del cono de abatimiento del nivel freatico, proyecto Tunel el Manso, 2013).

En la actualidad, se continúan las tareas de refuerzo al revestimiento, para el control de la infiltración con campañas de inyección con micro cemento en diferentes sectores de la obra.

### 8.3. Aguas de infiltración.

El flujo de agua estuvo controlado principalmente por la permeabilidad secundaria, relacionada con algunas cizallas y fracturas, en algunos sectores a lo largo del túnel.

Durante los trabajos de excavación se interceptaron cuatros zonas con irrupción importante de agua, las cuales reportaron un caudal máximo de 329 lt/seg, que se presentan en la Tabla 61.

Hacia el final de la obra los valores de infiltración descendieron hasta reportarse 210 lt / seg.

Tabla 61. Valores de Infiltración, excavación y niveles piezométricos registrados durante la obra.

Tramo	Abscisa	Tasa excavación	Tramo - m	Radio túnel (m)	Nivel piezométrico promedio	lt/seg	lt/seg - Acumulado
1	58.9	3.5	58.9	1.95	39.5	2.26	2.26
2	266.6	3.5	208	1.95	74.5	6.74	9
3	883.9	3.5	617	1.95	120	54.8	63.8
4	1300	3.5	416	1.95	140	43.6	107.4
5	1555	3.5	255	1.95	230	96.6	204
6	1715	3.5	160	1.95	190	47	251
7	2145	3.5	430	1.95	197	18.3	269.3
8	2450	3.5	305	1.95	173	5	274.3
9	2683	3.5	233	1.95	160	1.5	275.8
10	3087	3.5	404	1.95	110	14.2	290
11	3652	3.5	565	1.95	25	15	305
12	3888	3.5	236	1.95	20	11	316
13	4015	3.5	127	1.95	17	13.001	329.001

Fuente. 2014- INGETEC, Gutiérrez, R. Informe de consultoría e Hidrogeología Túnel Manso.

### 8.3.1. Retro análisis de los valores de infiltración en el túnel.

Las rocas metamórficas como las que se presentan en la obra tienen una elevada heterogeneidad, anisotropía, discontinuidad y se vuelven complejas en su predicción.

Además, el sistema de discontinuidades y fracturas dificultan la eficacia de los sistemas de inyección en el momento de su ejecución, la presencia de agua depende de la ocurrencia o no de fracturas abiertas, difíciles de detectar durante las campañas de exploración.

Para este proyecto se presentaron las irrupciones de agua en zonas de cizalla y fracturas aisladas, de forma aleatoria durante el avance de la obra, que ha conllevado a una gran complejidad en su predicción.

En la Figura 189, se presentan los valores de irrupción de agua reportados durante la obra, donde se registraron filtraciones importantes en la parte intermedia de la excavación, principalmente

hacia los tramos 4, 5 y 6, que al final de la obra alcanzaron un caudal acumulado de 329 lt/seg (línea roja).

Se registraron mayores niveles de infiltración en la obra en la parte media del macizo, posiblemente por las recargas de la morfología se concentran hacia la parte alta de la geoforma, capturando el agua superficial por rocío, formando sumideros producidos por fenómenos de infiltración hacia el subsuelo.

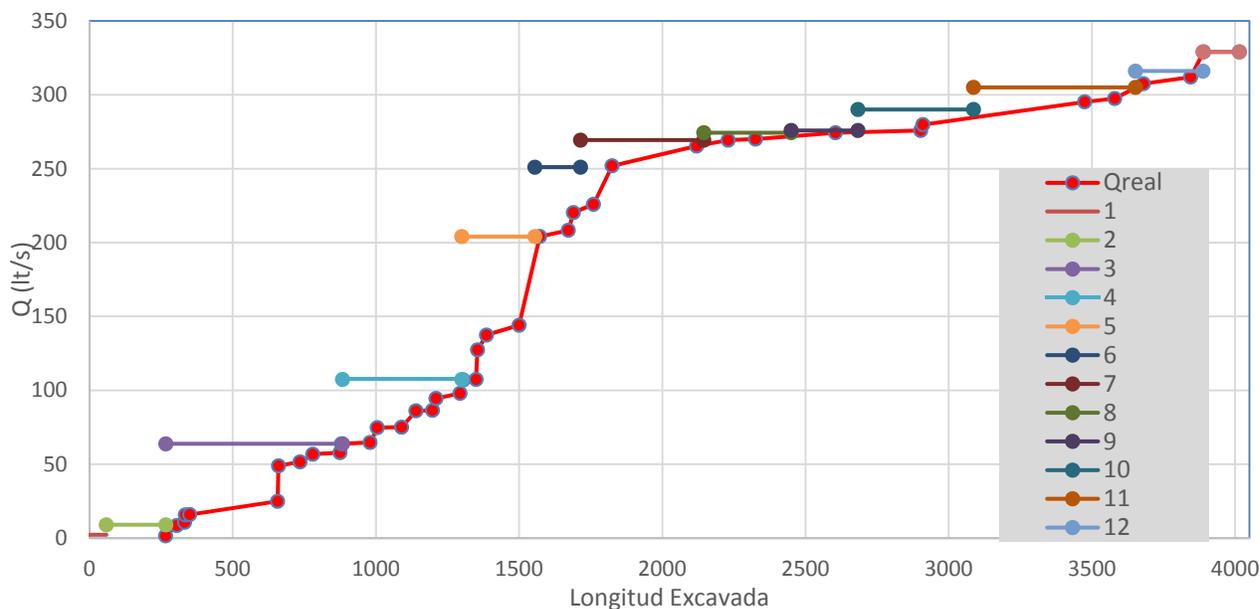


Figura 189. Valores de caudal acumulado y tramos definidos para el proyecto.

Fuente: Adaptado, (INGETEC, Modelación del comportamiento de aguas de infiltración en el tunel del Manso con la construcción del revestimiento Completo, 2012).

En los tramos 1, 2, 10, 11, 12 y 13, hacia la parte final y zonas de los portales la infiltración tuvo valores entre 20 a 50 lt/seg, principalmente por los efectos de la trasmisión del agua almacenada desde la parte media del sistema acuífero.

Para el final de la obra, con la ejecución de las medidas de proyección y colocación de revestimiento de concreto se logró reducir los valores de infiltración hasta 250 lt/seg, sin embargo, los efectos en las diferentes zonas mejoradas fueron parciales y algunos tramos mantuvieron valores significativos, además en la medida que se colocó el revestimiento las irrupciones de agua se fueron trasladando a nuevas áreas.

Con el paso del tiempo, el sistema acuífero se ha estabilizado y reporta disminución en los niveles de infiltración a menos de 200 lt/seg, posiblemente por la colmatación y sellamiento natural de los conductos de roca por el mismo transito del agua.

Para determinar los valores de conductividad hidráulica que controlaron las filtraciones en el cuerpo del túnel se realizaron estimaciones analíticas para evaluar el caudal, con base en expresiones matemáticas definidas por Goodman y (Perrochet & Dematteis, 2007) para régimen variable, que se ajustan al contexto hidrogeológico de la obra.

Este análisis se realizó comparando los datos de infiltración reportados en la obra, los cuales se pueden apreciar en la Tabla 61 y la Figura 189, para determinar las tasas de permeabilidad que mejor se ajustan a los registros de obra.

También se utilizó la metodología propuesta por (Aliaga, 2015) para determinar los valores de conductividad con base en una calificación del macizo, para cada uno de los tramos definidos en el túnel y que se representan en la siguiente figura, fue necesario determinar las calidades del macizo para los terrenos y definir los valores de caudal específico y acumulado al final del túnel.

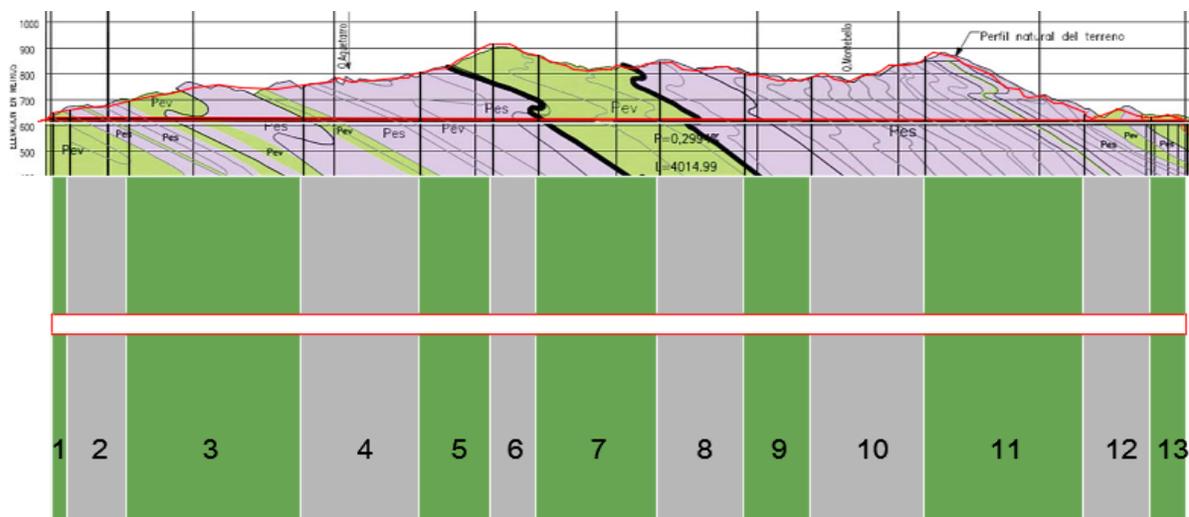


Figura 190. Tramos definidos para la excavación.

Fuente: Adaptado, (INGETEC, Modelación del comportamiento de aguas de infiltración en el túnel del Manso con la construcción del revestimiento Completo, 2012).

Así mismo, para el evaluar el caso numéricamente se utilizó el código RS<sup>2</sup>, de acuerdo con las propiedades de la roca, geometría del túnel, cobertura, calidad del macizo y se realizaron modelaciones para buscar los valores de conductividad hidráulica (K) que se acercaran a los registros de la obra.

Finalmente, se compararon los valores de permeabilidad obtenida por las metodologías analíticas, numérica y de calificación del macizo para interpretar los resultados.

Método análisis retrospectivo con la expresión de Goodman.

Con las condiciones hidrogeológicas del macizo, variaciones en el nivel piezométrico, tramos y periodos de excavación, además de los datos de infiltración registrados en el túnel se realizó un retro análisis por medio de la expresión de Goodman para régimen transitorio, el cual permitió definir los valores de conductividad hidráulica más representativos debido a las condiciones de transmisividad y cizallamiento para los tramos determinados del túnel, valores que se presentan en la Tabla 62.

Se utilizó la expresión de Goodman para régimen transitorio, ya que se ajusta a las condiciones hidráulicas del macizo y características de la obra.

$$Q(t) = \sqrt{8 \cdot \frac{C}{3} \cdot k \cdot H_0^3 S_y \cdot t} \quad (83)$$

Donde:

- Q (t) = Es el flujo acumulado por unidad de longitud del túnel en el tiempo de excavación.
- K = Conductividad hidráulica del macizo. (m/seg).
- Ho = Cabeza de agua subterránea inicial sobre el eje central del túnel. (m).
- C = Constante entre 0.75.
- Sy = Rendimiento específico. 5.00E<sup>-03</sup>.
- t = Rendimiento promedio de excavación. (3.5 m / día).

A continuación, se presentan los resultados del análisis retrospectivo utilizando la expresión de Goodman para régimen transitorio.

Tabla 62. Valores obtenidos en el análisis retrospectivo bajo la expresión de Goodman.

Tramo	Rendimiento (m/día)	Longitud Tramo (m)	Tiempo (seg)	Nivel piezométrico promedio	Permeabilidad Retrospectivo (m/s)	$Q(t) = \sqrt{8 \cdot \frac{C}{3} \cdot k \cdot H_0^3 S_y \cdot t}$		
						m3/m	m3/s/m	lt/seg
1	3.5	58.9	1453989	39.5	<b>3.47E-06</b>	55.79	3.84E-05	2.26
2	3.5	207.7	5127223	74.5	<b>1.31E-06</b>	166.38	3.25E-05	6.74
3	3.5	617.3	15238491	120	<b>6.95E-06</b>	1352.78	8.88E-05	54.80
4	3.5	416.1	10271726	140	<b>4.11E-06</b>	1076.30	1.05E-04	43.60
5	3.5	255	6294857	230	<b>7.42E-06</b>	2384.64	3.79E-04	96.60
6	3.5	160	3949714	190	<b>4.97E-06</b>	1160.23	2.94E-04	47.00
7	3.5	430	10614857	197	<b>2.51E-07</b>	451.75	4.26E-05	18.30
8	3.5	305	7529143	173	<b>3.91E-08</b>	123.43	1.64E-05	5.00
9	3.5	233	5751771	160	<b>5.82E-09</b>	37.03	6.44E-06	1.50
10	3.5	404	9973029	110	<b>9.26E-07</b>	350.54	3.51E-05	14.20
11	3.5	565	13947429	25	<b>6.29E-05</b>	370.29	2.65E-05	15.00
12	3.5	236	5825829	20	<b>1.58E-04</b>	271.54	4.66E-05	11.00
13	3.5	127	3135086	17	<b>6.69E-04</b>	320.94	1.02E-04	13.00
<b>Σ Q total drenado</b>							<b>329.00</b>	

En la Tabla 62 se presentan los valores de conductividad hidráulica determinados bajo la expresión de Goodman, evaluando la longitud, tasa de excavación, altura piezométrica. Además, se asignó un coeficiente  $C=0.75$  como valor promedio y un rendimiento específico  $S_y=5E^{-3} m^{-1}$  recomendado para unidades litológicas ígneas y metamórficas.

Los valores de conductividad hidráulica, para los sectores adyacentes a la zona de portales presentan rangos de permeabilidad entre  $1E^{-4}$  a  $1E^{-6}$  m/seg, valores característicos de materiales sueltos y degradados.

Hacia la parte media del túnel la permeabilidad estimada llegó a valores de  $1E^{-9}$  m/seg y para otros sectores hasta  $1E^{-6}$  m/seg, los cuales se consideran índices de conductividad medios y altos, característicos de materiales fracturados.

Análisis de acuerdo a la expresión (Perrochet & Dematteis, 2007)

También se estimaron los parámetros hidráulicos del túnel con base en la expresión desarrollada por Perrochet y Dematteis (2007), la cual evalúa la infiltración para diferentes estratos o paquetes geológicos, en diferentes sectores consecutivos de la obra y que se determinaron por medio de la expresión:

$$Q(\alpha) = 2\pi \sum_{i=1}^N H(t-t_i) \times \int_0^{v_i(t-t_i)} \frac{K_i s_i H(L_i - x)}{\ln \left[ 1 + \sqrt{\frac{\pi K_i}{S_i r_i^2} \left( t - t_i - \frac{x}{v_i} \right)} \right]} dx \quad (84)$$

Donde:

- Q (t) = Es el flujo acumulado por unidad de longitud del túnel en el tiempo de excavación.
- K = Conductividad hidráulica del macizo. (m/día).
- r = Radio de la excavación (m).
- Ho = Cabeza de agua subterránea inicial sobre el eje central del túnel. (m).
- C = Constante entre 0.75.
- S<sub>i</sub> = Rendimiento específico. (m<sup>-1</sup>). 5.00E<sup>-03</sup>.
- t = Rendimiento promedio de excavación. (3.5 m / día).

Tabla 63. Valores asignados al código Tun Flow 1.0 – Solución Perrochet - . Dematteis (2007).

Tramo	L (m)	v (m/d)	K (m/seg)	Nivel piezométrico promedio	Q (lt/seg)	Q (lt/seg) – Acumulado
1	58.9	3.5	1.16E-06	39.5	7.46	7.46
2	207.7	3.5	3.47E-07	74.5	12.49	19.95
3	617.3	3.5	4.04E-07	120	58.95	78.90
4	416.1	3.5	4.05E-07	140	42.24	121.15
5	255	3.5	5.79E-07	230	66.44	187.58
6	160	3.5	3.47E-07	190	13.03	200.61
7	430	3.5	4.07E-07	197	54.20	254.82
8	305	3.5	1.27E-07	173	0.00	254.85
9	233	3.5	1.34E-07	160	3.76	258.61
10	404	3.5	1.91E-07	110	7.41	266.02
11	565	3.5	1.28E-06	25	17.71	283.73
12	236	3.5	4.05E-06	20	25.52	309.25
13	127	3.5	7.18E-06	17	19.82	329.07

Fuente: El autor.

El análisis de los valores de infiltración en cada uno de los tramos de túnel se evaluó por medio del código TunFlow 1.0, desarrollado por la empresa Amphos<sup>21</sup>, el cual requiere diferentes variables e iteraciones para dar la solución a la integral propuesta por Perrochet y Dematteis (2007).

Los valores se calibraron para ajustar las tasas de conductividad hidráulica de acuerdo con los registros de la obra. Como se presenta en la Tabla 63, los valores determinaron los rangos de permeabilidad entre  $1E^{-6}$  a  $1E^{-7}$  m/seg, litológicas de roca degradada.

Análisis aplicando la metodología propuesta por (Aliaga, 2015).

Otra de las metodologías para definir los valores de conductividad hidráulica, es la propuesta de (Aliaga, 2015), la cual se basa en la siguiente expresión:

$$k = 0.2 \cdot e^{-0.19 \times RMR} \quad (85)$$

Así mismo, en la tabla 65 se proponen algunos valores de referencia por la calidad del macizo evaluado, que se utilizan de referencia para el análisis del proyecto en estudio.

Tabla 64. Valores de conductividad hidráulica de acuerdo a las diferentes categorías de macizo.

Tipo de Roca RMR Bieniawski (1989) -Coeficiente de Permeabilidad k (m/seg)				
Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
<b>100 – 81</b> < 4.1x10 <sup>-8</sup>	<b>80 - 61</b> 5 x10 <sup>-8</sup> – 1.8x10 <sup>-6</sup>	<b>60 – 41</b> 2.2x10 <sup>-6</sup> – 8.2x10 <sup>-5</sup>	<b>40 – 21</b> 1x10 <sup>-4</sup> – 3x10 <sup>-3</sup>	<b>20 – 0</b> >4x10 <sup>-3</sup>

Fuente: (Aliaga, 2015). Integrating Innovations of Rock Mechanics. Pág. 411.

Como se menciona, el tunel se dividió en 13 tramos de acuerdo con las características litológicas y condiciones del macizo encontradas en la excavación. En la Tabla 65 se describen las características y condiciones del macizo para los diferentes tramos, en los anexos se presenta con detalle la clasificación del macizo y los resultados de la evaluación analítica por cada sector.

Tabla 65. Condición de discontinuidades y características del macizo por cada tramo evaluado.

Tramo	Abscisa	Descripción
1	K0+0 - K0+58,9	-Dureza moderada -Fracturada a muy fracturada -Rellenos de cuarzo y calcopirita y arcilla en sistemas sub horizontales - Rugosa -Bajo espaciamiento entre sistemas de diaclasas -Sistemas de fracturas continuas, cerradas y de baja esquistosidad -Goteos lentos a goteos rápidos
2	K0+58,9 - K0+266,6	-Dureza moderada -Fracturada a muy fracturada -Rellenos de cuarzo y calcopirita y arcilla en sistemas subhorizontales - Rugosa -Bajo espaciamiento entre sistemas de diaclasas -Sistemas de fracturas continuas, cerradas y de baja esquistosidad -Goteos lentos a goteos rápidos
3	K0+266,6 - K0+883,9	-Dura a muy dura -Ligeramente fracturada a masiva -Rellenos de cuarzo y calcopirita, oxidación entre sistemas -Rugosa, ocasionalmente bandeada -Sistemas poco continuos -Sistemas ligeramente abiertos a cerrados -Foliación incipiente -Goteos rápidos a chorros
4	K0+883,9 - K1+300	-Dureza moderada a baja -Muy fracturada a fracturada y foliada. -Rellenos de cuarzo y calcopirita y de arcilla ocasionales -Diaclasas y foliaciones ligeramente abiertas -Sistemas poco continuos -Superficies onduladas, ligeramente rugosas y grafitosos -Goteos rápidos y chorros
5	K1+300 - K1+555	-Dureza moderada a baja -Muy fracturada a fracturada y foliada. -Rellenos de carbonatos y sulfuros y rellenos de arcilla ocasionales -Diaclasas y foliaciones cerradas -Sistemas continuos -Superficies onduladas, ligeramente rugosas y grafitosos -Goteos rápidos
6	K1+555 - K1+715	-Duras a Muy Duras -De masivos a fracturados y foliados -Rellenos de carbonatos entre diaclasas y ocasionalmente rellenos de arcilla dura. -Sistemas cerrados a ligeramente abiertos -Sistemas poco continuos - Superficies ligeramente onduladas y ligeramente rugosas -Goteos rápidos y chorros

7	K1+715 - K2+145	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Duras a muy Duras</li> <li>-De fracturadas a ligeramente fracturadas</li> <li>-Rellenos de carbonatos en forma de vena</li> <li>-Sistemas de diaclasas cerradas y ocasionalmente abiertas</li> <li>-Planos de foliación subhorizontales</li> <li>-Moderadamente espaciadas a bajo espaciamiento</li> <li>-Superficie ligeramente rugosas y onduladas</li> <li>-Sistemas poco continuos</li> <li>-Goteos rápidos y chorros</li> </ul>
8	K2+145 - K2+450	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Moderadamente dura a dura.</li> <li>-Roca ligeramente alterada de foliada a muy foliada y fracturada</li> <li>-Rellenos de cuarzo, ocasionalmente de arcilla y superficies grafitosos</li> <li>-Diaclasas abiertas</li> <li>-Superficie onduladas y ligeramente rugosas</li> <li>-Goteos lentos y goteos rápidos</li> </ul>
9	K2+450 - K2+683	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Moderadamente dura a dura</li> <li>-Roca de foliada a fracturada</li> <li>-Presencia de cuarzo y sulfuros entre los planos de foliación.</li> <li>-Superficies grafitosos</li> <li>-Superficie ligeramente rugosa y ondulada</li> <li>-Goteos lentos y goteos rápidos</li> </ul>
10	K2+683 - K3+87	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Duras a muy Duras</li> <li>-Fracturadas a ligeramente fracturadas y foliadas</li> <li>-Carbonatos entre planos de diaclasas y foliación</li> <li>-Sistemas poco continuos y planos</li> <li>-Superficie ligeramente rugosa y ondulada</li> <li>- Goteos rápidos</li> </ul>
11	K3+87 - K3+652	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Esquistos duros a moderadamente duros</li> <li>-De fracturados a foliados, ocasionalmente grafitosos</li> <li>-Rellenos de cuarzo y calcopirita, ocasionalmente de arcilla blanda</li> <li>-Sistemas de diaclasamiento ligeramente abiertos a abiertos</li> <li>-Superficie ligeramente rugosa y ondulada</li> <li>-Goteos rápidos y chorros</li> </ul>
12	K3+652 - K3+888	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Esquistos de duros a muy duros</li> <li>-Fracturados a ligeramente foliados</li> <li>-Rellenos con la presencia de carbonatos y sulfuros, ocasionalmente oxidación</li> <li>-Sistemas discontinuos</li> <li>-Diaclasas ligeramente abiertas a cerradas</li> <li>-Superficies onduladas y ligeramente rugosas</li> <li>-Goteos lentos y goteos rápidos</li> </ul>
13	K3+888 - K4+15	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Esquistos moderadamente duros a duros</li> <li>-De foliadas a fracturadas</li> <li>-Rellenos arcillosos y limo-arcillosos y superficies de oxidación</li> <li>-Sistemas de diaclasamiento abiertos a ligeramente abiertos</li> <li>-Superficie ligeramente rugosa y ondulada</li> <li>-Sistema continuo</li> <li>-No se reportan infiltraciones</li> </ul>

Fuente. (INGETEC, Analisis parcial del comportamiento del cono de abatimiento del nivel freatico, proyecto Tunel el Manso, 2013).

En la Tabla 66 se presentan los valores de k obtenidos mediante la expresión de Aliaga.

Dado que la expresión de Aliaga únicamente permite calcular el valor de k (conductividad hidráulica) pero en campo se obtuvieron los valores de Q (Caudal), es necesario recurrir a la expresión de Goodman para obtener el valor de Q y de esta manera poder comparar los resultados de obra.

Tabla 66. Valores obtenidos a partir de la calificación del macizo, de acuerdo a la metodología propuesta por Aliaga.

Tramo	Longitud Tramo (m)	TOTAL - RMR	Calidad Macizo	K (m/s)
1	58.9	54	Media - III	7.00E-06
2	207.7	54	Media - III	7.00E-06
3	617.3	63	Buena - II	1.27E-06
4	416.1	50	Media - III	1.50E-05
5	255	64	Buena - II	1.05E-06
6	160	60	Media - III	2.24E-06
7	430	60	Media - III	2.24E-06
8	305	57	Media - III	3.96E-06
9	233	52	Media - III	1.02E-05
10	404	55	Media - III	5.79E-06
11	565	54	Media - III	7.00E-06
12	236	61	Buena - II	1.85E-06
13	127	72	Buena - II	2.29E-07

Fuente: El autor.

Para determinar las diferentes variables del grado de irrupción de agua, se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Calificación del macizo por la metodología de clasificación RMR.
- Calculo de los valores de conductividad hidráulica (k) para cada uno de los tramos definidos (por medio de la expresión de Aliaga).
- Los valores de cabeza hidráulica promedio en cada sector, de acuerdo con los registros piezométricos.
- Se toma un valor 0.75 para la constante C, sugerido en literatura especializada.
- El rendimiento específico corresponde al valor medio de los valores propuestos por Goodman et al. (1965) para un Basamento rocoso, de acuerdo de acuerdo con la siguiente tabla el valor es  $S_y=5E^{-3} m^{-1}$ .

Tabla 67. Valores de rendimiento específico en rocas graníticas y gneises

Unidad litológica	Rendimiento específico		
	Mínimo	Medio	Máximo
Basamento rocoso	0.0005	0.005	0.009
Zonas de falla	0.05	0.1	0.2

Fuente: (Schick, 2013). Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC). Pág. 532.

El tiempo de excavación se determinó con base en el rendimiento promedio real durante la construcción y avance del túnel, que se realizó en dos frentes NW y SE, los valores de permeabilidad se determinaron con base en la expresión numérica desarrollada por (Aliaga, 2015). En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos, características constructivas e hidráulicas asignadas para la evaluación.

Tabla 68. Valores de infiltración estimados acuerdo a la metodología propuesta por (Aliaga, 2015).

Tramo	Tiempo (seg)	Nivel piezométrico promedio	RMR	Permeabilidad - Macizo (m/s) - RMR	$Q(t) = \sqrt{8 \cdot \frac{C}{3} \cdot k \cdot H_0^3 S_y \cdot t}$		
					m3/m	m3/s/m	lt/seg
1	1453988.6	39.50	54	7.00E-06	79.21	5.45E-05	3.21
2	5127222.9	74.50	54	7.00E-06	385.27	7.51E-05	15.61
3	15238491	120.00	63	1.27E-06	577.44	3.79E-05	23.39
4	10271726	140.00	50	1.50E-05	2054.14	2.00E-04	83.21
5	6294857.1	230.00	64	1.05E-06	895.55	1.42E-04	36.28
6	3949714.3	190.00	60	2.24E-06	778.84	1.97E-04	31.55
7	10614857	197.00	60	2.24E-06	1348.01	1.27E-04	54.61
8	7529142.9	173.00	57	3.96E-06	1242.37	1.65E-04	50.33
9	5751771.4	160.00	52	1.02E-05	1553.03	2.70E-04	62.91
10	9973028.6	110.00	55	5.79E-06	876.66	8.79E-05	35.51
11	13947429	25.00	54	7.00E-06	123.52	8.86E-06	5.00
12	5825828.6	20.00	61	1.85E-06	29.38	5.04E-06	1.19
13	3135085.7	17.00	72	2.29E-07	5.94	1.89E-06	0.24
<b>Σ Q total drenado</b>							<b>403.04</b>

Fuente: El autor.

Para determinar las tasas de infiltración se utilizó la expresión de Goodman en régimen variable con base en los índices de K estimados y los valores de RMR de calificación del macizo.

Con los valores estimados por la metodología propuesta por (Aliaga, 2015) se obtuvieron rangos de permeabilidad entre  $1.5 \text{ E}^{-5}$  a  $2.29 \text{ E}^{-7}$  m/seg, con un caudal máximo en la obtenido de 403 lt/seg, es decir un 22% mayor del máximo registrado en obra.

## Métodos numéricos.

Para el análisis numérico del caso se definieron los límites del sistema y las zonas de discretización, para lo cual se utilizó el código RS<sup>2</sup>, especializado para las áreas de geotécnica y mecánica de rocas.

A continuación, se presentan los parámetros y consideraciones para definir la geometría, materiales y parámetros constitutivos acorde a las condiciones del túnel evaluado:

- Geometría de la excavación completamente aislada, sin ningún tipo de perturbación por otro tipo de obra.
- Modelo constitutivo plástico.
- Una relación de esfuerzos horizontal y vertical simétrica,  $K=1$ .
- Cobertura según el tramo, peso unitario de la Roca de 0.0277 Mpa.
- Geometría de la excavación con una sección en herradura, solera plana.

En la Figura 191 se muestran, los límites del modelo deberán ser representativos para cada tramo evaluado. El límite en el sistema todos los tramos fue definido como un bloque rectangular, cuyos extremos se encuentran a una distancia de tres veces el radio de la excavación, zona típica de influencia por la obra.

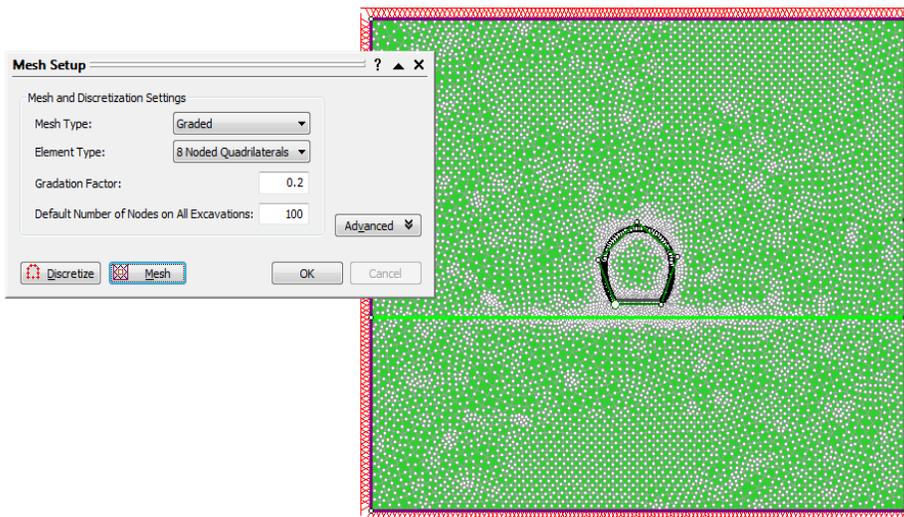


Figura 191. Límites del modelo y geometría de la excavación, generada por el código RS<sup>2</sup>.

El código RS<sup>2</sup> requiere definir la grilla de dominio del problema, con elementos cuadriláteros de ocho nodos y 200 elementos alrededor de los bordes del bloque.

El proyecto se encuentra excavado en una litología compuesta por una intercalación de esquistos verdes y grises, los parámetros y características de los materiales se definieron de acuerdo a las campañas exploratorias realizadas, profundidad del túnel y análisis de los materiales, y por medio del código Roc Lab se calibraron los valores asignados.

A continuación se presentan los resultados del programa RocLab:

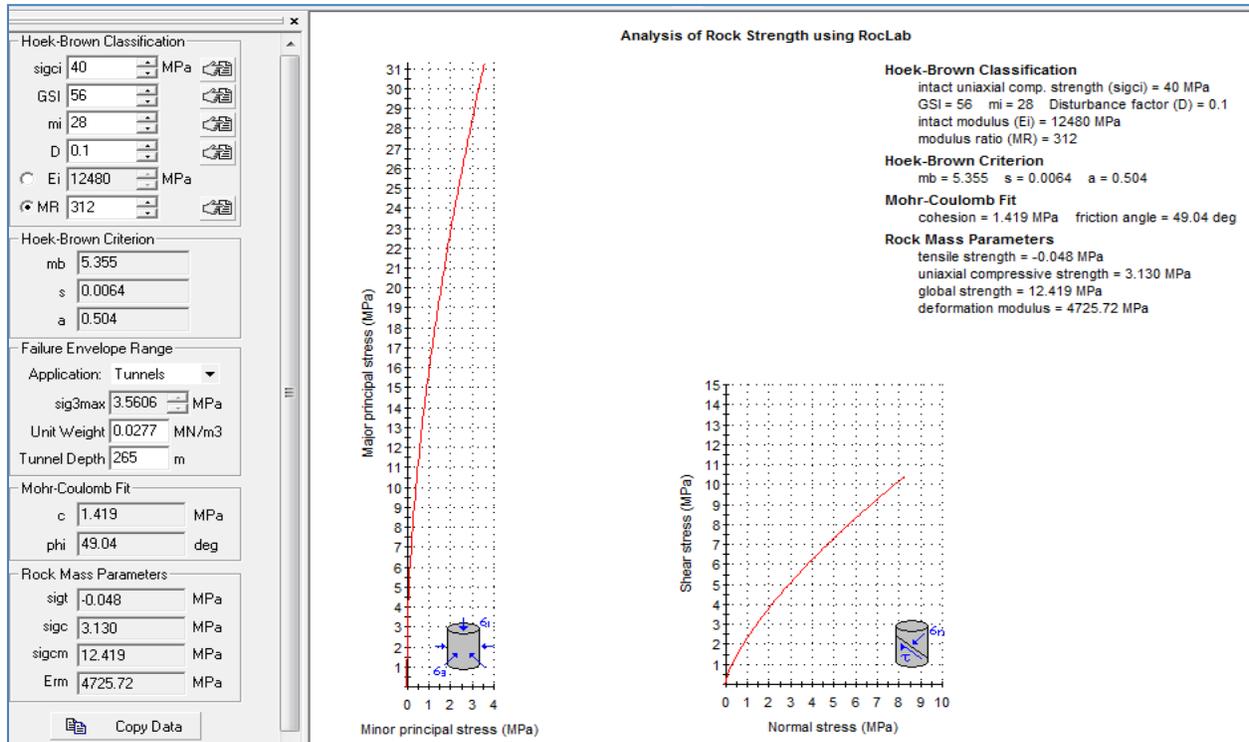


Figura 192. Parámetros de la litología del macizo, de acuerdo al programa RocLab.

Para el proyecto subterráneo en el bloque tipo, se estableció un estado de esfuerzos constantes en los bordes, de acuerdo a los tramos del proyecto y con los valores de cobertura conocidos se definieron los parámetros, se asignó un valor de  $K=1$ ; para simular una condición simétrica de esfuerzos naturales. Además, para representar el confinamiento del bloque en cada uno de los ejes espaciales, todas las superficies y vértices de los límites del modelo estarán completamente restringidas.

Posterior a la generación de la malla se ejecuta el modelo, con un tiempo de cálculo que está en función de la cantidad de elementos, y la complejidad de los parámetros asignados.

A partir de los datos registrados del nivel piezométrico, se incorporaron en cada uno de los tramos y etapas de avance del proyecto la cota original y posterior a la excavación, que se asignaron como etapas al modelo, simulando una condición de total saturación del macizo y controlados por la cabeza de posición tanto del túnel como la de la línea de la cabeza hidráulica en referencia para cada uno de los tramos propuestos.

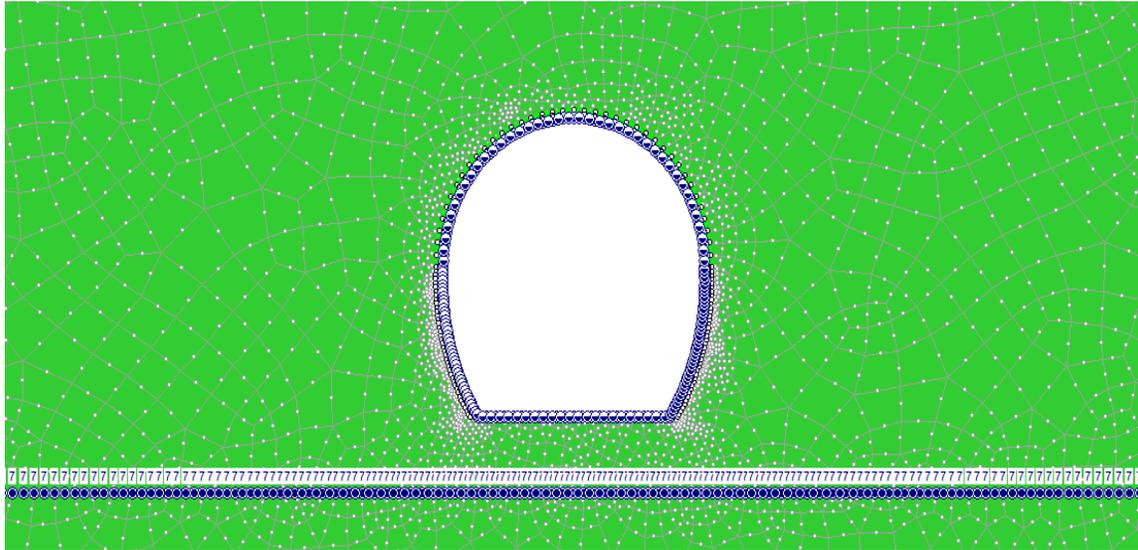


Figura 193. Ubicación de las condiciones de presión hidráulica asignadas para el macizo y túnel.

Con la apertura del túnel se generaría un desconfinamiento de la roca y liberación de presiones, para esta condición se asignó una presión hidráulica = 0 en la periferia de la excavación, la cual sería representativa en el momento que se genere el corte, apertura y avance de la obra.

Luego se variaron los índices de conductividad hidráulica para cada sector del túnel hasta simular los datos de infiltración registrados en la obra. En la Tabla 69 se presentan los valores asignados al modelo para cada sector, de acuerdo con la calificación GSI, niveles piezométricos que se utilizaron para estimar los valores de permeabilidad.

Tabla 69. Parámetros asignados y resultados de caudal para cada tramo evaluado.

Tramo	Longitud Tramo (m)	Altura Media Piezométrica - m	Cobertura	$\sigma_1 = \sigma_v$ Mpa	$\sigma_2$ -Mpa	$\sigma_3$ Mpa	K (m/seg)	GSI	Q(lt/seg)
1	58.9	39.5	80	2.22	2.22	2.22	1.70E-05	54	2.24
2	207.7	74.5	80	2.22	2.22	2.22	2.95E-05	56	6.69
3	617.3	120	129	3.57	3.57	3.57	4.55E-04	59	54.53
4	416.1	140	160	4.43	4.43	4.43	1.01E-04	51	43.59
5	255	230	260	7.2	7.2	7.2	1.38E-04	52	95.96
6	160	190	271	7.51	7.51	7.51	8.01E-05	59	46.92
7	430	197	215	5.96	5.96	5.96	3.01E-05	57	18.28
8	305	173	210	5.82	5.82	5.82	6.67E-05	55	4.99
9	233	160	160	4.43	4.43	4.43	3.20E-06	51	1.50
10	404	110	195	5.4	5.4	5.4	4.35E-05	53	14.11
11	565	25	211	5.84	5.84	5.84	2.20E-04	52	16.23
12	236	20	45	1.25	1.25	1.25	1.77E-04	52	10.92
13	127	17	25	0.69	0.69	0.69	2.60E-04	60	13.05
									329.01

Con esta metodología de elementos finitos para el análisis numérico se determinó que los valores de conductividad más representativos para el sistema se encuentran rangos de  $1E^{-4}$  a  $1E^{-5}$  m/seg, los cuales representan materiales descompuestos y fisurados.

Análisis de los resultados por las diferentes metodologías.

Con base en las diferentes metodologías analíticas por Goodman y (Perrochet & Dematteis, 2007), la propuesta por Aliaga para la calificación del macizo y la numérica por elementos finitos por el código RS<sub>2</sub>, se determinaron los valores de conductividad hidráulica para los diferentes sectores y que se representan en la Figura 194. Donde se pueden apreciar los rangos de conductividad hidráulica estimada.

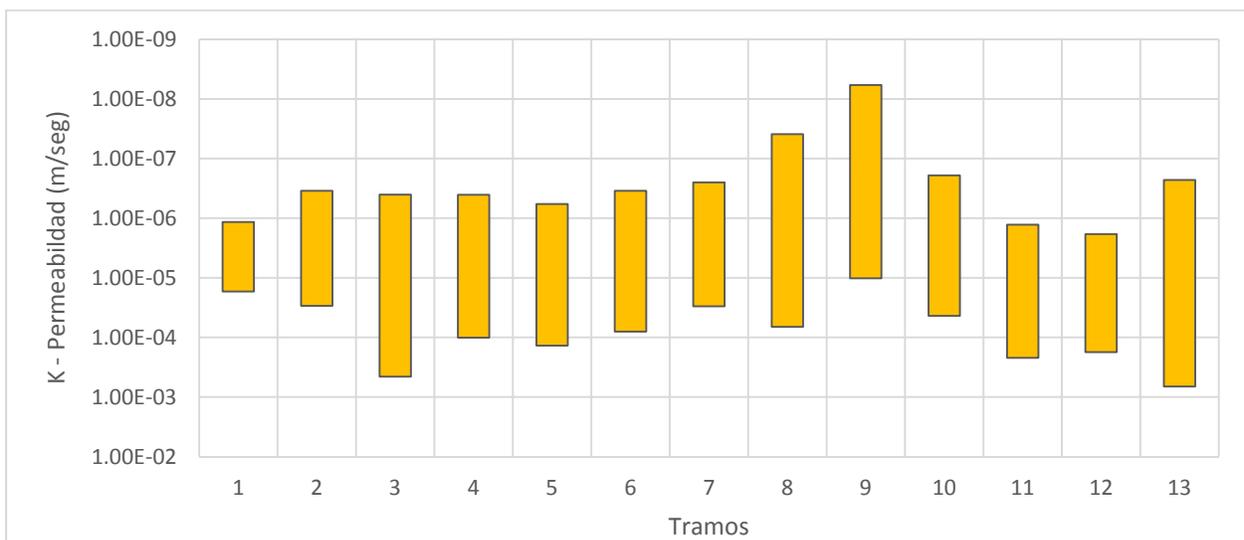


Figura 194. Rangos de permeabilidad para los diferentes tramos del túnel.

Además, como se presenta en la Figura 195, los mayores valores de permeabilidad son los obtenidos empleando la metodología de elementos finitos evaluada con el código RS<sup>2</sup>, con rangos de permeabilidad de  $4.55 \text{ E}^{-4}$  a  $3.2 \text{ E}^{-6}$  m/seg. Mientras que los valores de conductividad determinados por las metodologías retrospectivas a partir de la expresión de Goodman presentaron valores de infiltración entre  $6.69 \text{ E}^{-4}$  a  $5.82 \text{ E}^{-9}$  m/seg.

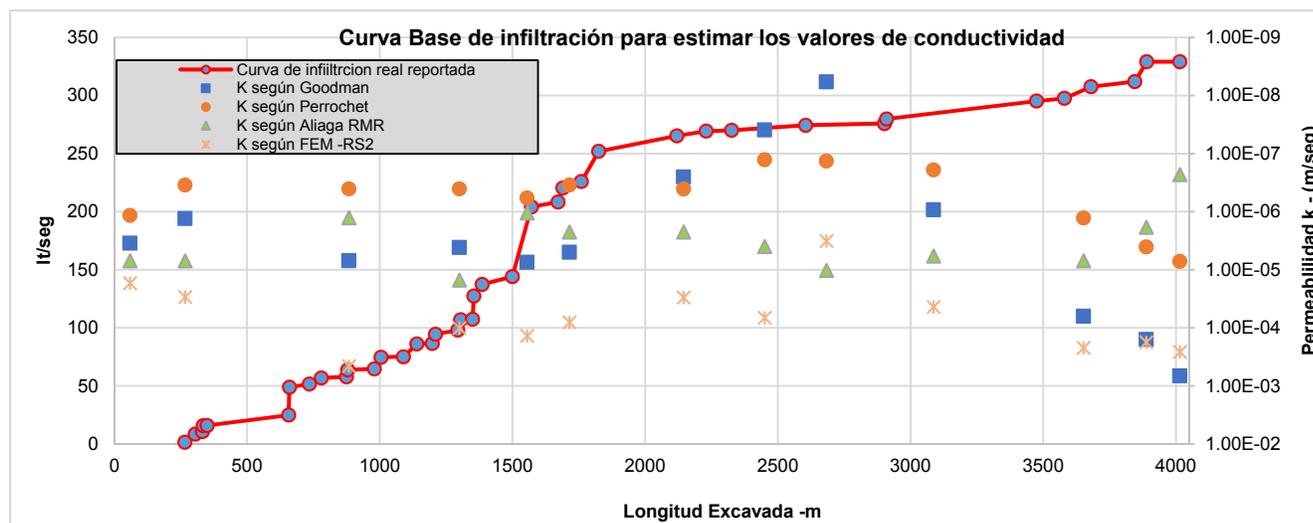


Figura 195. Curva base de caudal de infiltración reportada frente los valores de conductividad de cada tramo por cada método de análisis.

Por otra parte, los valores de permeabilidad definidos bajo la expresión de Perrochet varían entre  $1.27 \text{ E}^{-7}$  y  $7.18 \text{ E}^{-6}$  m/seg. Adicionalmente, con los valores definidos por (Aliaga, 2015) en la metodología de calificación del macizo se definieron índices de permeabilidad en promedio del orden de  $1\text{E}^{-6}$  m/seg.

Como se puede evaluar en la Figura 195, los valores de conductividad hidráulica se encuentran en rangos de  $1\text{E}^{-5}$  a  $1\text{E}^{-6}$  m/seg, lo que indica que el macizo presenta condiciones de roca permeable, que pudo amplificarse por los efectos de la excavación y la redistribución de esfuerzos a lo largo del túnel.

Además, con las condiciones naturales de recarga, altos niveles piezométricos y heterogeneidad del macizo se propició un ambiente para producir las altas tasas de infiltración registradas en la obra.

También, en los resultados obtenidos que se presentan en la Figura 195 los valores de permeabilidad calculados por elementos finitos con el código RS<sup>2</sup>, en promedio son más altos en un orden de 10 veces los valores de conductividad definidos con otras metodologías, estos valores ( $1\text{E}^{-4}$  m/seg) indicarían que se trata de materiales permeables y fisurados.

### 8.3.2. Evaluación de medidas de mejoramiento.

Para complementar el análisis del caso de estudio, se evaluó la eficacia teórica de las medidas de mejoramiento que se pudieren aplicar al túnel, con base en expresiones desarrolladas por Eriksson & Stille 2005, para el caso de inyecciones y por el profesor Celestino en 2.001 para el revestimiento de concreto en túneles.

#### Inyecciones de mejoramiento.

Para realizar una valoración de las inyecciones en el macizo se utilizó la expresión de Eriksson and Stille 2.005, presentada en Leakage and groutability en (Sievanen, 2001), de acuerdo con las características en la conductividad, espesor de la zona inyectada y los efectos del revestimiento en las superficie del túnel se presenta la siguiente expresión para el cálculo del caudal de infiltración:

$$Q_{\text{tunnel}} = \frac{2\pi \cdot K \cdot H \cdot L}{\ln\left(\frac{2 \cdot H}{r_t}\right) + \left(\frac{K}{K_g} - 1\right) \cdot \ln\left(\frac{1+t}{r_t}\right) + \zeta} \quad (86)$$

Donde.

K. Es la conductividad Hidráulica.

$K_g$  Conductividad hidráulica de la zona mejorada.

t Espesor de la zona inyectada.

$r_t$  Radio de la excavación.

H Profundidad del eje del túnel con respecto al nivel del agua.

L Tramo evaluado.

$\zeta$  Efecto piel (skin effect), es un parámetro adimensional, en función de la periferia del túnel, las condiciones de fisuración y excavación, variando de 2 a 5, siguiendo los criterios de *Eriksson and Stille 2005*, en (Sievanen, 2001).

La efectividad en las inyecciones de mejoramiento en los túneles, de acuerdo con los criterios de (Sievanen, 2001, p. 47), según el tipo de terreno que atraviesa el túnel, se estiman los siguientes rangos de efectividad en la conductividad:

- $K < 10^{-10}$  m/s, no Inyectable.
- $10^{-10}$  m/s  $< K < 10^{-8}$  m/s, fracturas inyectables, el agua irrumpe en las fracturas.
- $K > 10^{-8}$  m/s, Inyectable en todas la fracturas libres de rellenos.

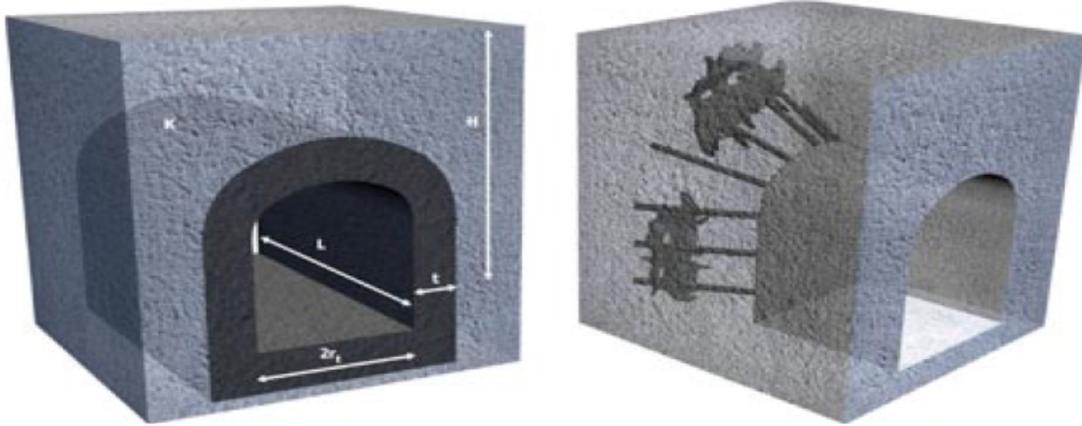


Figura 196. Parámetros de inyección para evaluar las tasas de infiltración en el túnel.  
Fuente. Leakage and groutability. Eriksson and Stille 2005.

Para evaluar el efecto teórico de inyecciones, con base en la metodología de Eriksson and Stille 2005 y los datos de conductividad hidráulica determinado por una evaluación retrospectiva analítica y numérica, se escogieron los valores de permeabilidad más bajos, dado que son susceptibles de ser inyectados.

Tabla 70. Valores asignados a la formulación para estimar los valores de infiltración en los diferentes tramos.

Tramo	Longitud Tramo (m)	Long Acumulada	Nivel piezométrico promedio	Permeabilidad Inicial- (m/s)	Permeabilidad Mejorada - (m/s)
1	58.9	58.9	39.5	1.16E-06	1.16E-07
2	207.7	266.6	74.5	3.47E-07	3.47E-08
3	617.3	883.9	120	4.04E-07	4.04E-08
4	416.1	1300	140	4.05E-07	4.05E-08
5	255	1555	230	5.79E-07	5.79E-08
6	160	1715	190	3.47E-07	3.47E-08
7	430	2145	197	2.51E-07	2.51E-08
8	305	2450	173	3.91E-08	3.91E-09
9	233	2683	160	5.82E-09	5.82E-10
10	404	3087	110	1.91E-07	1.91E-08
11	565	3652	25	1.28E-06	1.28E-07
12	236	3888	20	1.85E-06	1.85E-07
13	127	4015	17	2.29E-07	2.29E-08

En la Figura 197, se presenta las modelaciones para un rango de espesores de la zona inyectada (t) entre 25 cm y 4 m. La conductividad hidráulica de la zona mejorada (kg) se definió como 10 veces menor que los valores de la conductividad de cada tramo, en la Tabla 70 se presentan los valores asignados y en la Figura 197 los resultados.

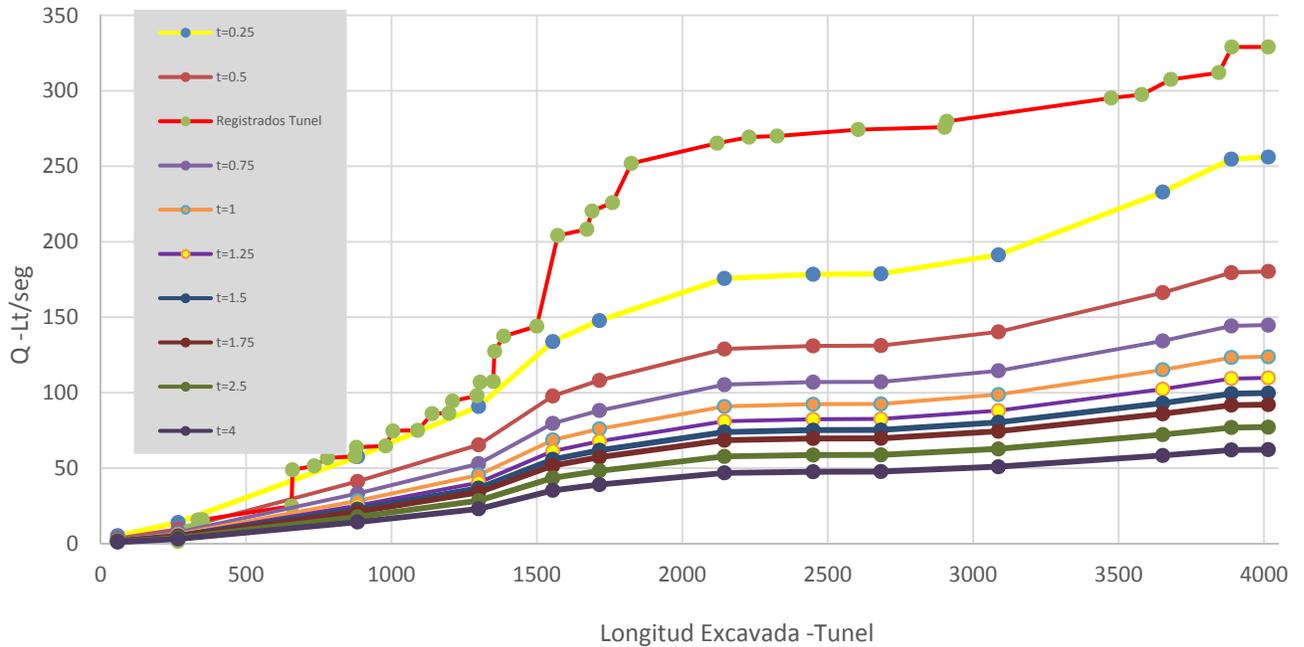


Figura 197. Valores de infiltración estimados de acuerdo a diferentes espesores de la zona inyectada (t) y características de mejoramiento en los valores de conductividad hidráulica.

La infiltración de agua acumulada registrada durante la excavación del proyecto, línea roja de la Figura 197, alcanzó valores mayores a 329 lt/seg. Así mismo, con las inyecciones de espesores entre 0.25 a 4 metros se obtendrían valores de infiltración de agua en rangos entre 256 a 62 lt/seg.

En la Figura 198, se puede observar el efecto de las inyecciones frente al valor de infiltración acumulada máxima reportada para el proyecto, donde se evalúa con el avance del espesor de penetración de las soluciones inyectadas en el macizo, para un 25 cm se tendría una efectividad teórica en la reducción de los caudales reportados del 22%, y para 4 m de espesor de roca impregnado con una efectividad del 81%.

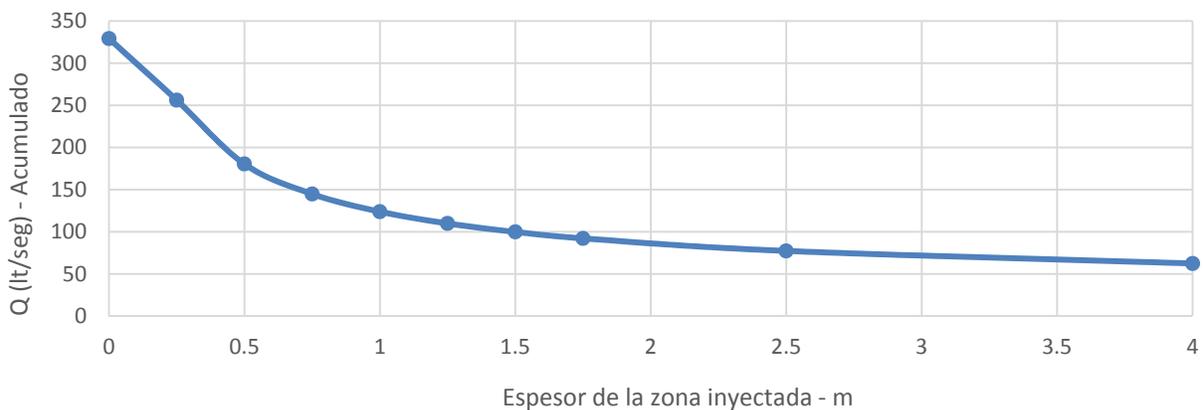


Figura 198. Efectividad de los valores de infiltración frente a espesor de la zona inyectada.

Finalmente, con la condición hidrogeológica del macizo, las inyecciones deben ejecutarse de manera adecuada para lograr un efectivo mejoramiento del anillo de roca circundante a la excavación, además de que las condiciones de la lechada deberán ser compatibles con la mineralogía del macizo (roca Metamórfica de Esquisto) y presión de agua. Esto para garantizar que las inyecciones logren la mitigación efectiva de la irrupción de agua en la obra.

#### 8.4. Otros casos Históricos evaluados.

En esta sección se presentan algunos de los proyectos subterráneos investigados, donde se describen sus características y datos reportados de infiltración, que se relacionan en la Tabla 71, y se describen con detalle en los anexos del presente documento.

Tabla 71. Proyectos subterráneos Nacionales evaluados.

ID	PROYECTO	OBRA	LOCALIZACIÓN	Caudal lt/seg
1	Túneles Kachotis	Túnel vial - Bidireccional	Primavera - Medellín / Antioquia	0.36
2	Túnel Sumapaz	Vial	Melgar	150.00
3	Túnel Las Juntas	Vial / Carretera	Sutatenza, Boyacá	-
4	Tunel El Volador	Vial / Carretera	Macanal / Sutatenza, Boyacá	-
5	Túnel Buenavista	Vial	Bogotá - Villavicencio	230.00
6	Tunel Bijagual	Carretera	Pipiral - Villavicencio	30.00
7	Tunel Pozo Azul	Carretera	Bogotá - Guateque, Guateque - Yopal	-
8	Tunel El Infierno	Carretera	Gararoga - Macanal	-
9	Tunel El Trapiche	Carretera	Macanal	-
10	Tunel El Ventarrón	Carretera	Macanal	-
11	Tunel El Salitre	Carretera	Macanal	-
12	Tunel El Polvorín	Carretera	Santa María	-
13	Tunel La Esmeralda	Carretera	Santa María	-
14	Tunel Presa	Carretera	Santa María	-
15	Tunel Pluma de Agua	Carretera	Santa María	-
16	Tunel Cascada	Carretera	Santa María	-
17	Tunel Moyas	Carretera	Santa María	-
18	Tunel Muros I	Carretera	Santa María	-
19	Tunel Muros II	Carretera	Santa María	-
20	Tunel de la Línea	Vial - Tunel Piloto	Quindío / Tolima	200.00
21	Tunel de Boquerón - Argelino Duran Quintero	Vial - Bidireccional	Bogotá - Villavicencio	160.00
22	Tunel de Occidente - Fernando Gómez	Vial	Medellín - Antioquia	80.00
23	Tunel Seminario	Vial	Rionegro - Antioquia	185.00
24	Tunel Santa Helena	Vial	Rionegro - Antioquia	185.00
25	Chingaza - Tunel el Faro	Hidráulico	Bogotá, Cundinamarca	1.20
26	Chingaza - Tunel Siberia	Hidráulico	Bogotá, Cundinamarca	35.00
27	Chingaza - Tunel Usaquén	Hidráulico	Bogotá, Cundinamarca	35.00
28	Tunel Chivor II	Tunel Hidráulico Presión	Chivor - Boyacá	120.00
29	Túnel Trasvase Guarinó	Hidráulico	Tolima	24.00
30	Túnel Alterno de Usaquén	Túnel Hidráulico a presión	Bogotá, Cundinamarca	4.60
31	Tunel de Acceso El Guavio	Hidráulica	Bogotá, Cundinamarca	160.00
32	Túnel de Fuga el Guavio	Hidráulica	Bogotá - Cundinamarca	31.00
33	Tunel superior carga Guavio	Hidráulica	Bogotá, Cundinamarca	350.00
34	Túnel Fuga - La Miel	Hidráulico	Norcasia, Caldas	38.00
35	Mesitas - Tunel La Guaca	Hidráulico	Mesitas, Cundinamarca	5.00
36	Mesitas - Tunel Paraíso	Hidráulico	Mesitas, Cundinamarca	35.00
37	Mesitas - Tunel Granada II	Hidráulico	Cundinamarca, Granada	605.00
38	Tunel Descarga - San Carlos	Hidroeléctrico	Antioquia	3.50
39	Túnel Presión - San Carlos	Hidroeléctrico	Antioquia	3.40
40	Túnel Presión - San Carlos	Hidroeléctrico	Antioquia	8.00
41	Tunel de Carga Porce III	Hidráulico	Antioquia	315.00
42	Tunel de Carga - Tuluá Bajo	Hidroeléctrica	Tuluá - Valle del Cauca	65.00
43	Tunel de Carga - Tuluá Alto	Hidroeléctrica	Tuluá	60.00
44	Tunel Palacio Rio Blanco	Hidráulico	Cundinamarca	300.00

Fuente: Elaboración propia, investigación de artículos, libros especializados y otra documentación, que se relaciona en los formatos de anexos.

Las variables de infiltración se encuentran relacionadas con la longitud del túnel y flujo de agua como caudal acumulado máximo en un periodo de cada proyecto, recopilados de referencias bibliográficas especializadas.

El 55 % de los datos corresponden a proyectos viales y de carretera, de los cuales el valor máximo se presenta en el Tunel Buenavista que reporta un caudal de infiltración de 230 lt /seg.

Mientras que el restante 45% de los datos investigados corresponden a proyectos hidráulicos, donde se registraron caudales de infiltración hasta 605 lt/seg para el túnel de Granada.

La mayor parte de los datos registrados corresponden a los proyectos hidroeléctricos, los cuales se emplazan en escenarios geológicos de alta montaña, hacia la cordillera oriental y que se encuentran excavados en paquetes geológicos sedimentarios.

Los proyectos hidráulicos construidos hacia el occidente y sobre la cordillera central se emplazaron sobre litologías asociadas a grupos ígneo – metamórficos.

La siguiente figura muestra la variación de la cobertura con respecto a la tasa de infiltración para los diferentes proyectos en el país:

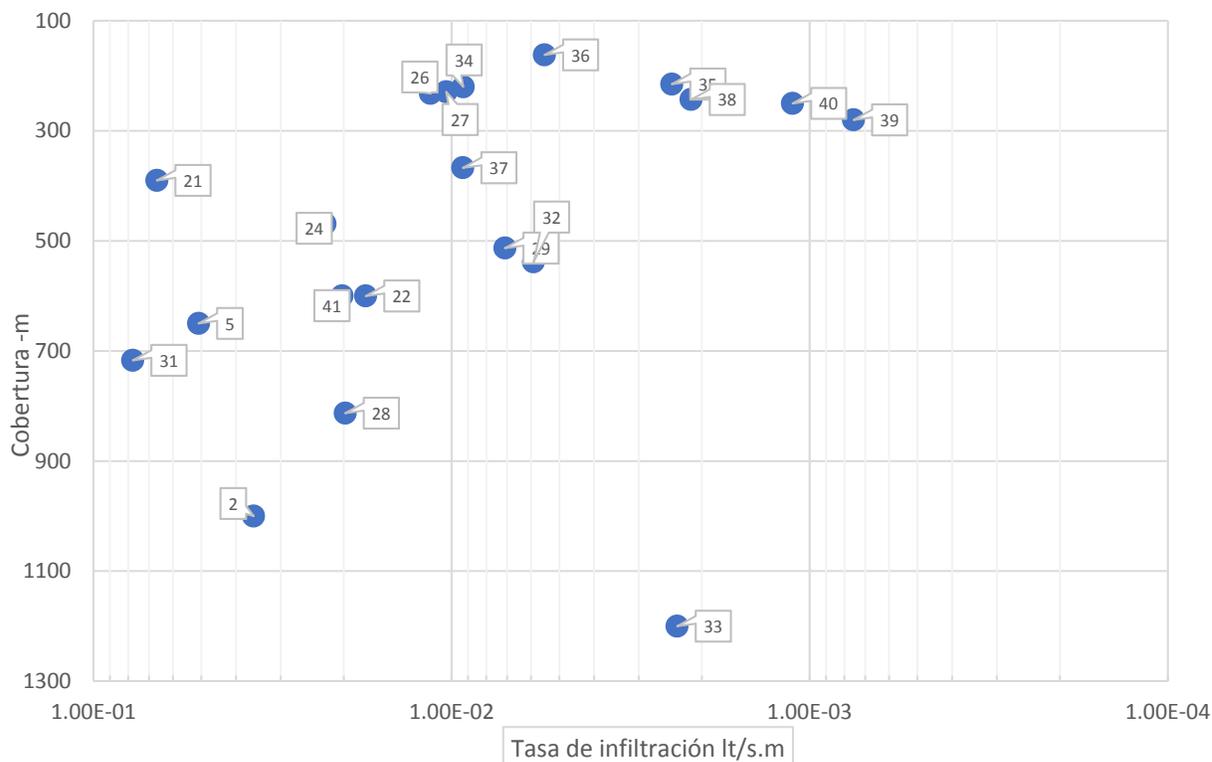


Figura 199. Valores registrados de infiltración ( $m^3/seg/ml$ ) frente a cobertura para los proyectos del país investigados.

El túnel de Granada (número 37) presentó un caudal de infiltración registrado  $Q=605\text{l/s}$  y cuenta con una Geología de rocas sedimentarias Areniscas, Lutitas y Limolitas en zonas de diaclasamiento y presentó irrupciones importantes. Además, el contacto del agua con el macizo generó reacciones mineralógicas y problemas por expansión, que conllevó a altas tasas de deformación y problemas en la estabilidad de la obra.

En los proyectos más antiguos el efecto de las irrupciones de agua durante la construcción se basaba en el manejo del líquido por desniveles y bombeo, como se puede apreciar en la siguiente figura en varios de los proyectos no se reportan medidas de impermeabilización, y otras obras se definieron medidas de impermeabilización mixta, inyecciones, revestimiento primario y secundario.

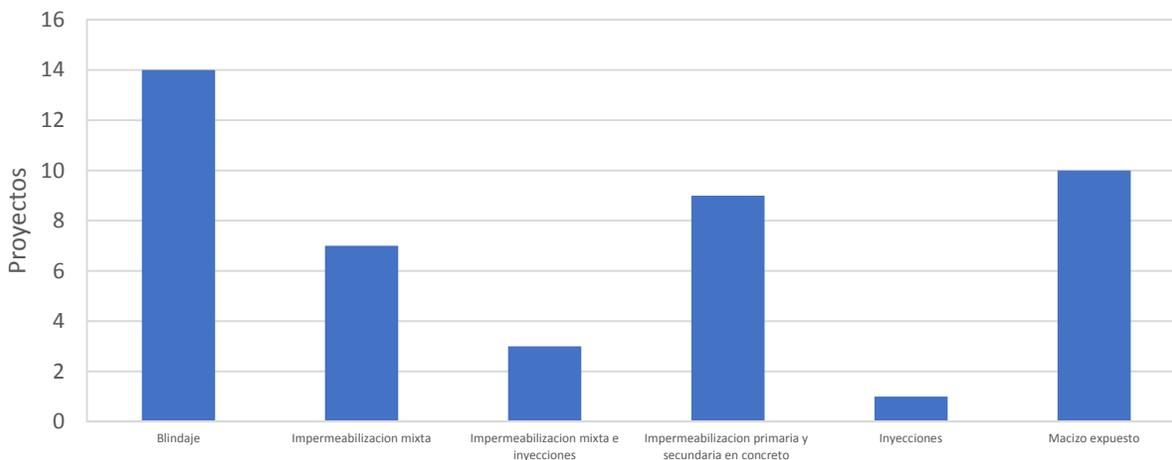


Figura 200. Características de revestimientos en algunos proyectos del país.

Con el pasar de tiempo las medidas constructivas para los proyectos se han enfocado en la aplicación de capas de concreto de soporte con arcos y capas de concreto con malla electro soldada. En los últimos años, se ha empleado la aplicación de inyecciones cementicias de consolidación e instalación de pernos de anclaje en el contorno de la obra, mejoras del hormigón con mezclas de fibras y aditivos para el control de la filtración y deterioro de los materiales.

Los sistemas de drenaje aplicados para los proyectos se enfocan en la instalación de tubería de PVC Perforada, alojada en concreto poroso, longitudinalmente y en los hastiales de los túneles, con cajas de inspección y sumideros.

Actualmente, las medidas para el control de las filtraciones para proyectos de gran complejidad incluyen revestimiento con geomembranas, materiales de geotextil, capas de revestimiento por

concreto elaborado con aditivos impermeabilizantes e inyecciones de consolidación para impermeabilizar el macizo.

Asi mismo, en la siguiente tabla se presentan las características constructivas y caudales de diferentes túneles alrededor del planeta:

Tabla 72. Proyectos subterráneos Internacionales evaluados.

id	PROYECTO	OBRA	LOCALIZACIÓN	Longitud	Caudal lt/seg
1	Boryung tunnel	Túnel bajo el mar	Corea del Sur	6927	0.50
2	Túnel C Suburbano	Vial	Bahía Tseung Kwan / Hong Kong	1700	117.00
3	Route 3 Country Park Sección – Tai Lam Túnel (dual 3-lane)	Túnel vial	Hong Kong	3800	7.00
4	Kau Shat Wan Tunnel and Audits (Mines División Lantau Island Explosives Magazine)	Minería / Almacén para Explosivos	Hong Kong	1150	-
5	Tai Lam túnel	Túnel Vial - bidireccional	Hong Kong	1150	7.00
6	Suburbanos Milán	Ferroviario	Milán, Italia	80000	-
7	Felbertauern Túnel	Túnel Vial	Austria	5183	-
8	Foug-tunnel	Túnel Ferroviario	Francia	1123	-
9	Kanmon Roadway Túnel	Túnel Vial	Japón	3600	-
10	Basel / Olten Hauenstein túnel	Túnel ferroviario	Suiza	8100	30.00
11	Andeer / Sufers Rofla Túnel	Túnel Carretera	Suiza	995	-
12	Túnel de Du Toitskloof	Túnel carretero	Sudáfrica	700	15.00
13	Seikan	Suburbano - Submarino	Japón	53800	720.00
14	Washington	Suburbano - Metro	Estados Unidos	520	5.00
15	Canal de la Mancha	Vial - Metro / Subacuático	Inglaterra - Francia	60000	1.11E-03
16	Vexin	Almacenamiento Hidrocarburos	Noreste Francia	1045	130.00
17	Burnley Túnel	Vial	Australia	3400	150.00
18	Túnel de Manhattan - Etapa III	Hidráulico	New York, Usa	97000	3.50
19	Ryfast Túnel	Túnel vial Subacuático	Noruega	14300	-
20	Túnel St. Gotardo	Carretero	Suiza	57000	92.00
21	Túnel Somport	España / Francia	España	8608	-
22	Tunel Pajares	España	España	10670	500.00
23	Túnel Interestación - Metro Chile	Chile	Chile	14200	-
24	Tailrace Túnel	Manapouri, New Zealand	Nueva Zelanda	2800	450.00
25	Tunnel Symur Capilano	Canada	Vancouver/Canadá	7500	5.00
26	Delaware-Rondout Acueducto Bypass túnel	Túnel Hidráulico	New York - USA	4020	175.23
27	Tunnel Lake Mead	Hidraulico	Los Angeles - USA	4500	226.00
28	Túnel del Guadarrama	Ferroviario	Espana	28377	-
29	Tunel Ashlu Creek	Hidroelectrico	Vancouver, Columbia Británica - USA	4400	5.05
30	Túnel ferroviario Ejpovice	Túnel ferroviario Ejpovice	Republica Checa	4150	28.00
31	túnel de Vadlaheidi	Tunel carretera	Islandia	7200	320.00
32	Túnel submarino Qingdao	Ferroviario	China	7800	0.50
33	Túnel breakthrough	Proyecto Hidroeléctrico	Islandia	58377	1300.00
34	Túneles de Arrowhead	Tunel Hidraulico	Tunel Hidraulico	12800	12.60
35	Túnel de Cipreses - Chacayes	Hidroelectrico	Chile	2450	160.00
36	Túnel Abducción Platanal	Hidroeléctrico	Perú	12200	25.00

Fuente: Elaboración propia, investigación de artículos, libros especializados y otros documentos los cuales se encuentran relacionados en los formatos de anexos.

Para los proyectos internacionales se determinó que la mayoría de valores de caudal de infiltración, en la fase de excavación, se encuentran en rangos de 100 a 200 lt/seg, con algunos picos en las tasas de irrupción mayores a 400 lt/seg, como es el caso de: Proyecto Pajares (500 lt/seg), Tailrace Tunnel – Nueva Zelanda (450 lt/seg), Túnel Subacuático Seikan (720 lt/seg) y el caso excepcional del Túnel Breakthrough – Islandia (1300 lt/seg).

En donde se presentan caudales de infiltración de 125 Lt/seg en promedio, con tasas de infiltración 4.25 lt/seg/m, con un registro mínimo encontrado en la literatura especializada de  $1.85 \times 10^{-8}$  Lt/seg.m, para generar una obra casi totalmente seca en el proyecto túnel Canal de la Mancha.

En la mayoría de casos analizados, el registro de caudales mayores a 200 lt/seg ha generado problemas durante la construcción del túnel, como el caso del túnel Pajares con afectaciones ambientales en un macizo Kárstico por pérdida de drenajes superficiales. En el caso del túnel Seikan y Tailrace se generó un colapso total de algunos tramos de la bóveda excavada, suspensión y retrasos en la entrega de cada proyecto.

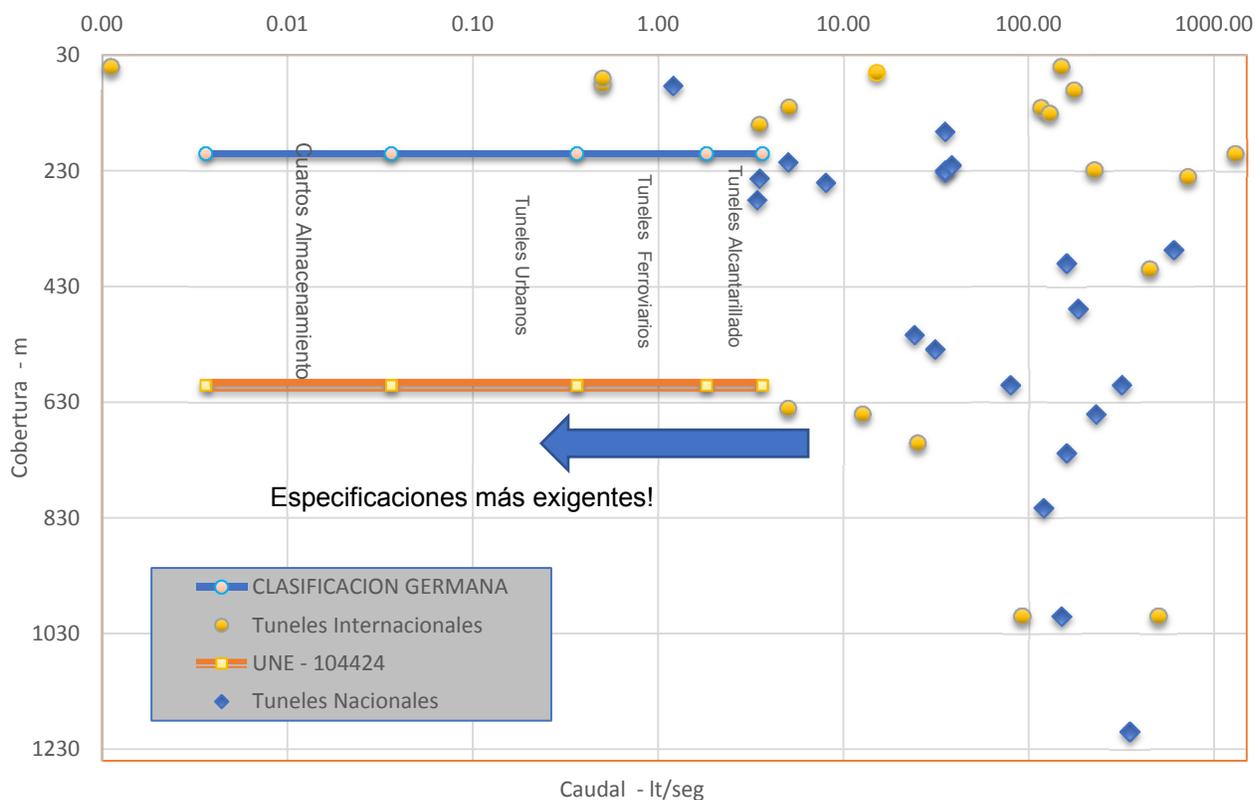


Figura 201. Especificaciones Técnicas frente a caudales de infiltración reportados.

Como se presenta en la figura 201, para proyectos tipo con geometrías de 10 kilómetros de longitud y 5 metros de radio, de acuerdo a la norma española (UNE 104424) y referentes Europeos, en términos de caudal por litro/segundo, el valor máximo para de infiltración de agua requerido es de 3.6 litros por segundo para tuneles de alcantarillado hasta excavaciones tipo almacén y con presencia continua de personal donde se requirieren obras totalmente secas, estas exigencias distan de la realidad en muchos de las obras nacionales y fuera del país, con un promedio general de 160 litros por segundo.

## Capítulo IX – Conclusiones.

Con base en la información recopilada durante el desarrollo del proyecto de investigación académica, los resultados de los ensayos de laboratorio, el análisis de los proyectos de tunelería, las características hidrogeológicas y las técnicas de impermeabilización de túneles se presentan las siguientes conclusiones:

- Las infiltraciones de agua en los túneles son inevitables, están condicionadas por la hidrogeología, las características del terreno, las etapas del proyecto y el método constructivo.
- Es prácticamente imposible construir túneles estancos, pero es posible controlar y reducir las infiltraciones de agua. A partir del conocimiento adquirido en las obras se han perfeccionado técnicas y materiales para el control del agua subterránea en las obras, en técnicas como: geomembranas, concretos de baja permeabilidad e inyecciones de mejoramiento del macizo previas al avance del túnel.
- En el mundo existen especificaciones de rangos de valores de aguas de infiltración permitidas en términos de caudal por longitud de túnel o área de la sección, que deben cumplir los proyectos, los rangos permisibles dados en las directrices de varios países varían según el tipo proyecto.
- La especificación empleada en Gran Bretaña resulta ser menos restrictiva para proyectos viales mientras que la especificación alemana es más restrictiva que la inglesa y que las recomendaciones de la FHWA.
- En Colombia aún no se establece una directriz clara del valor mínimo de infiltración de agua permisible. Para su implementación, se deberán considerar las etapas constructivas y el contexto hidrogeológico particular de cada proyecto.
- Para esta investigación se realizaron ensayos de permeabilidad y relación de vacíos en concretos con diferentes aditivos, estados de fisuración y relaciones A/C de 0.49 y 0.45. Bajo estas condiciones, en la mayoría de los casos se obtuvieron profundidades de penetración de agua menores de 30 mm, y fue posible clasificar los concretos como de baja permeabilidad de acuerdo a la norma NTC 4483, 1998. Las probetas que presentaron mayores valores de

infiltración corresponden a concretos pre fisurados y los más bajos fueron para los casos en los que se emplearon adiciones de metacaolín y materiales por cristalización.

- Para determinar la permeabilidad y relación de vacíos en concretos, se emplean las normas de ensayo NTC 4483 y NTC 5653; no obstante, es muy común clasificar los concretos como de media, baja y alta permeabilidad a partir de la profundidad de penetración del agua en la muestra del concreto.
- Los aditivos de impermeabilización del concreto por cristalización dentro de las mezclas tipo Xipex o Sika disponibles en el mercado, que fueron adicionados al cemento durante el proceso de mezclado, proporcionaron valores similares de profundidad de penetración.
- Para especímenes agrietados a partir de procesos de carga, con tratamiento interno con aditivos de cristalización, se obtuvieron valores inferiores de 18 mm en la profundidad de penetración del agua; por lo tanto, esta puede ser una opción viable para el control de la infiltración del agua en túneles que presenten fenómenos de fisuración del concreto por retracción y fraguado o con grietas en el revestimiento.
- El aporte de las fibras (metálicas y sintéticas) como elemento de refuerzo del concreto lanzado proporciona cualidades mecánicas y de resistencia frente a procesos de tensión. Los resultados obtenidos para las probetas elaboradas de concreto típico para soporte (relación A/C = 0.45) y con adiciones de fibras (metálicas y sintéticas), permiten establecer que un concreto de soporte presenta un bajo valor de profundidad de infiltración de agua sin necesidad del empleo de aditivos, esto debido a la baja relación de A/C.
- Con el empleo de metacaolín a mayor edad del concreto el coeficiente de permeabilidad disminuye, esto se debe a que con el paso del tiempo se sellan los poros y red de capilares del concreto. Por esta razón, la adición del metacaolín al concreto puede considerarse como una alternativa. En la presente investigación, se obtuvieron los mejores resultados de profundidad de penetración con la adición de este material; sin embargo estos valores se determinaron para una mayor edad de los especímenes comparada con las demás muestras. Así mismo, el uso de metacaolín permite obtener una disminución en los costos con respecto al uso de otros materiales. (Ver anexos costos unitarios por metro cubico).
- Las técnicas de tratamiento requieren exponer la superficie fisurada e impregnarla al máximo con las soluciones de aditivos, tarea que se dificulta en las obras subterráneas debido a que usualmente se instalan varias capas de revestimiento, estas características se deben tener

en cuenta en la selección e instalación de los materiales y en la planificación de las medidas de mantenimiento o reparación del revestimiento para los túneles durante la etapa de operación.

- Los resultados obtenidos en las muestras de concreto demuestran que los aditivos de impermeabilización se pueden adaptar a las diferentes etapas o procesos constructivos, ya sea adicionándolos a la mezcla o empleándolos en la reparación del concreto fisurado o agrietado, con importantes ventajas desde el punto de vista de la optimización del material y reparación del hormigón.
- Para el cálculo de infiltraciones, las expresiones matemáticas que predicen el flujo de agua en túneles se fundamentan en la Ley de Darcy y conservación de la energía, se basan en los parámetros hidráulicos de los materiales que componen la unidad geológica y las características constructivas de la obra como; la geometría de la excavación y tiempo de avance, también tienen en cuenta los modelos de comportamiento del sistema hidrogeológico en régimen estatico y transitorio.
- Los modelos analíticos se ajustan bien en medios homogéneos, con altas tasas de permeabilidad, donde se facilita estimar las condiciones de frontera y niveles piezométricos.
- Cuando se realicen modelos para el análisis de las filtraciones en túneles, es importante tener en cuenta que las formulaciones matemáticas fueron desarrolladas con base en el estudio de pozos de agua, la depresión o abatimiento para condiciones horizontales y su analogía con una excavación lineal como un túnel, donde la incidencia se lleva a cabo en un eje horizontal.
- En el país se han realizado avances en la calibración y correcta selección de los parámetros hidráulicos que incorporan las herramientas numéricas especializadas en túneles. En los que se requiere una detallada caracterización de los parámetros del macizo, el análisis riguroso del contexto hidrogeológico y de los mecanismos de conducción del agua a través del terreno, ya que son los aspectos claves para estimar de manera acertada las características de infiltración que se presentan en las obras subterráneas.
- Para el análisis de caudales de infiltración en túneles se pueden emplear métodos empíricos, analíticos y numéricos. Como el método empírico que fue desarrollado por (Aliaga, 2015) y que se basa en la caracterización del macizo. Los métodos analíticos más empleados se encuentran los desarrollados por Goodman y (Perrochet & Dematteis, 2007) que consideran

un régimen transitorio y tienen en cuenta las fluctuaciones del nivel piezométrico. Para el análisis numérico se pueden emplear programas como Phases y ModFlow.

- La metodología de Goodman es la más sencilla e incorpora las características hidrogeológicas y constructivas de los proyectos tuneleros.
- El caso evaluado en esta tesis sobre el comportamiento hidrogeológico corresponde a un túnel de diámetro de 3.18 metros, longitud de 4015 metros, excavado en rocas metamórficas de la formación Cajamarca, con una cobertura máxima de 280 metros. Para su análisis se realizó el cálculo de caudales de infiltración a partir de la permeabilidad en forma empírica, analítica y numérica, que posteriormente se comparó con los registros de infiltración real obtenidos en la obra.
- Para el caso de análisis, la infiltración de agua se encuentra condicionada por las características de las discontinuidades del macizo, las condiciones de recarga y altos niveles piezométricos que hacen que el flujo de agua subterránea emigre hacia las zonas abiertas por la excavación a través de las discontinuidades y zonas fisuradas.
- La metodología analítica de (Perrochet & Dematteis, 2007) permitió obtener valores de permeabilidad más bajos, mientras que en la modelación numérica utilizando el programa Phases se obtuvieron los valores más altos. Además, cuando se presentaron incrementos en el caudal de infiltración se obtuvo una menor dispersión de los datos de conductividad hidráulica obtenida por las diferentes metodologías.
- Los valores de conductividad hidráulica obtenidos con la modelación numérica utilizando el programa Phases se encuentran 10 a 100 veces por encima de los obtenidos con métodos analíticos, es decir condiciones de mayor fracturación del macizo.
- La expresión desarrollada por Eriksson and Stille 2005 (Sievanen, 2001) permite calcular los caudales de infiltración, con ella se evaluaron las inyecciones de espesor variando de 0.25 a 4 metros y fue posible establecer que a mayores espesores de inyección disminuye el caudal de infiltración, para inyecciones de 4 metros de impregnación dentro del macizo se obtuvo una reducción teórica hasta el 81% del agua de infiltración.

## Recomendaciones

- Se recomienda ampliar la investigación con adiciones hasta del 10% de metacaolín, para evaluar sus efectos para el control del agua en especímenes de concreto elaborados.
- En futuras investigaciones se propone realizar un análisis de los costos de elaboración del concreto con adiciones de fibras, elementos de cristalización y metacaolín, ya que estos últimos presentan buenas perspectivas económicas.
- Se podría ampliar la investigación frente a diferentes relaciones de A/C, donde se evalúen los efectos de los aditivos en concretos con edades tempranas para el control del agua.
- Así mismo, en futuros proyectos se proponen evaluar los efectos físicos - químicos del concreto elaborado, con la incorporación de aditivos y características de los agregados, frente al contacto con aguas o soluciones agresivas.
- Existe un campo amplio de investigación frente al desarrollo de las obras subterráneas y buenas prácticas para el manejo de agua, donde se podrían publicar cartillas didácticas para su aplicación por parte de los contratistas y constructores de obra.
- En Colombia se puede ampliar el conocimiento hidrogeológico con el desarrollo de proyectos enfocados al estudio del subsuelo, características de las unidades rocosas e interconexiones subterráneas.
- En el país no hay normativas de los mínimos de infiltración subterránea, por lo cual se recomienda tener en cuenta el contexto geológico, etapas y características constructivas de los proyectos para su implementación.

## Capítulo X - Referencias Bibliográficas.

- Acero, P. (2017). Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles. Bogotá: ECI.
- ACHS. (s.f.). Control de Riesgos en Obras de Construcción - Construcción de Túneles. Chile: 18.
- AENOR. (2015). Norma UNE - 104424. Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P. Madrid: AENOR.
- Agudelo, F., & Espitia, L. (2006). Efecto del metacaolín en el comportamiento del concreto. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito: ECI.
- AITES. (2013). Design Guidance for Spray Applied Waterproofing Membranes. AITES, Avignon.
- AITES, I. . (2016). Ground Water Control With use of Modern Pre/Post Injection Techniques and Materials. Santiago: CTES.
- Aliaga, P. (2015). Relación entre la permeabilidad in situ y la calidad del macizo rocoso. Integrating Innovations of Rock Mechanics, 407 - 413.
- Amberg Engineering. (2016). Waterproofing. Seminario de Túneles (pág. 6). Switzerland.: CTES.
- AMITOS. (2011). Descripción General del espacio Subterráneo. Seminario de Procesos constructivos de Túneles Carreteros (págs. 1- 91). México: AMITOS.
- AMITOS, & Guzman, L. (Octubre de 2012). Túneles Carreteros Diseño, Construcción y Supervisión. Seguimiento Técnico de Obra durante la construcción de túneles carreteros. Oaxaca: AMITOS.
- Anagnostou, G. (2006). Tunnel stability and deformations in water-bearing ground. Symposium on Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics.
- Appelo, T., & Postma, D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution. Amsterdam: Balkema Publishers.
- ASOCRETO. (1995). Tecnología del Concreto. Materiales, propiedades y diseño de Mezcla. Tomo 1 (Vol. Tomo 1). (N. Impresores, Ed.) Bogotá: Nomos Impresores.
- ASOCRETO. (2010). Tecnología del Concreto, Tomo 1 - Materiales, propiedades y diseño de Mezclas. Bogotá: Asocreto.
- AWWA. (2014). Groundwater - Manual of Water Supply Practices—M21, Fourth Edition. Denver, U.S: American Water Works Association.
- BASF. (2014). Pre - Inyecciones de Excavación para túneles de roca. Australia: Master Builders.
- Benavides, R. (2014). Concreto de Alto desempeño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería - Maestría Ing. Civil.

Bickel, J., Kuesel, T., & King, E. (2004). Tunnel Engineering Handbook. (Vol. 2). Colorado, USA: Kluwer Academic Publishers.

Bieniawski, R. (2011). Ingeniería de Túneles prediciendo lo impredecible. Ingeopress, 12 - 16.

Britanica, E. (19 de Marzo de 2016). Tunnel and Underground Excavations. Obtenido de Tunnel and Underground Excavations: <http://global.britannica.com/technology/tunnel#toc72439>

Catalunya, U. (2010). Drenaje e impermeabilización durante la construcción y explotación de túneles. . Catalunya: Ingeniería Geológica y excavaciones subterráneas.

Celada, B., & Geocontrol. (2011). Dimensioning Tunnel Support by Design Methodology - Interactive Structural Design - DEA. Obtenido de [http://www.geocontrol.es/publicaciones/EB-dea\\_2012.pdf](http://www.geocontrol.es/publicaciones/EB-dea_2012.pdf)

Celestino, T. (2001). Shotcrete And Waterproofing for Operational Tunnels. Sao Paulo: University of São Paulo.

Chen, R. (2010). Groundwater Inflow Into Rock Tunnels. University of Texas: University of Texas.

Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. Bogotá: Nomos S.A.

CIPSA. (2015). Manual de Especificaciones de impermeabilización y protección del concreto por cristalización. . Bogotá: XIPEX.

Clark, I. (2015). Groundwater Geochemistry and Isotopes. Boca Raton, US: Taylor & Francis Group.

David, S. &. (1966). Hidrogeología (Vol. Version al Castellano de Hydrogeology). (F. Martinez, Trad.) Barcelona.

DEGUSSA, & MEYCO. (2002). Shotcrete para soporte de Rocas. Suiza.

Duque, G. (2007). Aspectos Geofísicos y Amenazas Naturales en los Andes de Colombia. Manizales: UNAL.

Espinoza, C. (2004). Hidráulica de Aguas Subterráneas y Su Aprovechamiento. Apuntes Semestre Otoño 2004 (pág. 22). Chile: Universidad de Chile.

Fetter, W. (2001). Applied Hydrogeology 4th Edition. New Jersey, US: Prentice Hall.

Freeze, R., & Cherry, J. (1979). Groundwater. USA.

Gattioni, P. (2011). Water Ingress Assessment for Rock Tunnels: A toll for risk Analisis. Springer, 755-764.

Gomes, A. (2013). "Pasado, Presente y Futuro de la Tunelería". Seminario "Desafíos en Túneles y Espacios Subterráneos" (pág. 25). Santiago: CTES.

Gómez, J. (2004). Permeabilidad del concreto y su valoración. Bogotá: ACI.

Gómez, J. (2008). Identificación y Cuantificación de algunos factores en la permeabilidad de concretos y morteros. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Gunnar, K. (2015). Properties of waterproof sprayed concrete tunnel linings. Trondheim: NTNU.

Hürlimann, M. (2013). Clasificaciones geomecánicas. Obtenido de [www.academia.edu](http://www.academia.edu): [www.academia.edu](http://www.academia.edu)

ICE. (2010). Specification for tunnelling. London: The British Tunnelling Society and Institution of Civil Engineers.

ICONTEC. (1998). NTC 4483 - Método de Ensayo para determinar la permeabilidad en el concreto al agua. Bogotá: ICONTEC.

ICONTEC. (2000). Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto. Bogotá: ICONTEC.

ICONTEC. (2000). NTC - 550. Elaboración y curado de los especímenes de concreto en obra. Bogotá: ICONTEC.

ICONTEC. (2005). NTC 504. Refrentado de especímenes cilíndricos de concreto. Bogotá: ICONTEC.

ICONTEC. (2008). NTC 5653. Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido. Bogotá: ICONTEC.

ICONTEC. (2010). NTC - 673. Ensayo de Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Bogotá: Icontec.

IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua. Bogotá: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.

INGEOMINAS. (2001). Tomografía Sísmica Local y Q de Coda para el territorio Colombiano. Instituto Geológico Minero de Colombia, Caldas. Manizales: Instituto Geológico Minero de Colombia.

INGEOMINAS. (2004). Programa de Exploración de Aguas Subterráneas. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería.

INGETEC. (2012). Modelación del comportamiento de aguas de infiltración en el túnel del Manso con la construcción del revestimiento Completo. Bogotá: INGETEC.

INGETEC. (2013). Análisis parcial del comportamiento del cono de abatimiento del nivel freático, proyecto Túnel el Manso. Bogotá: INGETEC.

INVIAS. (2010). Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS.

INVIAS. (2016). Túnel Kachotis. . Memorias XI Seminario de túneles. . Bogotá: ACTOS.

ISAGEN. (2013). Central Hidroeléctrica La Miel I. ISAGEN S.A.

ITA. (2012). Descripción general del uso del espacio subterráneo. Oaxaca: ITA.

ITACET. (2012). Manejo de Agua en Túneles. Simposio Internacional de Túneles y Tecnologías de Hormigón Proyectado (págs. 1-43). Santiago: ITACET.

Jimeno, C. (1997). Manual de Túneles y Obras Subterráneas. Madrid: Entorno Grafico.

Kong, G. o. (2006). Proceedings of the 30th International Geological Congress y Chan & Ng (2006). Hong Kong: Civil Engineering and Development Department The Government of the Hong Kong Special Administrative Región.

Maidl, B. (2014). Handbook of Tunnel Engineering II, Basics and Additional Services for Design and Construction. Berlin: Ernest & Sohn.

Maidl, B., Thewes, M., & Maidl, U. (2014). Handbook of Tunnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction. En Handbook of Tunnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction (págs. 189 -243). Berlin: British Library Cataloguing-in-Publication Data.

Martínez, J. (2011). Análisis del concreto Lanzado como revestimiento definitivo para túneles. Bogotá: Universidad Javeriana- Facultad de Ingeniería Civil.

Megaw, T. M. (1988). Tunnels : planeación, diseño y construcción. Mexico: Limusa.

Minambiente. (2010). NSR-10- Norma para Construcciones Sismo Resistentes. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Muhammad, S. (2012). Drainage Systems. Croatia: Drainage Systems.

Nazarchuk, A. (2005). Water intrusion in underground Structures. Massachuset, USA: MIT.

Neville, A. (2011). Properties of concrete -Fifth Edition. Edinburgh Gate: Pearson.

NOAA. (2016). What is the niño? Obtenido de National Oceanic and Atmospheric Administration: [http://www.wrh.noaa.gov/fgz/science/el\\_nino.php?wfo=fgz](http://www.wrh.noaa.gov/fgz/science/el_nino.php?wfo=fgz)

NONNER, J. (2003). Introduction to Hidrogeology. Suiza: Swets & Zeitlinger B.V.

Norma UNE 104424, Sistemas de impermeabilización de túneles y galerías con láminas termoplásticas prefabricadas de PVC-P (Norma Española 2015).

NTS. (2010). Introduction to water control in Norwegian Tunneling. Noruega: Norwegian Tunneling Society .

Oyarzún, R. (2007). Transporte de contaminantes en aguas subterráneas. Obtenido de [www.aulados.net](http://www.aulados.net) Temas Ambientales 2007.

Perrochet, P., & Dematteis, A. (2007). Modeling Transient Discharge into a Tunnel Drilled in a Heterogeneous Formation. Torino: Ground Water 45.

Peru, P. U. (1989). Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil. Lima, Peru.

Pinillos, L. (2013). Túnel en macizos calcáreos Karstificados.

Posiva. (2001). Leakage and groutability. Finland: Working Report .

Ramirez, J. (2013). Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos Carsticos. Sociedad Geológica Mexicana, 71-82.

Rivas, L., & Rey, A. (2005). Sistema Impermeabilización Posterior de Túneles y Galerías. SIKA, 25.

Rocca, J., & Flores, M. (2015). Integrating Innovations of Rock Mechanics. Buenos Aires: IOS Press.

Ruiz, L. (2017). Estado del arte de la impermeabilización de túneles en roca. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Sanchez, J. (Septiembre de 2014). Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. Obtenido de Hidrología: <http://hidrologia.usal.es/>

Schick, J. (2013). Groundwater Inflow Characterization for a Tunnel Constructed Adjacent to an Existing Concrete-Lined Pressure Tunnel. Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), 525 -537.

Scientist, News. (9 de Septiembre de 2009). News Scientist. Obtenido de 13 more things: Antimatter mystery: <https://www.newscientist.com/article/mg20327246-600-13-more-things-antimatter-mystery/>

SCT. (2016). Manual de diseño y construcción de túneles en carretera. . México: Secretaria de comunicaciones y transportes de Mexico.

SGL. (2011). Aguas Subterráneas—Acuíferos (Zaniel I. Novoa Goicochea ed.). Lima, Peru: Sociedad Geográfica de Lima.

Sievanen, U. (2001). Leakage and groutability. Helsinki: Posiva OY.

SIKA. (2004). Concreto Proyectado en la construcción de Túneles. Bogotá: SIKA.

SIKA. (2013). Sika Concrete Handbook. Zürich: SIKA.

SIKA, & Maldonado, P. (2015). Impermeabilización de Túneles - Sistemas Flexibles. Impermeabilización de Túneles - Sistemas Flexibles (pág. 70). Argentina: SIKA.

Singhal, B., & Gupta, R. (2010). Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Berlin: Springer.

SME. Society for Mining, M. a. (2011). Concrete for underground structures : guidelines for design and construction. Colorado - USA: SME.

Society for Mining, M. a. (2011). Concrete for Underground Structures. Colorado, United States of America.

Soto, P. (2004). Construcción de Túneles. Chile: Universidad Austral de Chile.

Suescun, L. (2016). Modelación analítica y numérica para predicción y calibración de caudales de infiltración en obras subterráneas. Bogotá: UNAL.

Taniguchi, M., & Hiyama, T. (2014). Groundwater as a Key for Adaptation to Changing Climate and Society (Global Environmental Studies ed.). Japan, Colombia: Springer.

Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. Madrid: Pearson Educación S.A.

Thomas, A. (2009). Sprayed Concrete Lined Tunnels. UK: Taylor and Francis.

Trocellen. (s.f.). Obra civil Impermeabilización de Tuneles. Trocellen, 6.

Ulloa, A. (2014). Métodos Indirectos de Exploración. . Métodos Geofísicos (pág. Presentación). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

USGS. (1987). Basic Ground Water Hydrology. Dallas, U.S: Government U.S.

USGS. (3 de 3 de 2016). La ciencia del agua para las Escuelas. Obtenido de Conceptos sobre hidrología y aguas subterráneas: <http://water.usgs.gov/gotita/earthgwaquifer.html>

USGS. (2016). The water cycle. Obtenido de U.S. Geological Survey: <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>

Vallejo, L., Ferrer, M., & Ortuño, L. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson.

Vargas, N. (2005). Zonas Hidrogeológicas Homogéneas de Colombia. Obtenido de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/15025/>

Velez, M. (1999). Hidráulica de Aguas Subterráneas - 2ª edición. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia.

# **ANEXOS**

## Anexo 1. Definiciones

Para los fines de este documento se aplican las siguientes definiciones, de acuerdo a normatividad y otra bibliografía investigada.

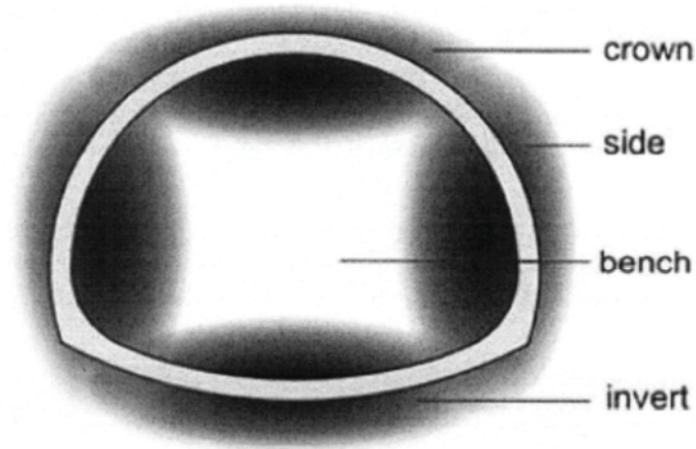


Figure A-1, Elements of a Tunnel Cross Section, (Kolymbas 2005)

- Acceso:** Rampa o trinchera de acceso a la boquilla de un túnel.
- Afloramiento:** Masa rocosa que aflora desnuda en la superficie del terreno.
- Anclaje:** Cable o barra de acero instalado en el interior de un taladro.
- Arandela:** Placa de reparto que permite transmitir el esfuerzo de sostenimiento de un bulón, membrana etc., a la parte superficial de la zona excavada.
- Agua higroscópica:** Parte del agua contenida en un suelo o roca, fuertemente adherida por atracción a las partículas minerales, que no puede ser eliminada por gravedad, sino sólo por calentamiento.
- Acuífero.** Unidad de roca o sedimento, capaz de almacenar y transmitir agua, entendida como el sistema que involucra las zonas de recarga tránsito y descarga, así como sus interacciones con otras unidades similares, aguas superficiales y marinas.
- Agua libre:** Porción del agua subterránea no adherida a las partículas del suelo o roca que puede fluir libremente, por gravedad, hacia túneles, pozos, captaciones etc.

<b>Barrenos:</b>	Pieza metálica para generar el hueco en la roca, acoplada con los taladros utilizados para la colocación de explosivos.
<b>Bóveda:</b>	Parte superior de la sección de un túnel.
<b>Bulón:</b>	Elemento de sostenimiento consistente en una barra metálica que se instala, anclada, en taladros en las paredes de una excavación.
<b>Bulón de anclaje:</b>	Barra de acero generalmente de longitud inferior a 7 metros, equipada con un anclaje mecánico de expansión en su extremo, que se inserta en taladros perforados alrededor de la sección de un túnel para rigidizar y sujetar posibles bloques semidesprendidos.
<b>Buzamiento:</b>	Inclinación con respecto a la vertical de los estratos, fallas, etc.
<b>Cabeza de bulón:</b>	Extremo roscado de un bulón donde se instalan la placa de reparto y la tuerca de fijación y/o tensado.
<b>Calar:</b>	Empalmar o enlazar dos túneles o galerías entre sí.
<b>Capa semipermeable:</b>	Término geológico - hidrogeológico con el que se conocen los estratos que permiten el flujo de agua, pero a una velocidad mucho menor que la de un acuífero.
<b>Carga hidráulica:</b>	Carga de agua.
<b>Colector principal:</b>	Conducción principal en un sistema de alcantarillado, drenaje etc.
<b>Contrabóveda:</b>	Suelo o solera de una excavación subterránea.
<b>Construcción mecanizada:</b>	Perforación de túneles por medios mecánicos, diferenciándose de la perforación con explosivos.

<b>Ciclo de avance:</b>	Conjunto de operaciones que conforman un ciclo de avance en túneles en construcción donde las labores de excavación-sostenimiento se repiten periódicamente.
<b>Convergencia:</b>	Movimiento relativo de techo y muro o de los hastiales en una excavación. Deformación radial producida en el perímetro de la superficie excavada de un túnel como consecuencia de la redistribución de tensiones en su entorno.
<b>Conglomerado:</b>	Roca sedimentaria compuesta esencialmente por granos de diámetro mayor de 2 mm.
<b>Cuele:</b>	Espacio o hueco que crean los barrenos que se disparan con secuencia anticipada a los barrenos de destroza para dar salida al cuerpo principal de la voladura.
<b>Destroza:</b>	Parte inferior de un túnel que es construido excavando en primer lugar la parte superior, avance, y a continuación, a determinada distancia del frente, la parte inferior. Sistema de media sección y destroza.
<b>Disco:</b>	Accesorio de PVC para fijación de la lámina de impermeabilización.
<b>Dovelas:</b>	Piezas prefabricadas, metálicas o de hormigón, que se fijan mutuamente para construir un sostenimiento o revestimiento.
<b>Entibación provisional:</b>	Protección temporal del frente y bóveda en un túnel ejecutado en terrenos poco competentes.
<b>Escombro:</b>	Suelos o rocas excavadas que deben ser retiradas de la excavación.
<b>Trasdós:</b>	Cara exterior (hacia la roca) del revestimiento de un túnel.
<b>Falla:</b>	Superficie de deslizamiento entre estratos o planos de falla.

<b>Filtración:</b>	Vía de agua.
<b>Factor de maduración.</b>	Factor que es una función de la edad del concreto (horas o días) multiplicada por la diferencia entre la temperatura media del concreto durante el curado (grados) y una temperatura de referencia por debajo de la cual se detiene la hidratación. <sup>1</sup>
<b>Friable:</b>	Roca floja, poco consolidada, cuyos constituyentes pueden ser extraídos sin dificultad a mano.
<b>Galería piloto:</b>	Galería de avance ejecutada para el reconocimiento de los materiales, previamente al avance del túnel principal
<b>Línea de abono:</b>	Línea de gálibo, fuera de la cual la excavación no es abonada.
<b>Geocompuesto:</b>	Material compuesto por al menos un geosintético entre sus componentes, que se usa en contacto con el suelo y/u otros materiales en ingeniería para aplicaciones geotécnicas, con función de drenaje
<b>Geomembrana:</b>	Barrera geosintética impermeable.
<b>Geoespaciador:</b>	Estructura tridimensional polimérica diseñada para crear un espacio de aire del suelo y/u otros materiales en aplicaciones geosintéticas de ingeniería.
<b>Geosintético:</b>	Producto fabricado con materiales sintéticos que se usa en contacto con el suelo y/u otros materiales para aplicaciones geotécnicas.

---

<sup>1</sup> (Gil, 2015). <http://blog.360gradosenconcreto.com>. Centrales hidroeléctricas en el corazón del Valle: Hidrotuluá.

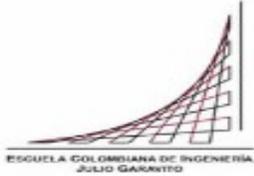
<b>Geotextil:</b>	Material textil plano, permeable, polimérico sintético, que puede ser tejido o no-tejido, que se usa en contacto con el suelo y/u otros materiales para aplicaciones geotécnicas.
<b>Gunitar:</b>	Puesta en obra de mortero y hormigón por proyección sobre una superficie a través de una boquilla., previamente transportado, en forma neumática o hidráulica.
<b>Hastiales:</b>	Costados, paredes laterales de un túnel.
<b>Hidrología</b>	Es la ciencia geográfica que se dedica al estudio de la distribución, espacial y temporal, y las propiedades del agua presente en la atmósfera y en la corteza terrestre. Incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares.
<b>Impermeabilización interior:</b>	Sistema de impermeabilización realizado desde el interior del túnel o galería.
<b>Impermeabilización exterior:</b>	Sistema de impermeabilización realizado en el exterior del túnel o galería, generalmente a cielo abierto.
<b>Intradós:</b>	Superficie interior del revestimiento de un túnel.
<b>Jumbo:</b>	Máquina con brazos perforadores.
<b>Límite elástico:</b>	Valor límite del esfuerzo o tensión aplicable a un material con una deformación elástica, por encima de la cual se producirían deformaciones plásticas, no recuperables.
<b>Límite líquido:</b>	Contenido de agua en el suelo, punto de transición entre los estados plásticos y líquidos.
<b>Membrana impermeabilizante:</b>	Láminas sintéticas prefabricadas que, adecuadamente instaladas y soldadas entre sí, garantizan durante un determinado plazo de tiempo la función de impermeabilización.

<b>Metro:</b>	Ferrocarril metropolitano, subterráneo, aéreo o mixto.
<b>Microtúnel:</b>	Túneles inferiores a 900 mm de diámetro.
<b>Minitúnel:</b>	Túnel menor de 3 m <sup>2</sup> , sección según normas internacionales.
<b>N.A.T.M.:</b>	Nuevo método austríaco de construcción de túneles.
<b>Precorte:</b>	Técnica de excavación con explosivos donde se crea una zona de voladura cuidadosa en el contorno de la excavación, disminuye la fracturación de la zona que circunda a la excavación.
<b>Rebote:</b>	Hormigón proyectado desprendido durante su aplicación.
<b>Recubrimiento:</b>	Espesor de suelos o rocas por encima del túnel.
<b>Revestimiento:</b>	Protección permanente del sostenimiento de las excavaciones subterráneas, ya sean de mortero, mampostería, hormigón proyectado o bombeado, hierro, madera, acero etc.
<b>Clave:</b>	Zona central superior de la bóveda
<b>Roca:</b>	Se denomina roca a los materiales naturales con resistencia a la compresión simple superior a 10 kg/cm <sup>2</sup> .
<b>Roca dura:</b>	Rocas con resistencia a la compresión simple superior a 300 kg/cm <sup>2</sup> .
<b>Roca sana:</b>	Rocas de reciente exposición al exterior o carentes de meteorización.
<b>Sistema impermeabilización:</b>	Conjunto de capas encaminado a controlar y reconducir fluidos.

<b>Sistema Oberhasli:</b>	Procedimiento ligado a la impermeabilización primaria o preliminar de túneles y que conlleva todas las operaciones de recogida de aguas, mediante drenes.
<b>Sobreexcavación:</b>	Excavación por encima del gálibo de proyecto.
<b>Soporte resistente:</b>	Revestimiento o sostenimiento provisional instalado para dar estabilidad y seguridad durante la excavación del túnel, cuyos elementos quedan generalmente <i>in situ</i> , incorporados en el revestimiento.
<b>Sostenimiento:</b>	Sistema para dar estabilidad y seguridad durante la construcción, cuyos elementos quedan generalmente <i>in situ</i> e incorporados en el revestimiento definitivo, por ejemplo, bulones, hormigón proyectado, tablestacas de avance, “paraguas” etc.
<b>TBM (<i>Tunnel boring machine</i>):</b>	Máquina tuneladora de sección completa, con o sin escudo, diseñadas para la excavación de túneles.
<b>Túnel a cielo abierto/falso:</b>	Túnel construido excavando una trinchera desde la superficie, construyendo el revestimiento en el interior de la trinchera que es posteriormente rellenada.
<b>Ventilación longitudinal:</b>	Unidireccional o reversible, generalmente realizada por ventiladores, impulsores, fans, etc.
<b>Ventilación transversal:</b>	Cuando la ventilación de la cámara habitable del túnel se produce transversalmente al mismo, entre dos sistemas de conducción, uno de renovación y otro de extracción, instalados en puntos opuestos de la sección.
<b>Voladura perimetral:</b>	Tipo de voladura o parte de la secuencia de disparo de una voladura que pretende excavar la roca perimetral de un túnel ajustándose a un perfil predeterminado.

# **ENSAYOS DE LABORATORIO.**

Reporte de resultados - Fotografías



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

**Registro Permeabilidad del concreto al agua**

Muestra 1

Concreto Presifurado

Fecha

9/9/2016

Ubicación

Laboratorio ASOCRETO

**Equipos**

Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra

Especimen cilíndrico de concreto pre fisurado.

Descripción

Concreto con agregados de rio, edad 29 días, el espécimen se sometió a un proceso de carga de 234 kg/cm<sup>2</sup> (23 Mpa) para generar un prefisuramiento al material.

Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

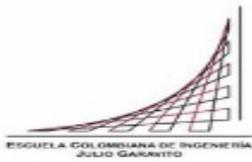
**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C	26	Humedad %	59
----------------	----	-----------	----

Muestra		Prefis 1	Prefis 2	Prefis 3
Longitud del espécimen (mm)		102.50	102.50	102.50
Diámetro del espécimen (mm)		100.80	100.80	100.80
Presión de agua - Mpa		0.50	0.50	0.50
Inicio prueba a presión	Fecha	8/9/16	8/9/16	8/9/16
	Hora	2:30 PM	2:30 PM	2:30 PM
Culminación prueba a presión	Fecha	12/9/16	12/9/16	12/9/16
	Hora	3:20 PM	3:20 PM	3:20 PM
Tiempo de presión (Horas)		96.00	96.00	96.00
Profundidad penetración de agua (mm)		102.50	102.50	102.50
Promedio Penetración (mm)		102.50	102.50	102.50

Observaciones

Los especímenes fueron elaborados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería, tuvieron un curado de 28 días. Posteriormente, en los laboratorio de Asocreto se les realizo un corte a cada muestra con una sierra cortadora para concreto, las muestras se impregnaron con una solución epoxica (Sikadur -200) para evitar fugas laterales del liquido aplicado en la prueba.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito	Muestra 1
Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia	Concreto Presifurado
<b>Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido</b>	

Fecha	9/9/2016	Ubicación	Laboratorio ASOCRETO
-------	----------	-----------	----------------------

Equipos	
Cronometro	-
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido. NTC 5653
Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete. ASTM C642-13

### LABORATORIO DE CONCRETOS

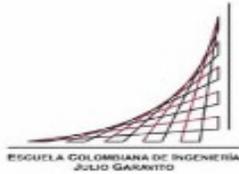
Temperatura °C	23	Humedad %	45
----------------	----	-----------	----

Muestra	Prefis 001			Prefis 002			Prefis 003		
Longitud del espécimen (mm)	75.00	75.25	74.95	82.30	82.16	82.50	85.00	85.20	85.30
Diámetro del espécimen (mm)	102.20	101.79	101.50	101.00	101.87	101.65	102.35	101.95	101.75
Volumen del Espécimen cm <sup>3</sup>	611.35			666.17			696.15		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1520.00			1401.00			1474.00		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1622.00			1498.00			1573.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. (gr). 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización.	1623.00			1499.00			1575.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	899.00			825.00			874.00		

**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorción después de la inmersión	6.71%	6.92%	6.72%
Absorción después de la inmersión + hervido	6.78%	7.00%	6.85%
Densidad seca gr/cm <sup>3</sup>	2.10	2.08	2.10
Densidad después de la inmersión gr/cm <sup>3</sup>	2.24	2.22	2.24
Densidad después de la inmersión + hervido gr/cm <sup>3</sup>	2.24	2.22	2.25
Densidad aparente gr/cm <sup>3</sup>	2.45	2.43	2.46
Volumen de poros permeables (vacíos) cm <sup>3</sup>	14.23	14.54	14.41

Observaciones	Concreto con agregados de rio, edad 29 días, el espécimen se sometió a un proceso de carga de 234 kg/cm <sup>2</sup> (23 Mpa) para generar un prefisuramiento al material.
---------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
**Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia**

**Muestra 2**

**Registro Permeabilidad  
 del concreto al agua**

Concreto prefisurado  
 +aditivo Admix

Fecha	9/9/2016	Ubicación	Laboratorio ASOCRETO
-------	----------	-----------	----------------------

Equipos	
Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	-
Cinta métrica	-
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra	Espécimen cilíndrico de concreto prefisurado con adiciones de aditivos Xipex
Descripción	Concreto con agregados de rio, edad 28 días, el espécimen se sometió a un proceso de carga de 234 kg/cm <sup>2</sup> (23 Mpa) para generar un prefisuramiento al material, e impregnacion de aditivo impermeabilizante (Admix - 2%).

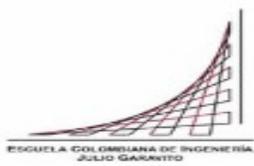
Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C	28	Humedad %	53
----------------	----	-----------	----

Muestra	Pref - Xp1	Pref - Xp2	Pref - Xp3						
Longitud del espécimen (mm)	102.70	105.50	101.00						
Diámetro del espécimen (mm)	100.50	99.60	101.40						
Presión de agua - Mpa	0.50	0.50	0.50						
Inicio prueba a presión	Fecha	8/9/16	8/9/16						
	Hora	2:50 PM	2:50 PM						
Culminación prueba a presión	Fecha	12/9/16	12/9/16						
	Hora	3:10 PM	3:20 PM						
Tiempo de presión (Horas)	96.00	96.00	96.00						
Profundidad penetración de agua (mm)	85.50	92.40	85.40	60.80	53.50	68.40	89.40	86.50	86.30
Profundidad penetración de agua (mm)	87.77			60.90			87.40		

Observaciones	Los especímenes fueron elaborados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería, tuvieron un curado de 28 días. Luego en los laboratorio de Asocreto, se les realizo un corte a cada muestra con una sierra cortadora para concreto estableciendo las dimensiones requeridas en la prueba, posteriormente las muestras se impregnaron con una solución epoxica (Sikadur -200) para evitar fugas laterales del liquido aplicado en la prueba. Después de las 96 horas requeridas para el ensayo se tomo los datos de infiltración del agua en los cilindros.
---------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
**Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia**  
**Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido**

**Muestra 2**  
 Concreto prefisurado +aditivo Admix

Fecha	9/9/2016	Ubicación	Laboratorio ASOCRETO
-------	----------	-----------	----------------------

Equipos	
Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



	Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido. NTC 5653
	Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete. ASTM C642-13

### LABORATORIO DE CONCRETOS

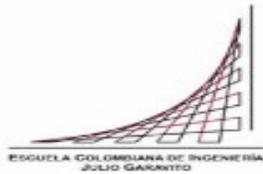
Temperatura °C	23	Humedad %	51
----------------	----	-----------	----

Muestra	Xipex 001			Xipex 002			Xipex 003		
Longitud del espécimen (mm)	85.30	85.23	85.00	91.13	88.62	89.43	75.00	75.30	75.25
Diámetro del espécimen (mm)	101.50	102.30	102.50	101.90	101.51	101.89	102.30	101.90	102.50
Volumen del Especimen cm3	697.37			729.83			617.16		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1513.00			1271.00			1272.00		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1607.00			1347.00			1368.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. (gr). 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización.	1608.00			1348.00			1370.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	889.00			745.00			758.00		

**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorción después de la inmersión	6.21%	5.98%	7.55%
Absorción después de la inmersión + hervido	6.28%	6.06%	7.70%
Densidad seca gr/cm3	2.10	2.11	2.08
Densidad después de la inmersión gr/cm3	2.24	2.23	2.24
Densidad después de la inmersión + hervido gr/cm3	2.24	2.24	2.24
Densidad aparente gr/cm3	2.42	2.42	2.47
Volumen de poros permeables (vacíos) cm3	13.21	12.77	16.01

Observaciones	Concreto con agregados de río, edad 28 días, el espécimen se sometió a un proceso de carga de 234 kg/cm2 (23 Mpa) para generar un prefisuramiento al material, e impregnación de aditivo impermeabilizante (Admix - 2%).
---------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

**Registro Permeabilidad  
del concreto al agua**

Muestra 3

Concreto prefisurado  
+aditivo Sika

Fecha

9/9/2016

Ubicación

Laboratorio ASOCRETO

**Equipos**

Cronometro	-
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra

Concreto contracción inducida y corto tiempo de curado

Descripción

Concreto con agregados de rio, edad 28 días, el espécimen se sometió a un proceso de carga de 234 kg/cm<sup>2</sup> (23 Mpa) para generar un prefisuramiento al material, e impregnación de aditivo impermeabilizante (Sika WT 200 - 2%).

Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C

26

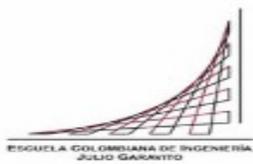
Humedad %

59

Muestra		Sika 001			Sika 002			Sika 003		
Longitud del espécimen (mm)		100.80			102.00			103.50		
Diámetro del espécimen (mm)		101.10			100.50			101.20		
Presión de agua - Mpa		0.50			0.50			0.50		
Inicio prueba a presión	Fecha	8/9/16			8/9/16			8/9/16		
	Hora	2:40 PM			2:40 PM			2:40 PM		
Culminación prueba a presión	Fecha	12/9/16			12/9/16			12/9/16		
	Hora	2:50 PM			2:55 PM			3:00 PM		
Tiempo de presión (Horas)		96.00			96.00			96.00		
Profundidad penetración de agua (mm)		40.70	37.10	40.10	93.50	59.40	85.20	65.90	38.00	55.00
Profundidad penetración de agua (mm)		39.30			79.37			52.97		

Observaciones

Los especímenes fueron elaborados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería, tuvieron un curado de 28 días. Luego en los laboratorio de Asocreto, se les realizo un corte a cada muestra con una sierra cortadora para concreto estableciendo las dimensiones requeridas en la prueba, posteriormente las muestras se impregnaron con una solución epoxica (Sikadur -200) para evitar fugas laterales del liquido aplicado en la prueba. Después de las 96 horas requeridas para el ensayo se tomo los datos de infiltración del agua en los cilindros.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
**Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia**  
**Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido**

**Muestra 3**  
 Concreto prefisurado +aditivo Sika

Fecha 9/9/2016

Ubicación Laboratorio ASOCRETO

Equipos	
Cronometro	-
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido. NTC 5653  
 Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete. ASTM C642-13

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C 28

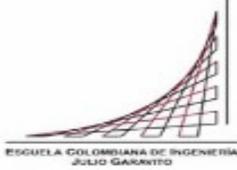
Humedad % 47

Muestra	Sika 001			Sika 002			Sika 003		
Longitud del espécimen (mm)	89.38	91.69	90.96	75.00	75.25	75.32	85.00	85.20	85.30
Diámetro del espécimen (mm)	102.20	101.79	101.50	101.00	101.87	101.65	102.35	101.95	101.75
Volumen del Especimen cm3	738.48			608.47			696.15		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1654.00			1595.00			1529.00		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1743.00			1674.00			1608.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. (gr). 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización.	1743.00			1674.00			1608.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	967.00			927.00			884.00		

**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorcion despues de la inmersion	5.38%	4.95%	5.17%
Absorcion despues de la inmersion + hervido	5.38%	4.95%	5.17%
Densidad seca gr/cm3	2.13	2.14	2.11
Densidad despues de la inmersion gr/cm3	2.25	2.24	2.22
Densidad despues de la inmersion + hervido gr/cm3	2.25	2.24	2.22
Densidad aparente gr/cm3	2.41	2.39	2.37
Volumen de poros permeables (vacios) cm3	11.47	10.58	10.91
	11.47	10.58	10.91

Observaciones Concreto con agregados de rio, edad 28 días, el espécimen se sometió a un proceso de carga de 234 kg/cm2 (23 Mpa) para generar un prefisuramiento al material, e impregnacion de aditivo impermeabilizante (Sika WT 200 - 2%).



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
**Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia**

Muestra 4

**Registro Permeabilidad  
 del concreto al agua**

Concreto sin adiciones.  
 Muestra Patron

Fecha 26/11/2016

Ubicación Laboratorio ASOCRETO

Equipos	
Cronometro	-
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra Concreto sin aditivos.  
 Descripción Cilindro de concreto con mezcla definida para el proyecto.

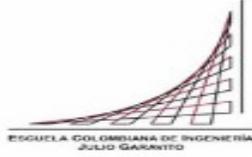
Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C Humedad % 50

Muestra		Cr 1			Cr 2			Cr 3		
Longitud del espécimen (mm)		96.32	96.10	96.32	96.70	96.32	97.10	99.43	99.57	99.40
Diámetro del espécimen (mm)		102.37	102.02	101.96	102.35	102.31	101.25	102.59	102.55	102.51
Presión de agua - Mpa		0.50			0.50			0.50		
Inicio prueba a presión	Fecha	9/11/16			9/11/16			9/11/16		
	Hora	7:00 AM			7:25 AM			7:30 AM		
Culminación prueba a presión	Fecha	12/11/16			12/11/16			12/11/16		
	Hora	7:00 AM			7:25 AM			7:30 AM		
Tiempo de presión (Horas)		96.00			96.00			96.00		
Profundidad penetración de agua (mm)		28.50	28.90	32.30	28.50	25.50	25.20	24.70	21.30	27.44
		29.90			26.40			24.48		

Observaciones Los especímenes fueron elaborados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería, tuvieron un curado de 28 días. Luego en los laboratorio de Asocreto, se les realizo un corte a cada muestra con una sierra cortadora para concreto estableciendo las dimensiones requeridas en la prueba, posteriormente las muestras se impregnaron con una solución epoxica (Sikadur - 200) para evitar fugas laterales del liquido aplicado en la prueba. Después de las 96 horas requeridas para el ensayo se tomo los datos de infiltración del agua en los cilindros.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
**Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia**  
**Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido**

**Muestra 4**  
 Concreto sin adiciones.  
 Muestra Patron

Fecha	26/11/2016	Ubicación	Laboratorio GEOTECNIA -ECI
-------	------------	-----------	----------------------------

Equipos	
Cronometro	-
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



NTC 5653	Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido.
ASTM C642-13	Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete.

### LABORATORIO DE CONCRETOS

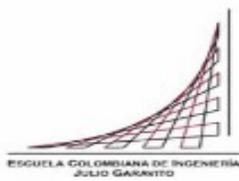
Temperatura °C	25	Humedad %	45
----------------	----	-----------	----

Muestra	Cr1			Cr2			Cr3		
Longitud del espécimen (mm)	93.67	94.00	93.50	95.01	95.70	94.75	95.65	95.35	95.54
Diámetro del espécimen (mm)	101.20	101.10	101.50	101.36	102.10	101.50	101.36	102.10	101.25
Volumen del Espécimen cm3	754.87			772.25			773.90		
Peso Inicial de la muestra	1620.50			1652.70			1654.60		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1559.00			1581.00			1568.00		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1665.00			1695.00			1695.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización. (gr)	1660.00			1695.00			1695.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	920.00			935.00			935.00		

**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorción después de la inmersión	6.80%	7.21%	8.10%
Absorción después de la inmersión + hervido	6.48%	7.21%	8.10%
Densidad seca gr/cm3	2.11	2.08	2.06
Densidad después de la inmersión gr/cm3	2.25	2.23	2.23
Densidad después de la inmersión + hervido gr/cm3	2.24	2.23	2.23
Densidad aparente gr/cm3	2.44	2.45	2.48
Volumen de poros permeables (vacíos) cm3	13.65	15.00	16.71

Observaciones	Especimen de concreto sin aditivos.
---------------	-------------------------------------



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
**Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia**

**Muestra 5**

**Registro Permeabilidad  
 del concreto al agua**

Concreto con adiciones de metacaolín

Fecha	26/11/2016	Ubicación	Laboratorio ASOCRETO
-------	------------	-----------	----------------------

Equipos	
Cronometro	-
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra	Espécimen cilíndrico de concreto con Aditivos
Descripción	Concreto con mezcla de minerales de metacaolín en polvo, en una concentración del 2% frente al contenido de cemento, edad de 28 días.

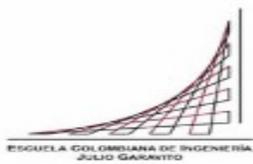
Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C	23	Humedad %	48
----------------	----	-----------	----

Muestra		Mk 001	Mk 002	Mk 003
Longitud del espécimen (mm)		99.30	101.20	100.00
Diámetro del espécimen (mm)		103.40	102.64	103.20
Presión de agua - Mpa		0.50	0.50	0.50
Inicio prueba a presión	Fecha	31/10/2016	31/10/2016	31/10/2016
	Hora	10:00 AM	10:10 AM	10:20 AM
Culminación prueba a presión	Fecha	4/11/16	4/11/16	4/11/16
	Hora	11:00 AM	11:00 AM	11:20 AM
Tiempo de presión (Horas)		97.00	97.00	97.00
Profundidad penetración de agua (mm)		27.58   27.85   26.85	27.58   27.85   26.85	24.16   19.61   29.67
Profundidad penetración de agua (mm)		27.43	27.43	24.48

Observaciones	Los especímenes fueron elaborados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería, tuvieron un curado de 28 días. Luego en los laboratorio de Asocreto, se les realizo un corte a cada muestra con una sierra cortadora para concreto estableciendo las dimensiones requeridas en la prueba, posteriormente las muestras se impregnaron con una solución epoxica (Sikadur -200) para evitar fugas laterales del liquido aplicado en la prueba. Después de las 96 horas requeridas para el ensayo se tomo los datos de infiltración del agua en los cilindros.
---------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
**Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia**  
**Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido**

**Muestra 5**  
 Concreto con adiciones de metacaolín

Fecha 26/11/2016

Ubicación Laboratorio GEOTECNIA ECI

Equipos	
Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



NTC 5653  
 ASTM C642-13

Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido.  
 Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C 25

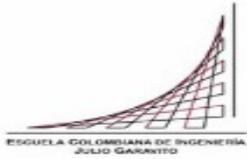
Humedad % 53

Muestra	Mk1			Mk2			Mk3		
Longitud del espécimen (mm)	99.21	98.51	99.27	95.04	95.60	94.99	99.48	99.75	99.59
Diámetro del espécimen (mm)	101.38	101.09	100.72	100.46	100.78	101.27	100.04	100.23	100.31
Volumen del Especimen cm <sup>3</sup>	794.14			760.34			785.34		
Peso Inicial de la muestra	1728.00			1676.00			1722.00		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1656.00			1579.00			1635.00		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1746.00			1687.00			1743.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. (gr). 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización.	1750.00			1692.00			1747.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	976.00			945.00			974.00		

**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorción después de la inmersión	5.43%	6.84%	6.61%
Absorción después de la inmersión + hervido	5.68%	7.16%	6.85%
Densidad seca gr/cm <sup>3</sup>	2.14	2.11	2.12
Densidad después de la inmersión gr/cm <sup>3</sup>	2.26	2.26	2.25
Densidad después de la inmersión + hervido gr/cm <sup>3</sup>	2.26	2.27	2.26
Densidad aparente gr/cm <sup>3</sup>	2.44	2.49	2.47
Volumen de poros permeables (vacíos) cm <sup>3</sup>	12.14	15.13	14.49
	12.14	15.13	14.49

Observaciones Concreto con mezcla de minerales de metacaolín en polvo, en una concentración del 2% frente al contenido de cemento, edad de 28 días.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Muestra 6

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Concreto con adiciones de metacaolín (56 días)

### Registro Permeabilidad del concreto al agua

#### Equipos

Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra

Especímenes de concreto con aditivo Metacaolín 650 y 750

Descripción

Mezcla de concreto con adiciones de metacaolín, en relación A/C=0.45, con edad entre 40 a 60 días.

Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

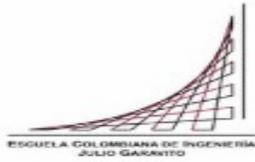
#### LABORATORIO DE CONCRETOS

Temperatura °C	28	Humedad %	45
----------------	----	-----------	----

Muestra	Mk650			Mk750 - 1			Mk750-2			
Longitud del espécimen (mm)	104.58	105.73	105.34	105.76	105.77	106.32	101.91	102.60	102.57	
Diámetro del espécimen (mm)	100.78	100.72	100.67	100.68	100.95	100.63	100.75	101.13	101.21	
Presión de agua - Mpa	0.50			0.50			0.50			
Inicio prueba a presión	Fecha	28/04/17			28/04/17			28/04/17		
	Hora	1:00 PM			1:05 PM			1:10 PM		
Culminación prueba a presión	Fecha	28/04/17			28/04/17			28/04/17		
	Hora	1:00 PM			1:05 PM			1:10 PM		
Tiempo de presión (Horas)	96.00			96.00			96.00			
Profundidad penetración de agua (mm)	1.00	2.00	1.00	10.10	6.22	5.40	5.00	2.00	1.00	
	1.33			7.24			2.67			

Observaciones

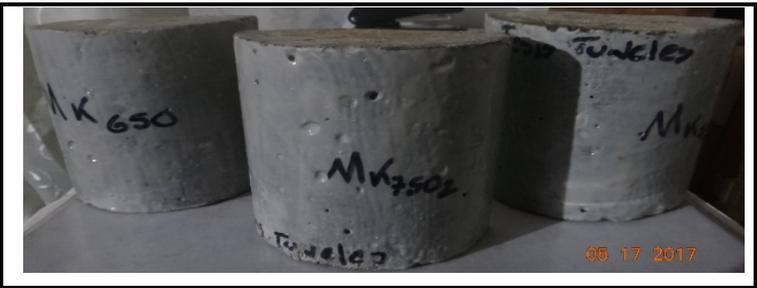
Los especímenes fueron elaborados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería, tuvieron un curado de 40 días. Luego en los laboratorio de Asocreto, se les realizo un corte a cada muestra con una sierra cortadora para concreto estableciendo las dimensiones requeridas en la prueba, posteriormente las muestras se impregnaron con una solución epoxica (Sikadur -200) para evitar fugas laterales del liquido aplicado en la prueba. Después de las 96 horas requeridas para el ensayo se tomo los datos de infiltración del agua en los cilindros.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito	Muestra 6
Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia	Concreto con adiciones de metacaolín (56 días)
<b>Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido</b>	

Fecha	4/25/2017	Laboratorio ECI
-------	-----------	-----------------

Equipos	
Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



NTC 5653	Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido.
ASTM C642-13	Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

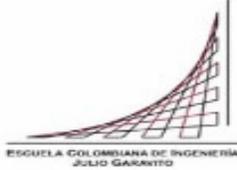
Temperatura °C	25	Humedad %	53
----------------	----	-----------	----

Muestra	Mk 650			Mk 750-1			Mk 750-2		
Longitud del espécimen (mm)	86.69	85.85	86.56	89.99	88.23	88.83	88.47	88.18	88.08
Diámetro del espécimen (mm)	99.89	100.61	99.98	100.33	100.21	100.65	100.63	101.05	100.69
Volumen del Especimen cm3	680.49			704.69			704.06		
Peso Inicial de la muestra	1550.00			1571.30			1556.70		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1475.00			1466.00			1455.00		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1575.00			1567.00			1560.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. (gr). 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización.	1575.00			1571.00			1554.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	890.00			874.00			862.00		

**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorción después de la inmersión	6.78%	6.89%	7.22%
Absorción después de la inmersión + hervido	6.78%	7.16%	6.80%
Densidad seca gr/cm3	2.15	2.10	2.10
Densidad después de la inmersión gr/cm3	2.30	2.25	2.25
Densidad después de la inmersión + hervido gr/cm3	2.30	2.25	2.25
Densidad aparente gr/cm3	2.52	2.48	2.45
Volumen de poros permeables (vacíos) cm3	14.60	15.06	14.31
	14.60	15.06	14.31

Observaciones	Mezcla de concreto con adiciones de metacaolín, en relación A/C=0.45, con edad entre 40 a 60 días.
---------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

**Registro Permeabilidad del concreto al agua**

Muestra 7

Concreto con aditivo xipex.

Fecha

16/11/2016

Ubicación

Laboratorio ASOCRETO

**Equipos**

Cronometro	-
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra

Especimen cilíndrico de concreto con Aditivos, mezclado en el agua

Descripción

Concreto con aditivo impermeabilizante (Admix 2%), agregados de rio y condición de mezcla definida en el proyecto

Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C

21

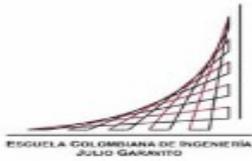
Humedad %

35

Muestra		Xpw1			Xpw2			Xpw3		
Longitud del espécimen (mm)		110.55	111.26	109.84	120.80	120.75	121.41	117.43	116.82	116.31
Diámetro del espécimen (mm)		101.85	102.02	101.95	101.92	101.93	101.90	101.13	100.63	101.10
Presión de agua - Mpa		0.50			0.50			0.50		
Inicio prueba a presión	Fecha	16/11/16			16/11/16			16/11/16		
	Hora	3:00 PM			3:10 PM			3:15 PM		
Culminación prueba a presión	Fecha	19/11/16			19/11/16			19/11/16		
	Hora	3:00 PM			3:10 PM			3:15 PM		
Tiempo de presión (Horas)		96.00			96.00			96.00		
Profundidad penetración de agua (mm)		9.30	10.20	9.80	9.50	8.20	10.50	7.74	11.20	8.10
Profundidad penetración de agua (mm)		9.77			9.40			9.01		

Observaciones

Los especímenes fueron elaborados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería, tuvieron un curado de 28 días. Aserrados e impregnados con soluciones epoxica para el ensayos de permeabilidad y porosidad en las instalaciones de ASOCRETO.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

**Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido**

Muestra 7

Concreto con aditivo xipex.

Fecha 16/11/2016

Ubicación Laboratorio GEOTECNIA - ECI

**Equipos - Herramientas**

Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



NTC 5653

Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido.

ASTM C642-13

Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C 25

Humedad % 51

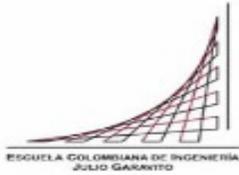
Muestra	Xw1			Xw2			Xw3		
Longitud del espécimen (mm)	72.07	73.35	73.50	72.07	73.35	73.50	100.97	101.07	100.46
Diámetro del espécimen (mm)	101.99	102.12	102.17	101.99	102.12	102.17	75.35	75.20	74.35
Volumen del Espécimen cm3	597.38			597.38			445.07		
Peso Inicial de la muestra	1275.00			1235.00			1315.00		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1230.00			1235.00			1225.00		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1325.00			1325.00			1325.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. (gr). 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización.	1325.00			1325.00			1325.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	737.50			740.00			735.00		

**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorción después de la inmersión	7.72%	7.29%	8.16%
Absorción después de la inmersión + hervido	7.72%	7.29%	8.16%
Densidad seca gr/cm3	2.09	2.11	2.08
Densidad después de la inmersión gr/cm3	2.26	2.26	2.25
Densidad después de la inmersión + hervido gr/cm3	2.26	2.26	2.25
Densidad aparente gr/cm3	2.50	2.49	2.50
Volumen de poros permeables (vacíos) cm3	16.17	15.38	16.95

Observaciones

Concreto con aditivo impermeabilizante (Admix 2%), agregados de rio y condición de mezcla definida en el proyecto



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

**Registro Permeabilidad  
del concreto al agua**

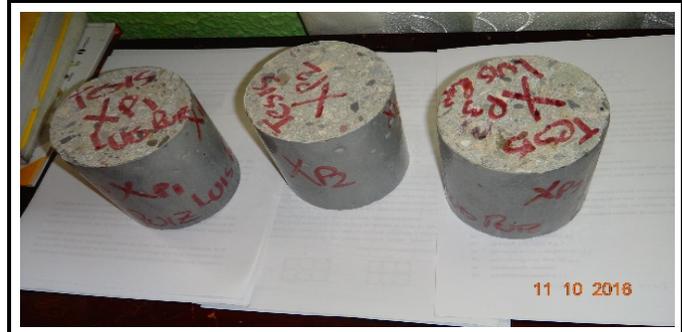
Muestra 8

Concreto con aditivo  
xipex.

Fecha 11/10/2016

Ubicación Laboratorio ASOCRETO.

Equipos	
Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra  
Descripción

Especimen cilíndrico de concreto con Aditivos, mezclado en el cemento  
Concreto con aditivo impermeabilizante (Admix 2%), agregados de rio y condición de mezcla para obras de ingeniería, cemento industrial de alta resistencia.

Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

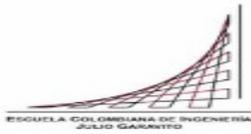
Temperatura °C 23

Humedad % 53

Muestra		Xpp1			Xpp2			Xpp3		
Longitud del espécimen (mm)		113.30	112.58	113.11	109.64	109.68	110.19	109.13	109.05	108.61
Diámetro del espécimen (mm)		101.84	102.48	103.15	101.96	102.49	101.62	101.80	101.65	102.13
Presión de agua - Mpa		0.50			0.50			0.50		
Inicio prueba a presión	Fecha	11/24/16			11/24/16			11/24/16		
	Hora	7:00 AM			7:15 AM			7:20 AM		
Culminación prueba a presión	Fecha	11/28/16			11/28/16			11/28/16		
	Hora	8:00 AM			8:15 AM			8:20 AM		
Tiempo de presión (Horas)		96.00			96.00			96.00		
Profundidad penetración de agua (mm)		8.30	10.60	10.30	7.50	12.10	11.10	12.90	6.40	9.30
Profundidad penetración de agua (mm)		9.73			10.23			9.53		

Observaciones

Los especímenes fueron elaborados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería, tuvieron un curado de 28 días. Luego en los laboratorio de Asocreto, se les realizo un corte a cada muestra con una sierra cortadora para concreto estableciendo las dimensiones requeridas en la prueba, posteriormente las muestras se impregnaron con una solución epoxica (Sikadur -200) para evitar fugas laterales del liquido aplicado en la prueba. Después de las 96 horas requeridas para el ensayo se tomo los datos de infiltración del agua en los cilindros.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
**Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia**  
**Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido**

**Muestra 8**

Concreto con aditivo xipex.

Fecha 11/10/2016

Ubicación Laboratorio GEOTECNIA - ECI

**Equipos - Herramientas**

Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



NTC 5653

Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido.

ASTM C642-13

Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C 25

Humedad % 51

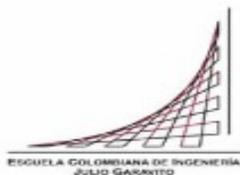
Muestra	Xp1			Xp2			Xp3		
Longitud del espécimen (mm)	72.07	73.35	73.50	102.06	101.97	101.77	102.19	101.49	101.81
Diámetro del espécimen (mm)	101.99	102.12	102.17	84.21	83.68	82.50	79.80	79.04	78.51
Volumen del Especimen cm3	597.38			557.70			500.61		
Peso Inicial de la muestra	1442.50			1480.00			1405.00		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1362.50			1400.00			1325.00		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1452.50			1490.00			1415.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. (gr). 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización.	1452.50			1490.00			1415.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	800.00			820.00			780.00		

**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorción después de la inmersión	6.61%	6.43%	6.79%
Absorción después de la inmersión + hervido	6.61%	6.43%	6.79%
Densidad seca gr/cm3	2.09	2.09	2.09
Densidad después de la inmersión gr/cm3	2.23	2.22	2.23
Densidad después de la inmersión + hervido gr/cm3	2.23	2.22	2.23
Densidad aparente gr/cm3	2.42	2.41	2.43
Volumen de poros permeables (vacíos) cm3	13.79	13.43	14.17

Observaciones

Concreto con aditivo impermeabilizante (Admix 2%), agregados de rio y condición de mezcla para obras de ingeniería, cemento industrial de alta resistencia.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
 Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Muestra 9

**Registro Permeabilidad  
 del concreto al agua**

Concreto con aditivo  
 Sika WT200

Fecha 9/9/2016

Ubicación Laboratorio ASOCRETO

**Equipos**

Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra

Concreto común para túneles

Descripción

Cilindro de concreto con mezcla y granulometría ajustada para el proyecto, con aditivo Sika WT200 en concentración del 2%.

Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C

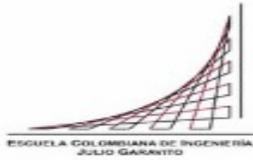
Humedad %

50

Muestra		Sk 5			Sk 7			Sk 8		
Longitud del espécimen (mm)		111.55	111.74	111.54	99.64	99.26	98.70	100.13	99.92	100.48
Diámetro del espécimen (mm)		102.59	103.06	103.67	102.61	102.91	102.34	103.19	103.04	102.33
Presión de agua - Mpa		0.50			0.50			0.50		
Inicio prueba a presión	Fecha	2/12/16			2/12/16			2/12/16		
	Hora	2:00 PM			2:10 PM			2:15 PM		
Culminación prueba a presión	Fecha	5/12/16			5/12/16			5/12/16		
	Hora	3:00 PM			3:10 PM			3:15 PM		
Tiempo de presión (Horas)		96.00			96.00			96.00		
Profundidad penetración de agua (mm)		8.10	9.30	8.30	11.80	10.40	11.10	14.20	11.40	12.60
		8.57			11.10			12.73		

Observaciones

Los especímenes fueron elaborados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería, tuvieron un curado de 28 días. Luego en los laboratorio de Asocreto, se les realizo un corte a cada muestra con una sierra cortadora para concreto estableciendo las dimensiones requeridas en la prueba, posteriormente las muestras se impregnaron con una solución epoxica (Sikadur -200) para evitar fugas laterales del liquido aplicado en la prueba. Después de las 96 horas requeridas para el ensayo se tomo los datos de infiltración del agua en los cilindros.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

**Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido**

Muestra 9

Concreto con aditivo Sika WT200

Fecha

9/9/2016

Ubicación

Laboratorio GEOTECNIA ECI

**Equipos**

Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



NTC 5653

Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido.

ASTM C642-13

Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C

21

Humedad %

49

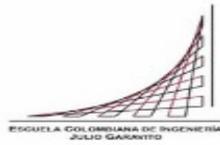
Muestra	Sk8			Sk9			Sk10		
Longitud del espécimen (mm)	96.13	94.72	94.94	82.45	83.32	83.90	89.29	89.02	89.42
Diámetro del espécimen (mm)	102.75	102.59	102.18	102.07	101.32	101.81	102.41	101.96	102.00
Volumen del Espécimen cm <sup>3</sup>	786.18			676.49			731.33		
Peso Inicial de la muestra	1710.00			1486.00			1598.00		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1588.00			1388.00			1488.00		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1706.00			1486.00			1596.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. (gr). 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización.	1702.00			1482.00			1592.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	937.00			820.00			878.50		

**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorción después de la inmersión	7.43%	7.06%	7.26%
Absorción después de la inmersión + hervido	7.18%	6.77%	6.99%
Densidad seca gr/cm <sup>3</sup>	2.08	2.10	2.09
Densidad después de la inmersión gr/cm <sup>3</sup>	2.23	2.24	2.24
Densidad después de la inmersión + hervido gr/cm <sup>3</sup>	2.22	2.24	2.23
Densidad aparente gr/cm <sup>3</sup>	2.44	2.44	2.44
Volumen de poros permeables (vacíos) cm <sup>3</sup>	14.90	14.20	14.58
	14.90	14.20	14.58

Observaciones

Cilindro de concreto con mezcla y granulometría ajustada para el proyecto, con aditivo Sika WT200 en concentración del 2%.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

**Registro Permeabilidad  
del concreto al agua**

Muestra 10

Concreto fracturado con  
tratamiento

**Equipos**

Cronometro	-
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra

Especímenes de concreto fallado y fisurado, con fibras sintéticas y metálicas.

Descripción

Mezclas de concreto con fibras metálicas y sintéticas, A/C=0.45, con fracturas expuestas en la superficie de la muestra, fueron tratados con soluciones de Xipex concentrando en 6 partes de agua y 2 de polvo, durante 2 semanas. Y soluciones de 90% de agua - 10% de Sika WT200, por un periodo de cuatro semanas

Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

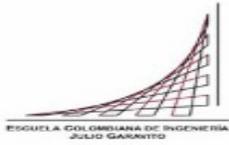
**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C	23	Humedad %	48
----------------	----	-----------	----

Muestra		F1			F2			F3		
Longitud del espécimen (mm)		95.70	94.94	94.08	90.54	91.26	90.46	105.61	104.27	105.32
Diámetro del espécimen (mm)		101.95	102.00	101.91	106.61	103.38	102.73	102.26	102.33	102.18
Presión de agua - Mpa		0.50			0.50			0.50		
Inicio prueba a presión	Fecha	3/4/17			3/4/17			3/4/17		
	Hora	9:00 AM			9:05 AM			9:15 AM		
Culminación prueba a presión	Fecha	7/4/17			7/4/17			7/4/17		
	Hora	9:00 AM			9:05 AM			9:15 AM		
Tiempo de presión (Horas)		96.00			96.00			96.00		
Profundidad penetración de agua (mm)		18.50	20.80	18.00	17.00	18.50	16.00	19.00	17.00	18.00
		19.10			17.17			18.00		

Observaciones

Los especímenes fueron elaborados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería, tuvieron un curado de 28 días. Luego en los laboratorio de Asocreto, se les realizo un corte a cada muestra con una sierra cortadora para concreto estableciendo las dimensiones requeridas en la prueba, posteriormente las muestras se impregnaron con una solución epoxica (Sikadur -200) para evitar fugas laterales del liquido aplicado en la prueba. Después de las 96 horas requeridas para el ensayo se tomo los datos de infiltración del agua en los cilindros.



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Muestra 10

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

**Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido**

Concreto fracturado con tratamiento

Fecha

6/3/2017

Ubicación

Laboratorio Geotecnia ECI

**Equipos**

Cronometro	-
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



NTC 5653

Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido.

ASTM C642-13

Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C

23

Humedad %

51

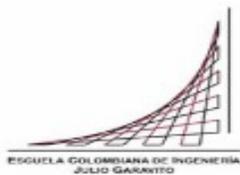
Muestra	F1			F2			F3		
Longitud del espécimen (mm)	84.28	83.78	83.79	95.70	94.94	94.08	90.54	91.26	90.46
Diámetro del espécimen (mm)	101.76	101.57	100.93	101.95	102.00	101.91	106.61	103.38	102.73
Volumen del Espécimen cm3	678.20			774.80			774.50		
Peso Inicial de la muestra	1484.00			1708.00			1634.00		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1379.40			1572.90			1492.40		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1486.00			1707.00			1631.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. (gr). 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización.	1499.00			1713.00			1645.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	834.00			952.00			911.00		

**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorción después de la inmersión	7.73%	8.53%	9.29%
Absorción después de la inmersión + hervido	8.67%	8.91%	10.23%
Densidad seca gr/cm3	2.07	2.07	2.03
Densidad después de la inmersión gr/cm3	2.23	2.24	2.22
Densidad después de la inmersión + hervido gr/cm3	2.25	2.25	2.24
Densidad aparente gr/cm3	2.53	2.53	2.57
Volumen de poros permeables (vacíos) cm3	17.98	18.41	20.79
	17.98	18.41	20.79

Observaciones

Mezclas de concreto con fibras metalicas y sinteticas, A/C=0.45, con fracturas expuestas en la superficie de la muestra, fueron tratados con soluciones de Xipex concentrando en 6 partes de agua y 2 de polvo, durante 2 semanas. Y soluciones de 90% de agua - 10% de Sika WT200, por un periodo de cuatro semanas



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

**Registro Permeabilidad del concreto al agua**

Muestra 11

Concreto con fibras

Fecha

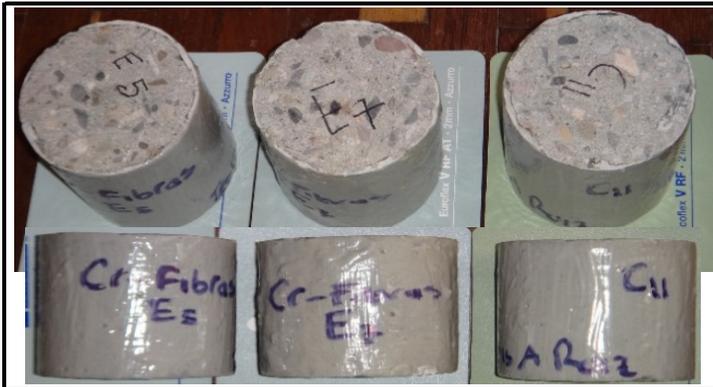
15/1/2017

Ubicación

Laboratorio ASOCRETO

**Equipos**

Cronometro	-
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



Muestra

Concreto con fibras metalicas y sinteticas

Descripción

Mezcla de concreto con fibras metalicas y sinteticas tipo DRAMIX - SIKA, A/C = 0.45, energia J = 1000..

Ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua NTC 4483.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C

23

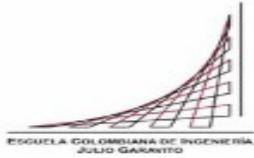
Humedad %

48

Muestra		C11			E7			E5		
Longitud del espécimen (mm)		107.88	106.07	107.10	104.44	105.60	105.65	110.34	108.61	109.97
Diámetro del espécimen (mm)		103.22	102.74	103.90	102.50	103.49	103.34	102.54	103.18	103.41
Presión de agua - Mpa		0.50			0.50			0.50		
Inicio prueba a presión	Fecha	17-02-20			17-02-20			17-02-20		
	Hora	9:25 AM			9:10 AM			9:00 AM		
Culminación prueba a presión	Fecha	17-02-24			17-02-24			17-02-24		
	Hora	1:30 PM			1:15 PM			1:00 PM		
Tiempo de presión (Horas)		96.00			96.00			96.00		
Profundidad penetración de agua (mm)		7.84	6.92	7.30	9.54	8.12	11.52	5.32	4.30	5.26
		7.35			9.73			4.96		

Observaciones

Las fibras tuvieron dosificaciones como:  
 • C11 (Fib Sintética 0.8 Kg/m3, Fib Metálica 18 Kg/m3).  
 • E5 (Fib Sintética 0.5 Kg/m3, fib Metálica 22 Kg/m3).  
 • E7 (Fib Sintética 5 Kg/m3, fib Metálica 33 Kg/m3)



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

**Gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido**

Muestra 11

Concreto con fibras

Fecha

18/1/2017

Ubicación

Laboratorio GEOTECNIA - ECI

**Equipos**

Cronometro	Casio F91W
Pie de rey	Ubermann
Cinta métrica	Ubermann
Balanza Digital	-
Cortadora de Concreto	DeWalt
Maquina de compresión	-



NTC 5653

Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en concreto endurecido.

ASTM C642-13

Estándar test método, absorción, and voids in hardened concrete.

**LABORATORIO DE CONCRETOS**

Temperatura °C

23

Humedad %

51

Muestra	C11			E7			E5		
Longitud del espécimen (mm)	88.19	88.50	88.20	89.81	89.91	89.18	87.07	88.25	85.92
Diámetro del espécimen (mm)	102.13	101.90	102.31	101.22	101.55	101.78	101.50	101.54	101.63
Volumen del Espécimen cm <sup>3</sup>	723.10			725.49			705.38		
Peso Inicial de la muestra	1590.50			1587.10			1532.80		
A= Masa muestra seca al horno (gr)	1502.80			1517.00			1450.00		
B= Masa muestra saturada y superficialmente seca después de inmersión, 48 horas. (gr)	1601.00			1618.00			1562.00		
C= Masa muestra sss después de hervir. (gr). 5 Horas de ebullición + 14 horas de estabilización.	1601.00			1624.10			1563.00		
D= Masa muestra sumergida en el agua después de inmersión y hervido (gr).	886.00			904.50			872.00		

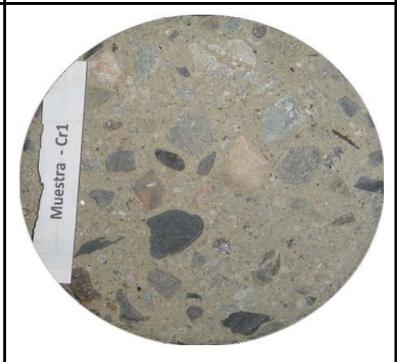
**Nota: Para un concreto de peso normal la muestra es de aproximadamente 800 gr**

Absorción después de la inmersión	6.53%	6.66%	7.72%
Absorción después de la inmersión + hervido	6.53%	7.06%	7.79%
Densidad seca gr/cm <sup>3</sup>	2.10	2.11	2.10
Densidad después de la inmersión gr/cm <sup>3</sup>	2.24	2.25	2.26
Densidad después de la inmersión + hervido gr/cm <sup>3</sup>	2.24	2.26	2.26
Densidad aparente gr/cm <sup>3</sup>	2.44	2.48	2.51
Volumen de poros permeables (vacíos) cm <sup>3</sup>	13.73	14.88	16.35

Observaciones

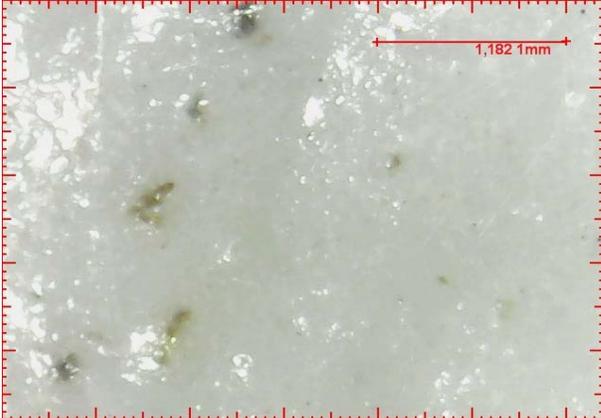
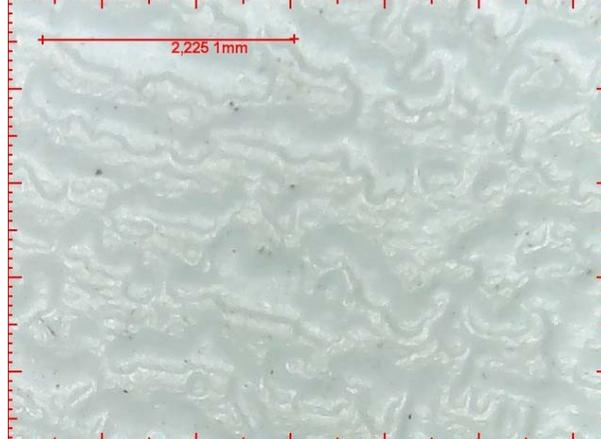
Mezcla de concreto con fibras metalicas y sinteticas tipo DRAMIX - SIKA, A/C = 0.45, energia J = 1000..

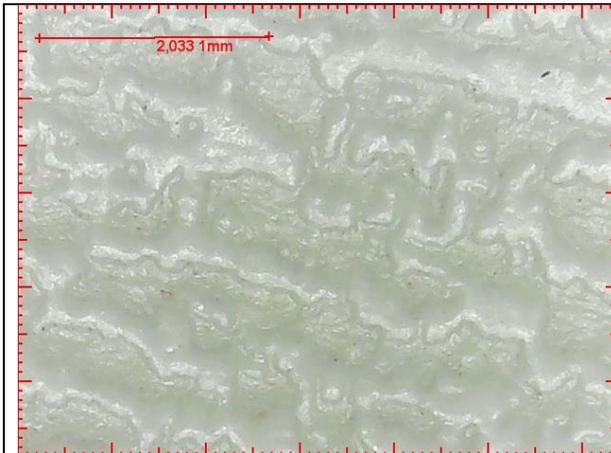
Muestras de Concreto con Adiciones

Prefisurado	Muestra Patron	Muestras de Concreto con aditivos Xipex		Sika WT200	Metacaolin 28 dias	Metacaolin 56 dias	Concreto con Fibras	Fibras y Tratamiento aditivos
 <p>Muestra - Prefisurado 2</p>	 <p>Muestra - Cr1</p>	 <p>Muestra - Xpw3</p>	 <p>Muestra - Xpp2</p>	 <p>Muestra - Sk1</p>	 <p>Muestra - Mk3</p>			
 <p>Muestra - Prefisurado 3</p>	 <p>Muestra - Cr1</p>	 <p>Muestra - Xpw2</p>	 <p>Muestra - Xpp1</p>	 <p>Muestra - Sk3</p>	 <p>Muestra - Mk2</p>			
 <p>Muestra - Prefisurado 2</p>	 <p>Muestra - Cr3</p>	 <p>Muestra - Xpw1</p>	 <p>Muestra - Xpp1</p>	 <p>Muestra - Sk3</p>	 <p>Muestra - Mk3</p>			

PROCESO DE TRATAMIENTO

ID	ANTES		TRATAMIENTO - 6 SEMANAS	DESPUES
E1				
E4				
C5				

Tipo	Características
	<p>Ampliación de Material Epóxicos para revestimientos de muros en concreto.</p>
	<p>Ampliación de Material impermeable sintético cubriendo membrana de polímero con grosor de la capa 2mm.</p>
	<p>Ampliación de Material impermeable sintético cubriendo membrana de polímero con grosor de la capa 2mm.</p>
	<p>Ampliación de Material impermeable sintético cubriendo membrana de polímero con grosor de la capa 2mm.</p>



Ampliación de Material impermeable sintético cubriendo membrana de polímero con grosor de la capa 2mm.



Ampliación de Fibras metálicas en la mezcla de concreto con A/C 0.45



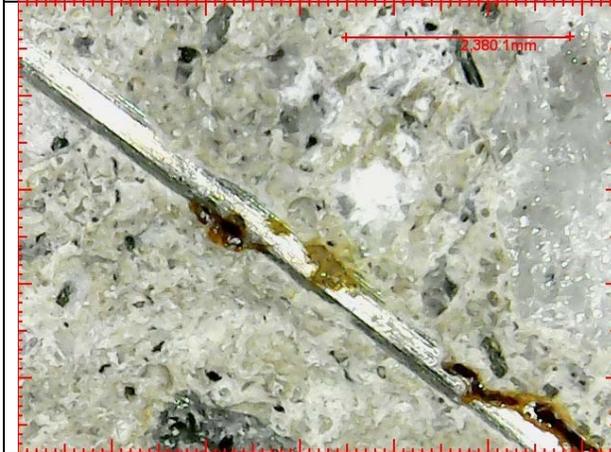
Ampliación de Fibras metálicas y sintéticas en la mezcla de concreto con A/C 0.45



Ampliación de Fibras metálicas en la mezcla de concreto con A/C 0.45



Ampliación de Fibras sintética en la mezcla de concreto con A/C 0.45



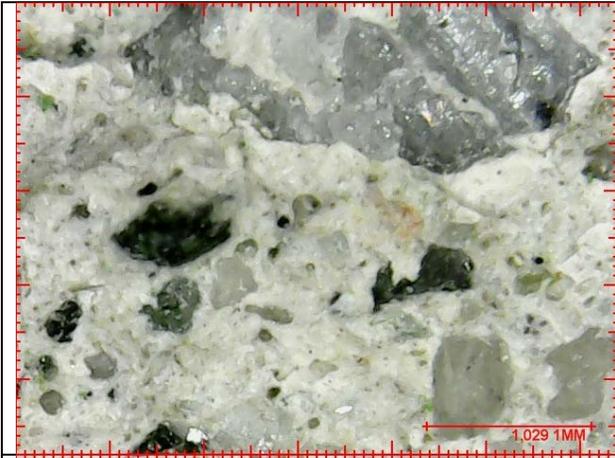
Ampliación de Fibras metálicas en la mezcla de concreto con A/C 0.45



Ampliación de Mezcla de concreto y mineral de Metacaolín.



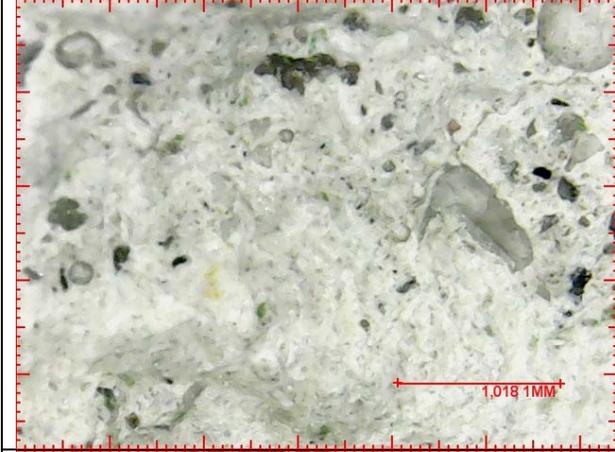
Ampliación de Mezcla de concreto y mineral de metacaolín.



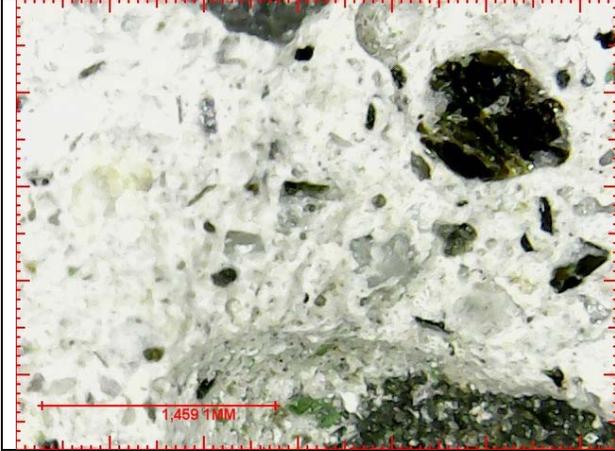
Ampliación de Concreto con procesos de prefisuración inducida.



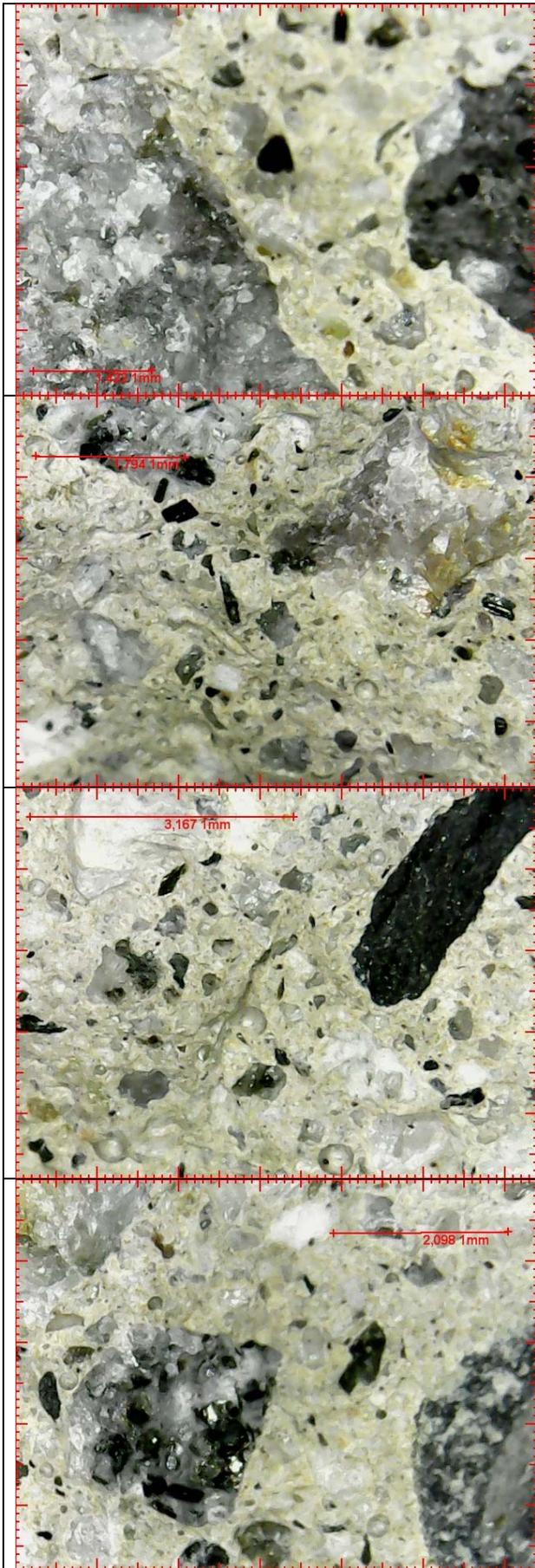
Ampliación de Concreto con procesos de prefisuración inducida.



Ampliación de Concreto con procesos de prefisuración inducida.



Ampliación de Concreto con procesos de prefisuración inducida.



Ampliación de Concreto con mezclas de Xipex concentrado.

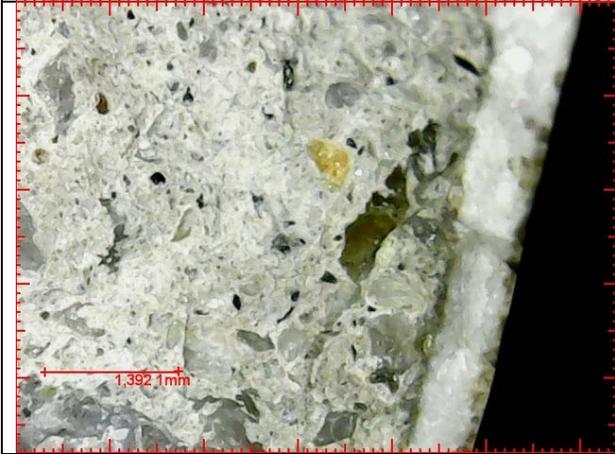
Ampliación de Concreto con mezclas de Xipex concentrado.

Ampliación de Concreto con mezclas de Xipex concentrado.

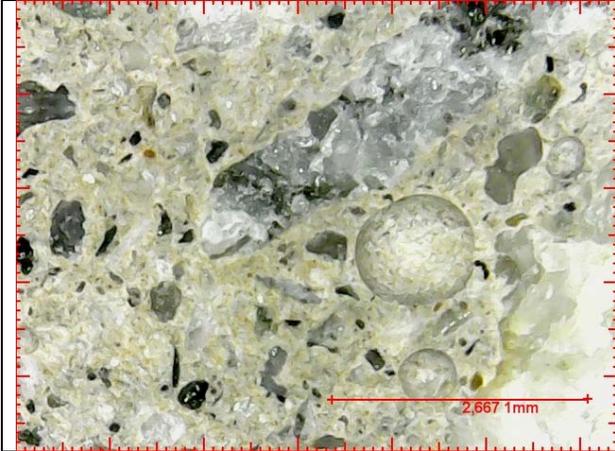
Ampliación de Concreto con mezclas de aditivos Sika.



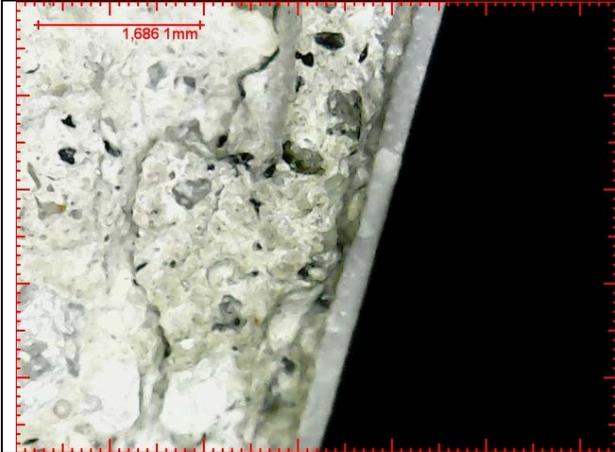
Ampliación de Concreto con mezclas de aditivos Sika.



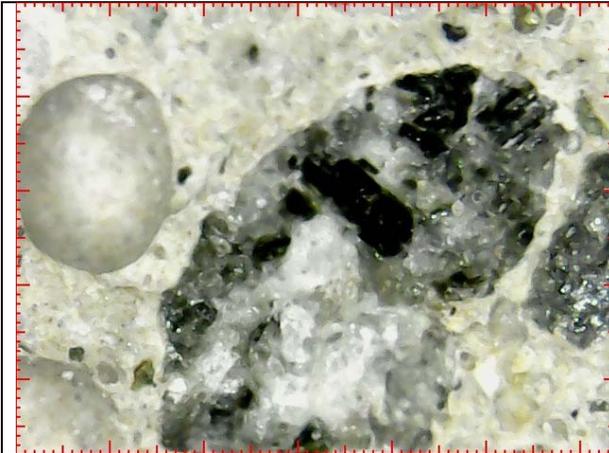
Ampliación de Concreto con mezclas de aditivos Sika.



Ampliación de Concreto con mezclas de aditivos Sika.



Ampliación de Fisuración expuesta del concreto.



Ampliación de Mezcla de Metacaolín en el concreto.



Ampliación de Burbuja de aire en el concreto.



Ampliación de Agregados de material y cristales de minerales en la mezcla de concreto.

**Fichas físico químicas y  
características de los  
aditivos utilizados**

## Sika® WT-200 P

Aditivo Impermeabilizante por Cristalización para Hormigón.

### Descripción del Producto

Sika® WT-200 P es un aditivo combinado resistente a la penetración de agua e impermeabilizante por cristalización, que se utiliza para reducir la permeabilidad del hormigón y además tiene la capacidad de sellar fisuras.

### Usos

Sika® WT-200 P ha sido formulado específicamente para producir hormigón impermeable de alta calidad. Sika® WT-200 P forma parte del sistema Sika® Watertight Concrete.

Sika® WT-200 P puede ser utilizado en cualquier estructura impermeable que se encuentre bajo/ en / sobre tierra, tales como:

- Subterráneos
- Estacionamientos
- Locales /plantas de servicio
- Túneles
- Piscinas
- Estanques de agua
- Presas
- Estructuras de tratamiento de aguas servidas
- Instalaciones comerciales bajo tierra (malls, estaciones de transporte, etc.)

### Características / Ventajas

Sika® WT-200 P consiste en una mezcla de cementos, amino alcoholes y fillers. Estos materiales activos forman materiales insolubles a través de la estructura de poros y capilares del hormigón y sellan el hormigón permanentemente contra la penetración de agua y otros líquidos. Adicionalmente la fórmula especial y los ingredientes de Sika® WT-200 P promueven las propiedades de auto-sellado del hormigón y mejoran su habilidad para sellar fisuras.

Sika® WT-200 P tiene las siguientes características y beneficios:

- Reduce la penetración de agua bajo presión.
- Reduce la absorción de agua.
- Realiza las propiedades de auto-sellado del hormigón.
- Mejora la resistencia al ataque químico.
- Reduce la transmisión de vapor.

### Normas / Aprobaciones

Cumple los requerimientos de EN 934-2, Tabla 9

### Diseño de la mezcla de hormigón

El diseño de la mezcla depende de los requerimientos específicos y/o normas locales para sistemas de hormigón impermeable.

Siempre es recomendable realizar pruebas de laboratorio para evaluar y confirmar el ajuste real de agua y el tipo de consistencia.

## Datos del Producto

Forma	Polvo
Apariencia / Color	Polvo gris
Presentación	Saco de 18 Kg.
Almacenamiento / Vencimiento	18 meses desde la fecha de producción si se encuentra en su envase original sellado y sin daño, protegido de la humedad a temperaturas entre +5°C y +30°C. Evitar la exposición de los envases a la acción de los rayos solares.

## Datos Técnicos

Base química	Mezcla de cementos, amino alcoholes y fillers
Densidad	0,75 kg/l ± 0,05
pH	12 ± 1
Contenido de cloruro soluble	< 0.1 M-%
Contenido de álcalis	≤ 3%

## Información del Sistema

### Detalles de Aplicación

Consumo / Dosis 1% – 2% de Sika® WT- 200 P con respecto al peso del cemento.

**Método de aplicación** Sika® WT- 200 P se agrega al momento de confeccionar el hormigón. Dependiendo de la operación, se agrega al agua de amasado para formar una lechada muy fina y se adiciona ésta al mezclador de hormigón. También, Sika® WT- 200 P puede agregarse al agregado fino y grueso. Los agregados y Sika® WT- 200 P deben ser bien mezclados por aproximadamente 120 segundos antes de agregar el cemento y el agua de amasado. Después de agregar todos los ingredientes en el mezclador, se recomienda considerar un tiempo de mezclado de por lo menos 60 segundos, que depende de las condiciones de mezclado y desempeño del mezclador. Para evitar exceso de agua en el hormigón, la cantidad final de ésta se debe adicionar una vez transcurridos 2/3 del tiempo de mezclado. La relación agua cemento y el control de consistencia son de responsabilidad del productor de hormigón. Se recomienda hacer pruebas de laboratorio para evaluar y confirmar la reducción real de agua.

### Condiciones de Aplicación / Limitaciones

**Compatibilidad** Aditivos Sika®:  
Compatible con todos aditivos Plastificantes Plastocrete® y Superplastificantes Sika®, tales como Sika® Viscocrete®, SikaPlast®, Sikament®.  
Información de compatibilidad con otros productos se encuentra disponible a solicitud.  
  
Cementos/Aglomerantes:  
Todas las combinaciones de cemento.

**Notas sobre aplicación/ limitaciones** Se recomienda pedir soporte a nuestro departamento técnico. Adicionalmente:  
  
La composición química y física de los componentes, hormigón, Sika® WT- 200P y las temperaturas tanto del hormigón como del ambiente pueden afectar el tiempo de fraguado del hormigón.

### Base de Valores

Toda la documentación técnica establecida en esta Ficha Técnica de Producto está basada en pruebas de laboratorio. Las mediciones reales pueden variar debido a circunstancias que van más allá de nuestro control.

## Restricciones Locales

Favor consultar la Ficha Técnica local para tener la descripción exacta de los campos de aplicación, ya que como resultado de regulaciones locales específicas el desempeño de este producto puede variar de país en país.

## Instrucciones de seguridad

### Salud y Seguridad

Para información y consejo sobre seguridad en la manipulación, almacenamiento y disposición de productos químicos, los usuarios deben referirse a la ficha de datos de seguridad vigente, la cual contiene datos físicos, ecológicos, toxicológicos y otros datos relativos a la seguridad. En caso de emergencia llamar al CITUC a los siguientes fonos: 6353800 por intoxicaciones ó 2473600 por emergencias químicas.

### Observaciones

La información, y, en particular, las recomendaciones relacionadas a la aplicación y uso final de productos de Sika, se dan en buena fe basada en el conocimiento y experiencia actual de Sika de los productos cuando se han almacenado apropiadamente, manipulados y aplicados bajo las condiciones normales de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las diferencias en materiales, substratos y condiciones reales del sitio son tales que ninguna garantía en relación a la comercialización o de aptitud para un propósito particular, ni cualquier obligación que surja en absoluto de cualquier relación legal, puede ser inferida de esta información, ni de cualquier otra recomendación escrita, o de cualquier otra sugerencia ofrecida. El usuario debe probar la aptitud del producto para la aplicación y propósito propuesto. Sika se reserva el derecho para cambiar las propiedades de sus productos. Deben observarse los derechos de propiedad de terceras partes. Todas las órdenes de compra son aceptadas sujetas a nuestras condiciones actuales de venta y entrega. Los usuarios siempre deben referirse a la más reciente edición de la Ficha Técnica local del producto correspondiente, copias de la cual se proporcionarán a su solicitud.



Sika S.A. Chile  
Pdte. S. Allende 85  
San Joaquín  
Santiago  
Chile

Tel. 56 2 510 6510  
Fax 56 2 552 3735  
www.sika.cl





## Descripción

Xypex es un tratamiento químico único para la impermeabilización, protección y mejora del concreto. XYPEX ADMIX C-1000 se agrega al concreto en el momento de su mezcla. Xypex Admix C-1000 está compuesto de cemento Portland, arena sílica finamente gradada y varios químicos de Xypex Chemical Corp. Estos químicos activos reaccionan con la humedad del concreto fresco y con los productos residuales de la hidratación del cemento, lo que causa una reacción catalítica. Esta reacción genera una formación de cristales no solubles dentro de los poros y los capilares del concreto, sellándolo permanentemente contra la penetración de agua y otros líquidos desde cualquier dirección. También lo protege del deterioro ocasionado por condiciones ambientales agresivas/severas.

## Xypex Admix Serie C

Xypex Admix Serie C ha sido especialmente formulado para ajustarse a las variaciones del proyecto y condiciones de temperatura. **Xypex Admix C-500** está específicamente diseñado para satisfacer las prácticas modernas, que incorporan a la mezcla de concreto aditivos tales como ceniza volante y escoria. Para la mayoría de los diseños de mezcla de concreto, la incorporación de Xypex Admix C-500 tendrá poco o ningún efecto en el tiempo de fraguado. **Xypex Admix C-1000** está diseñado para un concreto típico rico en cemento Portland, para el cual se requiera un fraguado normal o ligeramente más largo. **Xypex Admix C-2000** está diseñado para aquellos proyectos que requieran un aumento del retardo debido a altas temperaturas o a prolongados tiempos de entrega del concreto premezclado. Ver Tiempo de Fraguado y Resistencia para mayores detalles. Consultar al representante técnico de Xypex para la elección del Xypex Admix más apropiado para su proyecto.

## Recomendado para:

- Reservorios y tanques
- Plantas de tratamiento de agua potable y residual
- Estructuras secundarias de contención
- Túneles y sistemas de metro/subterráneos
- Cámaras o bóvedas subterráneas
- Cimentaciones
- Estructuras para estacionamientos

## ADMIX C-1000

07160 | CEMENTO CON CRISTALIZACIÓN

Impermeabilización del Concreto / Hormigón

- Piscinas o albercas
- Elementos prefabricados

## Ventajas

- Resistente a presiones hidrostáticas extremas, desde el lado positivo o negativo del concreto
- Forma parte integral del sustrato
- Altamente resistente a químicos agresivos
- Puede sellar grietas hasta de 0.4 mm
- Permite que el concreto respire
- No es tóxico
- Es más económico que otros métodos
- Es permanente (no se deteriora)
- Se agrega a la mezcla y, por lo tanto, no es afectado por el clima
- Aumenta la flexibilidad del programa de construcción

## Presentación

Xypex Admix C-1000 está disponible en varias presentaciones. Contactar al representante técnico de Xypex para obtener mayores detalles.

## Almacenaje

Los productos Xypex deben almacenarse en un lugar seco y a temperatura mínima de 7°C. Almacenado apropiadamente, el producto conserva sus características durante un año.

## Dosificación

### Xypex Admix C-1000:

2% - 3% en relación al peso del cemento

### Xypex Admix C-1000 NF (sin finos):

1% - 1.5% en relación al peso del cemento

**NOTA:** Bajo ciertas condiciones, la dosificación para Xypex Admix grado NF podrá ser reducida hasta el 0.8%, dependiendo de la cantidad y tipo de material cementoso. La dosificación máxima podrá ser de 2% en relación al peso del cemento para aplicaciones relacionadas con agua potable. Consultar al Departamento Técnico de Xypex para determinar la dosificación apropiada, y obtener mayor información de cómo aumentar la resistencia química, optimizar el desempeño del concreto o para satisfacer los requerimientos específicos de su proyecto.

## Resultados de Pruebas

### PERMEABILIDAD

**Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EUA CRD C48-73 "Permeabilidad del Concreto", Aviles Engineering Corp., Houston, TX, USA**

Dos muestras de concreto tratadas con Xypex Admix, al 3% y al 5% respectivamente, y una muestra sin tratar fueron sometidas a una prueba de permeabilidad. Todas fueron sometidas a presiones de 150 psi (350 pies de presión). Los resultados mostraron humedad y permeabilidad de agua a través de la muestra sin tratar después de 24 horas. Sin embargo, las muestras tratadas con Xypex Admix no presentaron filtración y sólo 1.5 mm de penetración de agua después de 120 horas (5 días).

**Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EUA CRD C48-73 "Permeabilidad del Concreto", SETSCO Services Pte Ltd., Singapore**

Seis muestras tratadas con Xypex Admix y seis sin tratar fueron sometidas a una prueba de permeabilidad. Todas las muestras fueron sometidas a un aumento gradual de presión durante 5 días llegando a 7 bares (224 pies de presión) y manteniéndose por 10 días más. Mientras las muestras sin tratar mostraron filtraciones a partir del quinto día, y se incrementaron durante el resto de la prueba, las muestras tratadas con Xypex Admix no mostraron filtración alguna.

**DIN 1048 "Impermeabilidad del Concreto al Agua" Dictu S.A., Dept. of Engineering and Construction Mgt., Santiago, Chile**

Muestras de concreto de 120 mm de espesor tratadas con Xypex Admix fueron probadas contra muestras sin tratar, para determinar la impermeabilidad al agua de las mismas. Las muestras fueron sometidas a una presión hidrostática continua durante 28 días. El agua permeó totalmente a través de la muestra sin tratar, pero no se detectó permeabilidad en aquellas tratadas con Xypex Admix.

### RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

**ASTM C-39 "Resistencia a la Compresión de Muestras de Cilindros de Concreto" HBT Agra, Vancouver, B.C., Canada**

Muestras de concreto conteniendo diferentes dosificaciones de Xypex Admix (1%, 2% y 5%) fueron sometidas a prueba, comparándolas con una muestra sin tratar. Los resultados de las pruebas indicaron a los 28 días, un aumento significativo en la resistencia a la compresión de las muestras que contenían Xypex Admix. El aumento en la resistencia varió entre el 5% y el 20% (dependiendo de la dosificación del Xypex Admix), en comparación con la muestra sin tratar.

**ASTM C-39 "Resistencia a la Compresión en Muestras de Cilindros de Concreto", Laboratorios Kleinfelder, San Francisco, CA, USA**

A los 28 días, la prueba a la compresión de las muestras de concreto que contenían Xypex Admix arrojó un resultado de 7160 psi, en comparación con los 6460 psi de las muestras sin tratar (un incremento de 10%).

### RESISTENCIA QUÍMICA

**JIS "Prueba Química de Durabilidad", Japanese Utility Company, Reporte Interno, Tokyo, Japan**

Muestras de concreto con Xypex Admix fueron sometidas a prueba contra 5 muestras conteniendo otros aditivos y una muestra de control para determinar la resistencia a la corrosión y deterioro causados por químicos agresivos. Todas las muestras fueron sumergidas en una solución de ácido sulfúrico al 5%, a 20°C, por un período de 6 meses. Diferentes evaluaciones y mediciones fueron tomadas cada mes durante el período de ensayo incluyendo comparaciones fotográficas, módulo dinámico relativo de elasticidad, porcentaje de cambio en longitud, peso y rigidez a la flexión. A pesar de que las muestras con Xypex Admix fueron sometidas a condiciones de acidez mayores a las recomendadas, los resultados confirmaron que Xypex logró el mejor desempeño de todas las muestras sometidas a esta prueba.

**"Prueba de Resistencia al Ácido Sulfúrico", Aviles Engineering Corp., Houston, TX, USA**

Muestras de concreto conteniendo Xypex Admix en diferentes dosificaciones (3%, 5% y 7%) fueron evaluadas contra muestras de control sin tratar para determinar su resistencia al ácido sulfúrico. Después de ser sumergidas en el ácido, cada muestra fue evaluada diariamente respecto a pérdida de peso hasta llegar a un resultado del 50%, o hasta que se identificara una tendencia definida. El porcentaje respecto a pérdida de peso de las muestras con Xypex Admix fue significativamente menor que los resultados obtenidos con las muestras de control.

**"Prueba de Resistencia a los Sulfatos", Taywood Engineering Ltd., Perth, Australia**

Muestras de concreto conteniendo Xypex Admix fueron sumergidas en una solución de sulfato de amonio y examinadas para determinar su "resistencia ante ambientes agresivos". El desempeño de la tecnología por cristalización de Xypex fue comparado con otras 5 muestras, incluyendo una preparada con cemento resistente al sulfato de amonio. Cada una de las muestras fue curada por un período de 7 días y luego colocada en una solución de sulfato de amonio (132 g/l) durante 180 días. La tasa de corrosión se determinó mediante

la medición de pérdida de peso y cambio de longitud semanalmente. La tecnología por cristalización de Xypex mejoró sustancialmente el desempeño del concreto comparado con el concreto de referencia y muy similar al concreto resistente a los sulfatos. Las muestras tratadas con Xypex Admix también proporcionaron el más alto nivel de protección, de acuerdo a la medición del cambio de longitud.

#### **DURABILIDAD A LOS CICLOS DE CONGELACION / DESCONGELACION**

**ASTM C 666 "Durabilidad congelación / descongelación", Laboratorio Independiente, Cleveland, OH, USA**

Después de 300 ciclos de congelación/descongelación, las muestras con Xypex Admix indicaron una durabilidad relativa de 94%.

#### **EXPOSICIÓN AL AGUA POTABLE**

**NSF 61 "Efectos sobre la salud de componentes en sistemas de agua potable", Laboratorio NSF International, Ann Arbor, MI, USA**

Las muestras tratadas con Xypex expuestas al contacto con agua potable no indicaron efecto dañino alguno.

### **Instrucciones de Uso**

Xypex Admix C-1000 se agrega al concreto durante su mezcla. La secuencia de los procedimientos para su incorporación depende del tipo de planta y equipo utilizados.

**1. PLANTA PREMEZCLADORA – OPERACIÓN EN SECO** Adicionar Xypex Admix en polvo al tambor del camión mezclador. Una vez que el tambor haya sido accionado puede añadirse el resto de los agregados de acuerdo con las prácticas normales de mezclado. Los materiales deberán mezclarse por lo menos 5 minutos para asegurar que Xypex Admix haya sido distribuido uniformemente en la mezcla del concreto.

**2. PLANTA PREMEZCLADORA – OPERACIÓN DE MEZCLA CENTRAL** Mezclar Xypex Admix con agua formando una lechada de textura fina (p. ej., proporciones: 6.75 kg - 9 kg de polvo con 13.6 lts de agua). Posteriormente, verter las cantidades de material requerido dentro del tambor del camión mezclador. Los agregados, cemento y agua se mezclarán en planta de acuerdo a prácticas normales (tomar en consideración la cantidad de agua ya vertida en el camión mezclador). Verter la lechada de Xypex Admix al camión y mezclar por lo menos 5 minutos para asegurar que Xypex Admix haya sido distribuido uniformemente en la mezcla del concreto.

### **3. PLANTA DE CONCRETOS PREFABRICADOS**

Agregar Xypex Admix a la piedra y arena, mezclar bien de 2 - 3 minutos antes de añadir el cemento y el agua. La masa total de concreto debe ser mezclada de acuerdo con las prácticas normales.

#### **NOTAS:**

i. Es importante obtener una mezcla homogénea de Xypex Admix con el concreto. De ahí que no se deba agregar Xypex Admix en polvo directamente al concreto húmedo y así prevenir la formación de gránulos que impidan que la mezcla quede distribuida de manera uniforme.

ii. Aunque el concreto contenga Xypex Admix no se excluye la necesidad de hacer los diseños para control de grietas, detallado de juntas constructivas y tomar medidas para reparación de defectos en el concreto (p. ej. hormigueros, orificios y agrietamientos superiores a límites permisibles).

Para mayor información respecto al uso más adecuado de Xypex Admix para un proyecto específico, contactar al representante técnico de Xypex.

### **Fraguado y Resistencia**

El fraguado del concreto es afectado por la composición físico-química de sus ingredientes, la temperatura y las condiciones climáticas. Xypex Admix C-1000 está diseñado para un concreto típico rico en cemento Portland, para el cual se requiera un fraguado normal o ligeramente más largo. El concreto con Xypex Admix C-1000 puede desarrollar resistencias finales más altas que otros concretos sin tratamiento. Mezclas de prueba deben ser realizadas bajo las condiciones del proyecto para determinar el tiempo de fraguado y resistencia del concreto.

### **Limitaciones**

Al usar Xypex Admix, la temperatura del concreto debe ser mayor a 4°C.

### **Servicio Técnico**

Para mayor información técnica, métodos alternativos de instalación o información relacionada con la compatibilidad del tratamiento Xypex con otros productos o tecnologías, contactar al Departamento Técnico de Xypex o a su representante local.

### **Información sobre Protección Personal**

Xypex es un producto alcalino; tanto en polvo como en mezcla cementosa, Xypex puede causar irritación de la piel o de los ojos. Las instrucciones para el tratamiento

de estas condiciones se detallan en forma clara en todos los envases y empaques Xypex. El fabricante mantiene actualizadas Hojas de Seguridad (MSDS) para todos los productos. Cada documento contiene información sobre el equipo de protección personal. El fabricante recomienda contactar a Xypex Chemical Corp. o a su representante local para obtener información antes de almacenar o utilizar el producto.

### **Garantía**

El fabricante garantiza que sus productos están libres de defectos y son consistentes con altos estándares de calidad. Si se demuestra que algunos de los productos presentan defectos, la responsabilidad del fabricante se limita a la reposición del producto en fábrica. El fabricante no garantiza la viabilidad del producto para un propósito particular y esta garantía reemplaza cualquier otra, expresa o implícita. El usuario determinará la viabilidad del producto para su uso y asume todos los riesgos y responsabilidades derivados de ello.



13731 Mayfield Place, Richmond, BC, Canada V6V 2G9 Toll-free: 1.800.961.4477  
Tel: 604.273.5265 Fax: 604.270.0451 E-mail: [info@xypex.com](mailto:info@xypex.com) Web: [www.xypex.com](http://www.xypex.com)  
XYPEX es una marca registrada de Xypex Chemical Corporation. Copyright © 2004-2009 Xypex Chemical Corporation.



## DESCRIPCIÓN:

Mortero de cemento hidráulico de fraguado rápido sin contracción (3-5 minutos) para taponar fugas de agua a presión o reparación de grietas y otros defectos en estructuras de hormigón y mampostería.

**XYPEX** Fabricado bajo la licencia de XYPEX Chemical Corporation de Canadá.

## DATOS TÉCNICOS:

Densidad (g/cm<sup>3</sup>): 1.33

Polvo color gris.

Un solo componente y requiere solo mezclarse con agua.

No contiene cloruros.

No contiene elementos metálicos.

No se oxida ni se deteriora.

No es tóxico.

### Resultado de Pruebas

Características Físicas	Método de Prueba	Resultado Típico	
		psi	MPa
Resistencia a la Compresión	ASTM C109	2100	(14.3)
		3100	(21.3)
		4500	(31.0)
Tiempo de Fraguado	ASTMC266	Min.	Seg.
Fraguado Inicial		3	50
Fraguado Final		9	10
Adherencia	CSA A23.2-6B	psi	MPa
			0.8

## USOS:

- Aplicable directamente sobre hormigón, roca, sótanos, cisternas, túneles, tuberías, estanques, etc.
- Detener fugas o entradas de agua a presión.
- Reparación de rajaduras de hormigón.
- Reparación y sellado de juntas de hormigón sobre hormigón.

## MODO DE EMPLEO:

El área a tratar debe estar limpia eliminando cualquier tipo de material extraño, partes sueltas, algas, residuos de cemento, etc.

Mezclar 3.5 partes de XYPEX PATCH AND PLUG con 1 parte de agua, hasta lograr una pasta dócil y trabajable. No mezclar más de lo que se pueda utilizar en 3 minutos. Para mejores resultados la temperatura del agua debe ser de 21° C.

Moldear la pasta dándole forma de tapón y colocar sobre la grieta o hueco presionando fuertemente para vencer la presión del agua hasta que el producto haya endurecido.

Para sellar rajaduras comience por la parte superior y avance hacia abajo.

En grietas y huecos grandes comenzar a cerrar por los bordes hasta conformar un orificio menor que permita ser taponado.

Una vez taponado, proceder a aplicar el impermeabilizante por cristalización XYPEX CONCENTRADO.

## RENDIMIENTO:

1 kg de XYPEX PATCH AND PLUG rellena 680 cm<sup>3</sup> ó 1.10 m de una ranura de 2.5 cm de ancho por 2.5 cm de profundidad.

## BENEFICIOS:

- Una fórmula especialmente concebida para obtener mortero con más durabilidad, adhesión y resistencia química.

GUAYAQUIL: Km 6½- Av. Juan Tanca Marengo. Calle 3ra. TELEFONOS: (04)225 4160 - 225 4021

CASILLA: 09-01-10857. E-MAIL: [servicio@aditec-ec.com](mailto:servicio@aditec-ec.com)

QUITO: Tadeo Benítez OE 1-942 y Vicente Duque. TELEFONOS: (02)247 9552 - 280 8776.

E-MAIL: [clientes.ujo@aditec-ec.com](mailto:clientes.ujo@aditec-ec.com)

CUENCA: Av. de las Américas y Daniel Alvarado. TELEFONO: (07)284 1590

[www.aditec-ec.com](http://www.aditec-ec.com)

**Aditec**  
Calidad que construye confianza

**XYPEX PATCH AND PLUG**  
Mortero de cemento hidráulico de fraguado rápido



# HOJA DE SEGURIDAD DE XYPEX ,PATCH AND PLUG Y ADMIX C 2000

**ADITEC ECUATORIANA CÍA. LTDA.**



<b>1. IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL Y DEL PROVEEDOR:</b>	MSDS Nº: 78
NOMBRE COMERCIAL: IMPERMEABILIZANTE INTEGRAL POR CRISTALIZACION	TELEFONOS DE EMERGENCIA:  6026090 - 6026088- 6026089
NOMBRE QUÍMICO: MEZCLA	
SINÓNIMOS: N/A	
<b>USO RECOMENDADO DEL PRODUCTO QUÍMICO Y RESTRICCIONES DE USO:</b> MORTERO PARA PAREDES Y PISOS	
NOMBRE DEL PROVEEDOR: ADITEC ECUATORIANA CIA LTDA.	
DIRECCIÓN DEL PROVEEDOR: Km 6 1/2 Juan Tanca Marengo y Calle 3ra.	
TELÉFONOS DEL PROVEEDOR: 6026090	
FÓRMULA QUÍMICA: BASE CEMENTICIOS	
NÚMERO DE CAS: N/A	
NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN SGA:	

<b>2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROSOS:</b>		Categoría 3
CLASIFICACIÓN SGA DE LA SUSTANCIA / MEZCLA: 9 CLASES		Sin pictograma
ELEMENTOS DE LA ETIQUETA SGA. INCLUIDAS RECOMENDACIONES DE PREVENCIÓN Y PRECAUCIÓN:		Atención Provoca una leve irritación cutánea
SÍMBOLOS O DESCRIPCIÓN DE LOS PELIGROS: Provoca una leve irritación cutánea		

3. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE LOS INGREDIENTES PELIGROSOS:					
SUSTANCIA	%	NUM. CAS*	LÍMITES DE EXPOSICIÓN OCUPACIONAL		
			TLV*	TLV-TWA*	
SILICATO TRICALCICO	20 - 70	1216885-3			
SILICATO DICALCICO	10 - 60	1003477-2			
ALUMINILO FERRITO TETRACALCICO	5 - 15	12058-35-8			
SULFATO CALCICO	2 - 10	---			

4. PRIMEROS AUXILIOS	
INHALACIÓN: X	CONTACTO CON LA PIEL: X
CONTACTO CON LOS OJOS: X	INGESTIÓN: X
INHALACIÓN:	DOLOR A LA GARGANTA
CONTACTO CON LA PIEL:	IRRITACION DE LA PIEL SECA .ENROJECIMIENTO
CONTACTO CON LOS OJOS:	IRRITACION DE LOS OJOS, DOLOR, QUEMADURAS PROFUNDAS GRAVES
INGESTIÓN:	IRRITACION EN EL ESTOMAGO, SENSACION DE QUEMAZON
OTROS: (CARCINOGENESIS, MUTAGENESIS, TETAROGENESIS, ETC)	N/A
SOBREEXPOSICIÓN REPETIDA:	CAUSA REACCIÓN ALÉRGICA /SENSIBILIZACIÓN, EFECTOS CUTÁNEOS ADVERSOS ( COMO AGOTAMIENTO DE LA GRASA, ERUPCIÓN O IRRITACIÓN),N/A

PROCEDIMIENTOS DE PRIMEROS AUXILIOS	
INHALACIÓN: TRASLADÉ A LA PERSONAS A UNA ÁREA CON AIRE PURO. BUSQUE ASISTENCIA MEDICA SI LA TOS U OTROS SINTOMAS NO DISMINUYEN, ES LO MAS INDICADO	
CONTACTO CON LA PIEL: LAVAR CON AGUA FRESCA Y JABÓN SUAVE DE pH NEUTRO DURANTE 15 MINUTOS	
CONTACTO CON LOS OJOS: LAVARSE INMEDIATAMENTE CON ABUNDANTE AGUA DURANTE 15 MINUTOS .	
INGESTIÓN: NO INDUZCA EL VOMITO. SI LA VICTIMA ESTA CONSCIENTE, HAGA QUE TOMÉ ABUNDANTE AGUA Y LLAME AL MEDICO	
INFORMACIÓN PARA EL MÉDICO: Sin peligros que requieren medidas especiales de primeros auxilios.	

## HOJA DE SEGURIDAD DE XYPEX ,PATCH AND PLUG Y ADMIX C 2000

### 5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

ES INFLAMABLE ?		PUNTO DE INFLAMACIÓN (°C): N/A	TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN (°C): NO HAY DATOS	
SI:	NO: X			
LIM. INFERIOR DE INFLAMABILIDAD(%)	NO HAY DATOS		LIM. SUPERIOR DE INFLAMABILIDAD(%)	NO HAY DATOS
MEDIOS DE EXTINCIÓN RECOMENDADOS:				
CO2		POLVO QUIMICO SECO X		AGUA PULVERIZADA X
ESPUMA		OTROS		NO APLICABLE
PROCEDIMIENTOS ESPECIALES PARA COMBATIR INCENDIOS:		SE RECOMIENDA UN APARATO DE RESPIRACIÓN		
EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL RECOMENDADO:		MASCARILLA DE GASES, GUANTES, GAFAS, BOTAS		
PRODUCTOS PELIGROSOS POR DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA:		NO SE DESCOMPONE		

### 6. MEDIDAS QUE DEBEN TOMARSE EN CASO DE DERRAME ACCIDENTAL:

PROCEDIMIENTOS DE EMERGENCIA:	AISLAR EL AREA
EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL QUE DEBE USARSE:	MASCARILLA DE GASES, GUANTES, GAFAS, BOTAS
PRECAUCIONES MEDIOAMBIENTALES:	NO BOTAR AL AMBIENTE
MÉTODO Y MATERIALES DE AISLAMIENTO Y LIMPIEZA:	RECOGER CON ARENA SECA Y GUARDARLA EN UN TANQUE.

### 7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO

DURANTE LA MANIPULACION:	NO COMER, BEBER O FUMAR.
CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO SEGURO:	MANTENER EN UN ÁREA VENTILADA
INCOMPATIBILIDADES:	NINGUNA
OTRAS PRECAUCIONES:	N/A

### 8. CONTROL DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN INDIVIDUAL

CONTROL DE INGENIERÍA APROPIADOS:	VENTILACIÓN ADECUADA
VENTILACIÓN LOCAL:	EN TODA EL ÁREA.
EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL:	MASCARILLA DE GASES, GUANTES, GAFAS, BOTAS
PROTECCIÓN RESPIRATORIA:	MASCARILLA DE GASES
PROTECCIÓN DE OJOS:	GAFAS
PROTECCIÓN DE LAS MANOS:	GUANTES DE NEOPRENO
OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL:	N/A
PARAMETROS DE CONTROL:	LIMITES O VALORES DE CORTE O EXPOSICION OCUPACIONALES O BIOLOGICOS.

### 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

ESTADO FÍSICO:	POLVO	
APARIENCIA Y COLOR:	DIFERENTES TONOS	
TEMPERATURA DE FUSIÓN (°C):	1000°C	
TEMPERATURA DE EBULLICIÓN (°C):	N/A	
SOLUBILIDAD EN AGUA:	0.1 A 1.0 %	
OLOR:	NO TIENE OLOR DISTINGUIBLE	
% DE VOLÁTILES POR VOLUMEN:	N/A	
PRESION DE VAPOR A 20°C (mm de Hg):	NO DETERMINADA	
DENSIDAD DE VAPOR:	MÁS PESADO QUE EL AIRE: x	MÁS LIVIANO QUE EL AIRE:
TASA DE EVAPORACIÓN:	MÁS RÁPIDO:	MÁS LENTO QUE EL BUTIL ACETATO: x
DENSIDAD RELATIVA:	N/A	
pH:	10	
SOLUBILIDAD (ES):	EN AGUA	
COEFICIENTE DE REPARTO N-OCTANO/AGUA:	N/A	
TEMPERATURA DE IGNICIÓN ESPONTÁNEA:	N/A	
TEMPERATURA DE DESCOMPOSICIÓN:	N/A	

## HOJA DE SEGURIDAD DE XYPEX ,PATCH AND PLUG Y ADMIX C 2000

### 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

ESTABILIDAD QUÍMICA:	ESTABLE: x	INESTABLE:
POSIBILIDADES DE REACCIONES PELIGROSAS:	N/A	
MATERIALES INCOMPATIBLES:	agentes oxidantes fuertes, ácidos fuertes y bases fuertes.	
PRODUCTOS PELIGROSOS POR DESCOMPOSICIÓN QUÍMICA:	CO, FORMOL, DIÓXIDO DE SILICÓN	
POLIMERIZACIÓN PELIGROSA:	OCURRIRÁ:	NO OCURRIRÁ: X
CONDICIONES QUE SE DEBEN EVITAR:	contacto con agentes oxidantes.	

### 11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

DESCRIPCIÓN:	NO EXISTE NINGUNA INFORMACION
INFORMACIÓN SOBRE LAS VÍAS PROBABLES DE EXPOSICIÓN:	N/A
SINTOMAS RELACIONADOS CON LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y TOXICOLÓGICAS:	N/A
EFFECTOS INMEDIATOS, RETARDADOS Y CRÓNICAS PRODUCIDOS POR UNA EXPOSICIÓN A CORTO Y LARGO PLAZO:	Posible irritación en la piel
MEDIDAS NUMÉRICAS DE TOXICIDAD:	N/A

### 12. INFORMACIÓN ECOTOXICOLÓGICA

BIODEGRADABILIDAD/PERSISTENCIA:	NO HAY DATOS
BIOTOXICIDAD:	NO HAY DATOS
POTENCIAL DE BIOACUMULACIÓN:	NO HAY DATOS
MOVILIDAD EN EL SUELO:	NO HAY DATOS
OTROS EFECTOS ADVERSOS:	NO HAY DATOS
COMPORTAMIENTO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO:	NO HAY DATOS

### 13. INFORMACIÓN RELATIVA A LA ELIMINACIÓN DE PRODUCTOS

DESCRIPCIÓN DE LOS DESECHOS	BASE CEMENTICIOS
PROCEDIMIENTOS DE MANEJO Y MÉTODOS DE ELIMINACIÓN:	ENVIARLOS A INCINERAR
PROCEDIMIENTOS DE ELIMINACIÓN DE RECIPIENTES CONTAMINADOS:	ENVIARLOS A INCINERAR

### 14. INFORMACIÓN RELATIVA DE TRANSPORTE

DESIGNACIÓN OFICIAL DE TRANSPORTE DE LAS NACIONES UNIDAS:	
NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN: NU	NO REGULADO
CLASES DE PELIGROS EN EL TRANSPORTE:	N/A
GRUPO DE EMBALAJE/ENVASE SI SE APLICA:	N/A
CONTAMINANTE MARINO (SI / NO):	SI
PRECAUCIONES ESPECIALES DURANTE EL TRANSPORTE:	NINGUNA

### 15. INFORMACIÓN SOBRE LA REGLAMENTACIÓN

SALUD 1	INFLAMABILIDAD 0
---------	------------------

### 16. OTRA INFORMACIÓN

LA INFORMACIÓN FACILITADA SE CONSIDERA CORRECTA Y CONFIABLE, PERO SE PRESENTA SIN GARANTÍA O RESPONSABILIDAD POR PARTE

ELABORADO POR:	HENRY PESANTES	FECHA:	01/06/2015
REVISADO POR:	MARIA DE LOURDES PACHECO	FECHA:	08/06/2015

**REPORTE DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X**

Identificación : MUESTRA CAOLIN GRIS Tipo de muestra: GEOLÓGICA - MINERA Procedencia : GEOLÓGICA - MINERA	Consecutivo ALPHA: AXS11895 Responsable del muestreo: CLIENTE Método de muestreo: NO REPORTADO Fecha Ingreso: 17/01/2014 Análisis: 20/01/2014 Informe: 20/01/2014
Cliente: ALQUIMIX S.A Contacto: JOSE SANTOS Dirección: CALLE 140 No 21-51 Ciudad: BOGOTA Teléfonos: 313-2669912	Solicitud Análisis: SA3218 Consecutivo Informe: RE11894 Aplicación: 2.2 GT-01 WROXI
Método de análisis: PRT-GT-05 WDXRF-WROXI LOI	

FF-61-35

Versión 2

Página 1 de 1

**VER OBSERVACIONES**

Nombre	Compuesto / Elemento	Composición (%)	Límite cuantificación	Incertidumbre
Sílice	SiO <sub>2</sub>	67.27	-	-
Titanio	TiO <sub>2</sub>	1.70	-	-
Aluminio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.74	-	-
Hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.17	-	-
Manganeso	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	N.D	-	-
Magnesio	MgO	0.29	-	-
Calcio	CaO	N.D	-	-
Sodio	Na <sub>2</sub> O	0.30	-	-
Potasio	K <sub>2</sub> O	2.70	-	-
Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	-	-
Azufre	SO <sub>3</sub>	N.D	-	-
Vanadio	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	-	-
Cromo	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	N.D	-	-
Estroncio	SrO	N.D	-	-
Zirconio	ZrO <sub>2</sub>	0.06	-	-
Bario	BaO	0.06	-	-
Níquel	NiO	N.D	-	-
Cobre	CuO	N.D	-	-
Zinc	ZnO	N.D	-	-
Plomo	PbO	N.D	-	-
Hafnio	HfO <sub>2</sub>	N.D	-	-
Pérdidas	LOI	5.62	-	-

<b>Observaciones.</b>	
N.D. No detectable.	
El resultado se reporta en base seca a 105° C. Humedad relativa (%): 2.48	
LOI : (LOSS OF IGNITION) pérdida por ignición determinada a 1000°C durante una hora	
Los resultados no pueden ser utilizados con fines comerciales porque la cantidad de muestra NO es representativa para grandes cantidades. Esta técnica de análisis no descarta presencia de elementos NO reportados en concentraciones menores a 50 ppm. El análisis corresponde a un programa cuantitativo.	
RADIOACTIVIDAD (µSv/h) RADACION Beta/Gamma	NO PRESENTE
CANTIDAD DE MUESTRA ANALIZADA	1320 gramos
CARÁCTER MAGNÉTICO (SI/NO)	NO PRESENTE

Elaborado y Aprobado por  
Ing. Catalina Hoyos  
Analista  
T.P. 16081

**Notas:**

1. Los resultados analíticos presentes corresponden exclusivamente a la muestra recibida y no a otro material de la misma procedencia.
  2. El laboratorio no se hace responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente informe.
  3. El laboratorio no es responsable del muestreo, ni de la representatividad de la muestra, como lo indica el método de muestreo referenciado.
  4. Cualquier reclamación sobre los resultados se puede realizar durante los próximos 3 meses posteriores a la entrega de este informe.
  5. El laboratorio no se hace responsable de la disposición de material radiactivo, considerado peligroso o que presente condiciones especiales.
  6. La copia de los resultados tendrá un costo del 15% de los análisis. Cualquier informe adicional tendrá un costo del 50% de los análisis.
  7. La contramuestra será enviada al cliente o éste definirá su disposición, una vez finalizado el periodo de almacenamiento.
- Nota de confidencialidad: El laboratorio Alpha 1 S.A. se compromete a mantener en absoluta reserva los resultados obtenidos

Av Carrera 60 H. 67 A-80 Bogota DC  
Tel (571) 3116346 Teéfax 2313518  
Móvil (57) 3105550447  
laboratorio@alpha1.com.co  
jelsed@alpha1.com.co  
www.alpha1.com.co

## COMPOSICION QUIMICA DE LAS MUESTRAS

	MKK	MKKM	KK 750°C
<b>Densidad</b>	<b>2,63</b>	<b>2,61</b>	<b>2,64</b>
<b>% R.I</b>	<b>81,51</b>	<b>82,57</b>	<b>79,07</b>
<b>SiO2</b>	<b>66,44</b>	<b>65,35</b>	<b>71,63</b>
<b>Al2O3</b>	<b>20,51</b>	<b>20,16</b>	<b>19,11</b>
<b>Fe2O3</b>	<b>1,08</b>	<b>2,21</b>	<b>1,15</b>
<b>CaO</b>	<b>0,10</b>	<b>0,24</b>	<b>0,15</b>
<b>MgO</b>	<b>1,01</b>	<b>1,01</b>	<b>1,04</b>
<b>K2O</b>	<b>3,52</b>	<b>3,45</b>	<b>3,30</b>
<b>Na2O</b>	<b>0,71</b>	<b>0,74</b>	<b>0,66</b>
<b>SO3</b>	<b>0,36</b>	<b>0,38</b>	<b>0,37</b>
<b>P2O5</b>	<b>-0,22</b>	<b>-0,20</b>	<b>-0,23</b>
<b>Cr2O3</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>MnO</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
<b>TiO2</b>	<b>1,10</b>	<b>1,09</b>	<b>1,00</b>
<b>LOI</b>	<b>5,35</b>	<b>5,54</b>	<b>1,79</b>
<b>CaCO3</b>	<b>0,18</b>	<b>0,43</b>	<b>0,27</b>
<b>LSF</b>	<b>0,05</b>	<b>0,11</b>	<b>0,07</b>
<b>SUMA</b>	<b>99,99</b>	<b>100,00</b>	<b>99,99</b>

## ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS MUESTRAS

**Este análisis fue realizado en un equipo SIZER ANALYZER MALVIN 2000 con analizador óptico Laser.**

### MUESTRA MK KAOLINK CALCINADO

**Podemos ver que el Material calcinado de kaolink tal como llevo tiene un tamaño de partícula aritmético (media) de 19,18 micras; un 50% del volumen inferior a 6,65 micras (mediana) y un volumen medio de 9,05 micras (moda)**

**Concreto premezclado F'c =295 kg/cm2 (4200 PSI) - Tipo estructural bombeable y sin aditivos - Muestra Patron**

**Materiales**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Cemento de alta resistencia - tipo Estructural	Kg	552.81231	450	\$ 248,766
Agua	Kg	209.397369	46	\$ 9,632
Grava	m3	0.2689321	68000	\$ 18,287
Arena	m3	0.35192375	29000	\$ 10,206
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 286,891

**Equipos**

Transporte de materiales	Km	2.5	\$ 2,500	\$ 6,250
Andamios	Hor	2	\$ 30,000	\$ 60,000
Mezcladora de trompo	Hor	2	\$ 20,000	\$ 40,000
Bombeo de concreto premezclado hasta 16 mts, de altura con bomba estacionaria y revenimiento de 14 a 18 cms. - Bomba de concreto, Producción: 30 m3/h, POTENCIA: 67 HP	Hor	2	\$ 45,000	\$ 90,000
Vibrador de concreto - cap. 12000 VPM , con manguera de 4.00 mts, y cabezal de por 38 mm ( 1/2"), con motor de gasolina de 4 H. P.	Hor	2	\$20,000	\$ 40,000
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 236,250

**Mano de obra**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Operario	Hor	2	\$18,000	\$ 36,000
Auxiliar 1	Hor	2	\$13,000	\$ 26,000
Auxiliar 2	Hor	2	\$13,000	\$ 26,000
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 88,000

**Herramientas**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Aspersor manual	Hor	2	\$5,000	\$ 10,000
Formaleta Metálica	m2	2	\$5,000	\$ 10,000
Herramientas menores	Glob	15%	\$1,500	\$ 1,500
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 21,500

*Subtotal costos directos*

\$ 632,641

Seguridad industrial y salud en el trabajo SGSST	-	4%	-	\$ 33,974
Administración	-	10%	-	\$ 84,934
Imprevistos	-	5%	-	\$ 42,467
Utilidad	-	7%	-	\$ 59,454
<i>Subtotal Administración y seguridad</i>				\$ 220,829

**TOTAL COSTO UNITARIO POR M3**

**\$ 853,470**

**Concreto premezclado F'c =295 kg/cm2 (4200 PSI) - Tipo estructural bombeable y aditivos por cristalización (tipo Admix)**

**Materiales**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Cemento de alta resistencia - tipo Estructural	Kg	553	\$ 450	\$ 248,766
Agua	Kg	209	\$ 46	\$ 9,632
Grava	m3	0.269	\$ 68,000	\$ 18,287
Arena	m3	0.352	\$ 29,000	\$ 10,206
Aditivo - Admix 2%	Kg	11.06	\$ 19,600	\$ 216,702
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 503,593

**Equipos**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Transporte de materiales	Km	2.5	\$ 2,500	\$ 6,250
Andamios	Hor	2	\$ 30,000	\$ 60,000
Mezcladora de trompo	Hor	2	\$ 20,000	\$ 40,000
Bombeo de concreto premezclado hasta 16 mts, de altura con bomba estacionaria y revenimiento de 14 a 18 cms. - Bomba de concreto, Producción: 30 m3/h, POTENCIA: 67 HP	Hor	2	\$ 45,000	\$ 90,000
Vibrador de concreto - cap. 12000 VPM , con manguera de 4.00 mts, y cabezal de por 38 mm ( 1/2"), con motor de gasolina de 4 H. P.	Hor	2	\$20,000	\$ 40,000
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 236,250

**Mano de obra**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Operario	Hor	2	\$18,000	\$ 36,000
Auxiliar 1	Hor	2	\$13,000	\$ 26,000
Auxiliar 2	Hor	2	\$13,000	\$ 26,000
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 88,000

**Herramientas**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Aspersor manual	Hor	2	\$5,000	\$ 10,000
Formaleta Metálica	m2	2	\$5,000	\$ 10,000
Herramientas menores	Glob	15%	\$1,500	\$ 1,500
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 21,500

*Subtotal costos directos*

**\$ 849,343**

Seguridad industrial y salud en el trabajo SGSST	-	4%	-	\$ 33,974
Administración	-	10%	-	\$ 84,934
Imprevistos	-	5%	-	\$ 42,467
Utilidad	-	7%	-	\$ 59,454
<i>Subtotal Administración y seguridad</i>				\$ 220,829

**TOTAL COSTO UNITARIO POR M3**

**\$ 1,070,173**

**Concreto premezclado F'c =295 kg/cm2 (4200 PSI) - Tipo estructural bombeable y aditivo Sika WT 200 P**

**Materiales**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Cemento de alta resistencia - tipo Estructural	Kg	553	\$ 450	\$ 248,766
Agua	Kg	209	\$ 46	\$ 9,632
Grava	m3	0.269	\$ 68,000	\$ 18,287
Arena	m3	0.352	\$ 29,000	\$ 10,206
Aditivo Sika WT -200 P	Kg	11	\$ 18,333	\$ 202,698
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 489,589

**Equipos**

Transporte de materiales	Km	2.5	\$ 2,500	\$ 6,250
Andamios	Hor	2	\$ 30,000	\$ 60,000
Mezcladora de trompo	Hor	2	\$ 20,000	\$ 40,000
Bombeo de concreto premezclado hasta 16 mts, de altura con bomba estacionaria y revenimiento de 14 a 18 cms. - Bomba de concreto, Producción: 30 m3/h, POTENCIA: 67 HP	Hor	2	\$ 45,000	\$ 90,000
Vibrador de concreto - cap. 12000 VPM , con manguera de 4.00 mts, y cabezal de por 38 mm ( 1/2"), con motor de gasolina de 4 H. P.	Hor	2	\$20,000	\$ 40,000
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 236,250

**Mano de obra**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Operario	Hor	2	\$18,000	\$ 36,000
Auxiliar 1	Hor	2	\$13,000	\$ 26,000
Auxiliar 2	Hor	2	\$13,000	\$ 26,000
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 88,000

**Herramientas**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Aspersor manual	Hor	2	\$5,000	\$ 10,000
Formaleta Metálica	m2	2	\$5,000	\$ 10,000
Herramientas menores	Glob	15%	\$1,500	\$ 1,500
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 21,500

*Subtotal costos directos*

\$ 835,339

Seguridad industrial y salud en el trabajo SGSST	-	4%	-	\$ 33,974
Administración	-	10%	-	\$ 84,934
Imprevistos	-	5%	-	\$ 42,467
Utilidad	-	7%	-	\$ 59,454
<i>Subtotal Administración y seguridad</i>				\$ 220,829

**TOTAL COSTO UNITARIO POR M3**

**\$ 1,056,168**

**Concreto premezclado F'c =295 kg/cm2 (4200 PSI) - Tipo estructural bombeable y mineral de metacaolín 2%**

**Materiales**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Cemento de alta resistencia - tipo Estructural	Kg	553	\$ 450	\$ 248,766
Agua	Kg	209	\$ 46	\$ 9,632
Grava	m3	0.269	\$ 68,000	\$ 18,287
Arena	m3	0.352	\$ 29,000	\$ 10,206
Metacaolín - 750	Kg	11	\$ 20	\$ 221
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 287,112

**Equipos**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Transporte de materiales	Km	2.5	\$ 2,500	\$ 6,250
Andamios	Hor	2	\$ 30,000	\$ 60,000
Mezcladora de trompo	Hor	2	\$ 20,000	\$ 40,000
Bombeo de concreto premezclado hasta 16 mts, de altura con bomba estacionaria y revenimiento de 14 a 18 cms. - Bomba de concreto, Producción: 30 m3/h, POTENCIA: 67 HP	Hor	2	\$ 45,000	\$ 90,000
Vibrador de concreto - cap. 12000 VPM , con manguera de 4.00 mts, y cabezal de por 38 mm ( 1/2"), con motor de gasolina de 4 H. P.	Hor	2	\$20,000	\$ 40,000
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 236,250

**Mano de obra**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Operario	Hor	2	\$18,000	\$ 36,000
Auxiliar 1	Hor	2	\$13,000	\$ 26,000
Auxiliar 2	Hor	2	\$13,000	\$ 26,000
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 88,000

**Herramientas**

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Aspersor manual	Hor	2	\$5,000	\$ 10,000
Formaleta Metálica	m2	2	\$5,000	\$ 10,000
Herramientas menores	Glob	15%	\$1,500	\$ 1,500
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 21,500

*Subtotal costos directos*

\$ 632,862

Seguridad industrial y salud en el trabajo SGSST	-	4%	-	\$ 33,974
Administración	-	10%	-	\$ 84,934
Imprevistos	-	5%	-	\$ 42,467
Utilidad	-	7%	-	\$ 59,454
<i>Subtotal Administración y seguridad</i>				\$ 220,829

**TOTAL COSTO UNITARIO POR M3**

**\$ 853,691**

## Concreto premezclado F'c =295 kg/cm2 (4200 PSI) - Tipo estructural bombeable y fibras sintéticas y metálicas - E5

### Materiales

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Cemento de alta resistencia - tipo Estructural	Kg	553	\$ 450	\$ 248,766
Agua	Kg	209	\$ 46	\$ 9,632
Grava	m3	0.269	\$ 68,000	\$ 18,287
Arena	m3	0.352	\$ 29,000	\$ 10,206
Fibra Metálica - 24 Kg/m3	Kg	24.0	\$ 8,350	\$ 200,400
Fibra sintética - 0.5 Kg/m3	Kg	0.5	\$ 27,600	\$ 13,800
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 501,091

### Equipos

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Transporte de materiales	Km	2.5	\$ 2,500	\$ 6,250
Andamios	Hor	2	\$ 30,000	\$ 60,000
Mezcladora de trompo	Hor	2	\$ 20,000	\$ 40,000
Bombeo de concreto premezclado hasta 16 mts, de altura con bomba estacionaria y revenimiento de 14 a 18 cms. - Bomba de concreto, Producción: 30 m3/h, POTENCIA: 67 HP	Hor	2	\$ 45,000	\$ 90,000
Vibrador de concreto - cap. 12000 VPM , con manguera de 4.00 mts, y cabezal de por 38 mm ( 1/2"), con motor de gasolina de 4 H. P.	Hor	2	\$ 20,000	\$ 40,000
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 236,250

### Mano de obra

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Operario	Hor	2	\$ 18,000	\$ 36,000
Auxiliar 1	Hor	2	\$ 13,000	\$ 26,000
Auxiliar 2	Hor	2	\$ 13,000	\$ 26,000
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 88,000

### Herramientas

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Valor
Aspersor manual	Hor	2	\$ 5,000	\$ 10,000
Formaleta Metálica	m2	2	\$ 5,000	\$ 10,000
Herramientas menores	Glob	15%	\$ 1,500	\$ 1,500
<i>Subtotal</i>	-	-	-	\$ 21,500

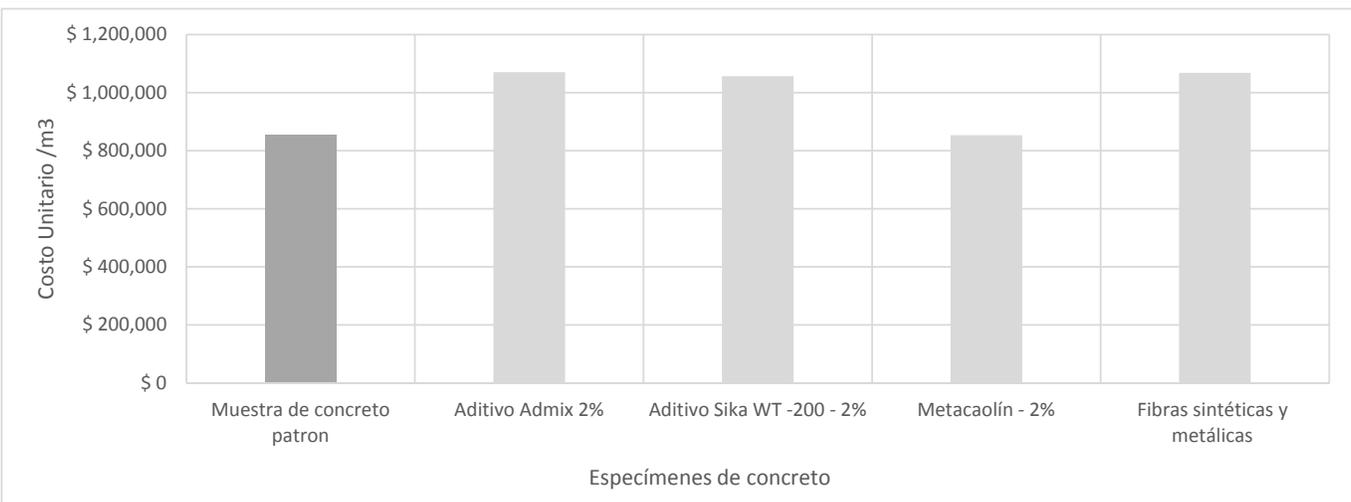
*Subtotal costos directos*

\$ 846,841

Seguridad industrial y salud en el trabajo SGSST	-	4%	-	\$ 33,974
Administración	-	10%	-	\$ 84,934
Imprevistos	-	5%	-	\$ 42,467
Utilidad	-	7%	-	\$ 59,454
<i>Subtotal Administración y seguridad</i>				\$ 220,829

**TOTAL COSTO UNITARIO POR M3**

**\$ 1,067,670**

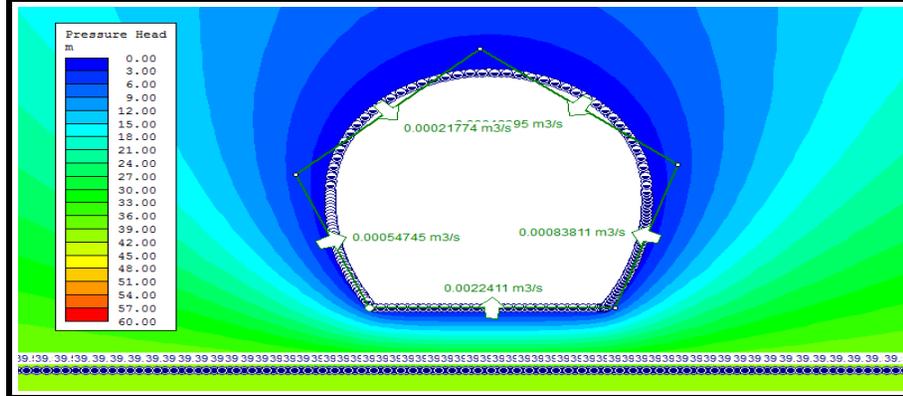


**ANEXO**  
EVALUACION EMPÍRICA – ALIAGA.  
MODELACIÓN DE CASO

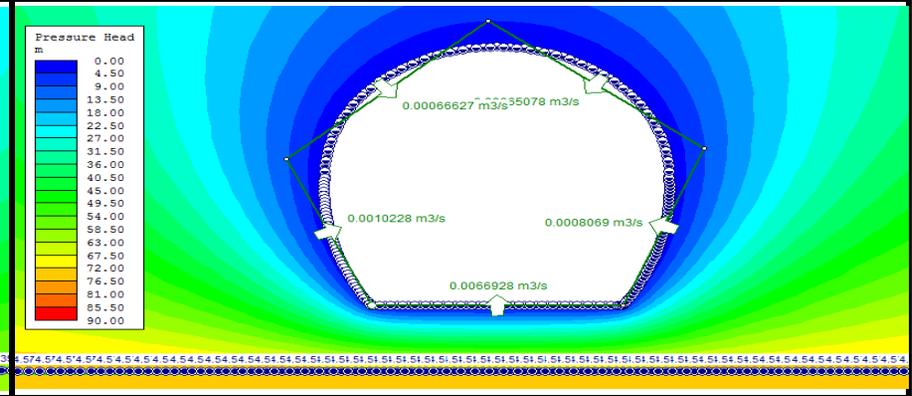
Tramo	Abscisado	Descripción	Roca Predom.	Terreno Predom.	Jr	Ja	Ib	Jv	Jn	sc (Mpa)	Cobertura Max.(m)	f (°) Discont.	RC (Mpa)	RQD		Estado de las discontinuidades						Flujo de Agua	TOTAL - RMR	Calidad Macizo	K (m/s) $K = 0,2e^{-0,19xRMR}$
														RQD -115-33J	ID	Separación (Diaclasas)	Longitud (discontinuidad)	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración				
1	K0 +0-K0+58,9	-Dureza moderada -Fracturada a muy fracturada -Rellenos de cuarzo y calcopinita y arcilla en sistemas subhorizontales -Rugosa -Bajo espaciamiento entre sistemas de diaclasas -Sistemas de fracturas continuas, cerradas y de baja esquistocidad -Goteos lentos a goteos rápidos	Pev	III	3	2	45	15	12	40	54	49	7	66	13	10	2	4	5	4	2	7	54	Media - III	7.001E-06
2	K0 +58,9-K0+ 266,6	-Dureza moderada -Fracturada a muy fracturada -Rellenos de cuarzo y calcopinita y arcilla en sistemas subhorizontales -Rugosa -Bajo espaciamiento entre sistemas de diaclasas -Sistemas de fracturas continuas, cerradas y de baja esquistocidad -Goteos lentos a goteos rápidos	Pev	II	3	2	45	15	10	40	83	49	7	66	13	10	3	4	5	4	4	4	54	Media - III	7.001E-06
3	K0 + 266,6-K0+ 883,9	-Dura a muy dura -Ligeramente fracturada a masiva -Rellenos de cuarzo y calcopinita, oxidación entre sistemas -Rugosa, ocasionalmente bandeada -Sistemas poco continuos -Sistemas ligeramente abiertos a cerrados -Foliación incipiente -Goteos rápidos a chorros	Pev/Pes	I	3	2	45	7	6	24-40	150	49	7	92	20	10	6	3	5	4	4	4	63	Buena - II	1.266E-06
4	K0 + 883,9-K1+ 300	-Dureza moderada a baja -Muy fracturada a fracturada y foliada. -Rellenos de cuarzo y calcopinita y de arcilla ocasionales -Diaclasas y foliaciones ligeramente abiertas -Sistemas poco continuos -Superficies onduladas, ligeramente rugosas y grafitosas -Goteos rápidos y chorros	Pes/Pev	I-II	2	2	45	15	9	24-40	175	45	4	66	13	10	4	3	4	4	4	4	50	Media - III	1.497E-05
5	K1 + 300-K1+ 555	-Dureza moderada a baja -Muy fracturada a fracturada y foliada. -Rellenos de carbonatos y sulfuros y rellenos de arcilla ocasionales -Diaclasas y foliaciones cerradas -Sistemas continuos -Superficies onduladas, ligeramente rugosas y grafitosas -Goteos rápidos	Pev/Pes	III-I	2	2	45	15	9	24-40	280	45	4	66	20	15	6	3	4	4	4	4	64	Buena - II	1.047E-06
6	K1 + 555-K1+ 715	-Duras a Muy Duras -De masivos a fracturados y foliados -Rellenos de carbonatos entre diaclasas y ocasionalmente rellenos de arcilla dura. -Sistemas cerrados a ligeramente abiertos -Sistemas poco continuos - Superficies ligeramente onduladas y ligeramente rugosas -Goteos rápidos y chorros	Pev	I	2	2	45	10	6	40	291	45	7	82	20	10	4	3	4	4	4	4	60	Media - III	2.239E-06
7	K1 + 715-K2+ 145	-Duras a muy Duras -De fracturadas a ligeramente fracturadas -Rellenos de carbonatos en forma de vena -Sistemas de diaclasas cerradas y ocasionalmente abiertas -Planos de foliación subhorizontales -Moderadamente espaciadas a bajo espaciamiento -Superficie ligeramente rugosa y ondulada -Sistemas poco continuos -Goteos rápidos y chorros	Pes	I	2	2	45	10	9	24	257	45	7	82	17	10	4	4	3	7	4	4	60	Media - III	2.239E-06
8	K2 + 145-K2+ 450	-Moderadamente dura a dura -Roca ligeramente alterada de foliada a muy foliada y fracturada -Rellenos de cuarzo, ocasionalmente de arcilla y superficies grafitosas -Diaclasas abiertas -Superficie ondulada y ligeramente rugosa -Goteos lentos y goteos rápidos	Pes	I y II	2	2	45	10	12	24	244	45	7	82	17	10	4	4	3	4	4	4	57	Media - III	3.959E-06
9	K2 + 450-K2+ 683	-Moderadamente dura a dura -Roca de foliada a fracturada -Presencia de cuarzo y sulfuros entre los planos de foliación. -Superficies grafitosas -Superficie ligeramente rugosa y ondulada -Goteos lentos y goteos rápidos	Pes/Pev	II y I	2	2	45	15	12	24-40	202	45	7	66	13	10	3	4	3	4	4	4	52	Media - III	1.024E-05
10	K2 + 683-K3+ 87	-Duras a muy Duras -Fracturadas a ligeramente fracturadas y foliadas -Carbonatos entre planos de diaclasas y foliación -Sistemas poco continuos y planos -Superficie ligeramente rugosa y ondulada -Goteos rápidos	Pev/Pes	I	2	2	45	15	10	24-40	240	45	7	66	13	10	6	4	3	4	4	4	55	Media - III	5.790E-06
11	K3 + 87-K3+ 652	-Esquistos duros a moderadamente duros -De fracturados a foliados, ocasionalmente grafitosos -Rellenos de cuarzo y calcopinita, ocasionalmente de arcilla blanda -Sistemas de diaclasamiento ligeramente abiertos a abiertos -Superficie ligeramente rugosa y ondulada -Goteos rápidos y chorros	Pev	I	2	2	45	10	10	40	273	45	6	82	17	10	6	3	3	4	1	4	54	Media - III	7.001E-06
12	K3 + 652-K3+ 888	-Esquistos de duros a muy duros -Fracturados a ligeramente foliados -Rellenos con la presencia de carbonatos y sulfuros, ocasionalmente oxidación -Sistemas discontinuos -Diaclasas ligeramente abiertas a cerradas -Superficies onduladas y ligeramente rugosas -Goteos lentos y goteos rápidos	Pev/Pes	III, II	2	2	45	7	10	24-40	66	45	7	92	20	10	6	3	3	3	2	7	61	Buena - II	1.852E-06
13	K3 + 888-K4+ 15	-Esquistos moderadamente duros a duros -De foliadas a fracturadas -Rellenos arcillosos y limo-arcillosos y superficies de oxidación -Sistemas de diaclasamiento abiertos a ligeramente abiertos -Superficie ligeramente rugosa y ondulada -Sistema continuo -No se reportan infiltraciones	Pev	III	2	2	45	7	10	40	36	45	7	92	20	15	4	3	3	3	2	15	72	Buena - II	2.290E-07

TRAMO 1		TRAMO 2	
DESCRIPCION		DESCRIPCION	
COBERTURA MÁXIMA	80	COBERTURA MÁXIMA	80
Nivel Piezometrico m	39.5	Nivel Piezometrico m	74.5
Permeabilidad Macizo - (m/seg)	1.70E-05	PERMEABILIDAD - (m/seg)	2.95E-05
LITOLOGIA	Esquistos verdes	LITOLOGIA	Esquistos verdes
GSI	54	GSI	56
PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244	PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244
ESFUERZO VERTICAL (MPa)	2.22	ESFUERZO VERTICAL (MPa)	2.22
Relacion K	1	Relacion K	1

**Excavacion en roca sin revestimiento**



**Excavacion en roca sin revestimiento**

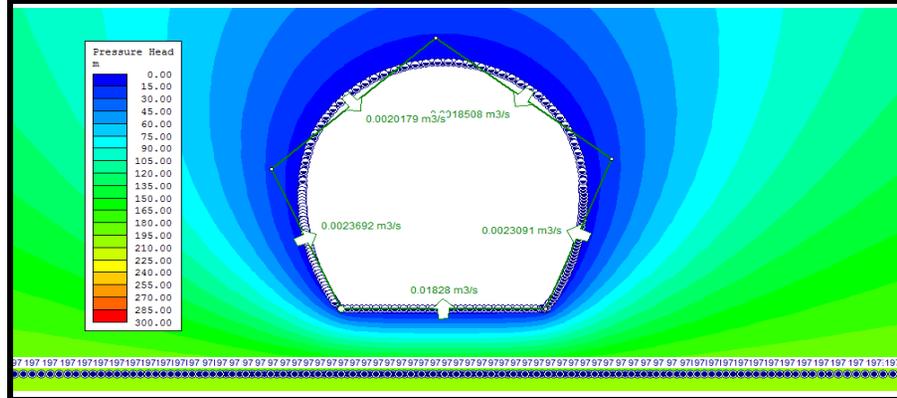


TRAMO 3		TRAMO 4	
DESCRIPCION		DESCRIPCION	
COBERTURA MÁXIMA	129	COBERTURA MÁXIMA	160
Nivel Piezometrico m	120	Nivel Piezometrico m	140
PERMEABILIDAD - (m/seg)	4.55E-04	PERMEABILIDAD - (m/seg)	1.01E-04
LITOLOGIA	Esquistos verdes	LITOLOGIA	Esquistos verdes
GSI	59	GSI	51
PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244	PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244
ESFUERZO VERTICAL (MPa)	3.57	ESFUERZO VERTICAL (MPa)	4.43
Relacion K	1	Relacion K	1
<b>Excavacion en roca sin revestimiento</b>		<b>Excavacion en roca sin revestimiento</b>	

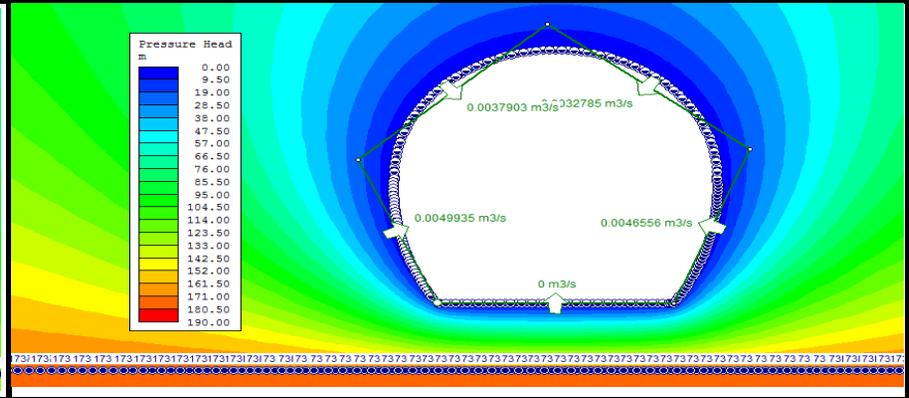
TRAMO 5		TRAMO 6	
DESCRIPCION		DESCRIPCION	
COBERTURA MÁXIMA	260	COBERTURA MÁXIMA	271
Nivel Piezometrico m	230	Nivel Piezometrico m	190
PERMEABILIDAD - (m/seg)	1.38E-04	PERMEABILIDAD - (m/seg)	8.01E-05
LITOLOGIA	Esquistos verdes	LITOLOGIA	Esquistos verdes
GSI	52	GSI	59
PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244	PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244
ESFUERZO VERTICAL (MPa)	7.20	ESFUERZO VERTICAL (MPa)	7.51
Relacion K	1	Relacion K	1
<b>Excavacion en roca sin revestimiento</b>		<b>Excavacion en roca sin revestimiento</b>	

TRAMO 7		TRAMO 8	
DESCRIPCION		DESCRIPCION	
COBERTURA MÁXIMA	215	COBERTURA MÁXIMA	210
Nivel Piezometrico m	197	Nivel Piezometrico m	173
PERMEABILIDAD - (m/seg)	3.01E-05	PERMEABILIDAD - (m/seg)	6.67E-05
LITOLOGIA	Esquistos verdes	LITOLOGIA	Esquistos verdes
GSI	57	GSI	55
PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244	PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244
ESFUERZO VERTICAL (MPa)	5.96	ESFUERZO VERTICAL (MPa)	5.82
Relacion K	1	Relacion K	1

**Excavacion en roca sin revestimiento**

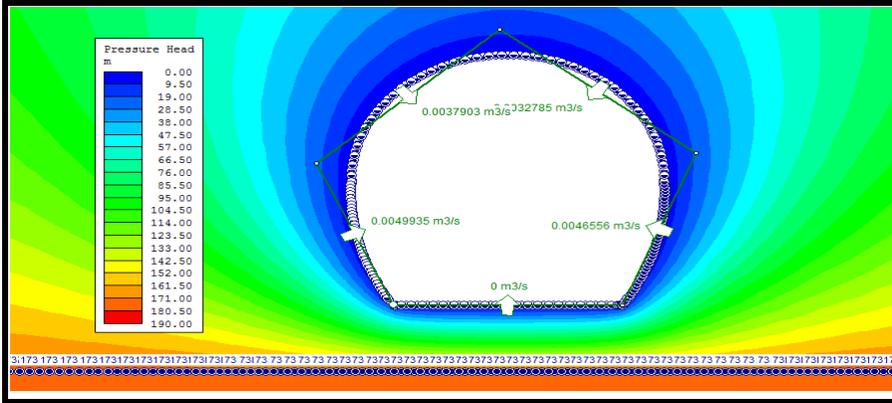


**Excavacion en roca sin revestimiento**

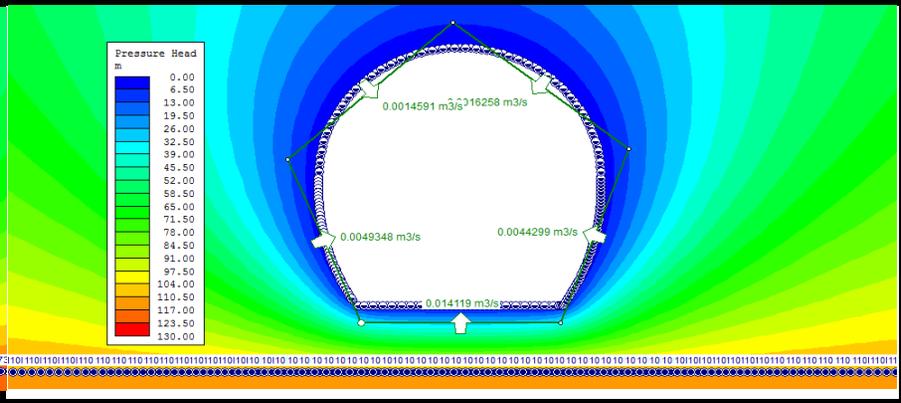


TRAMO 9		TRAMO 10	
DESCRIPCION		DESCRIPCION	
COBERTURA MÁXIMA	160	COBERTURA MÁXIMA	195
Nivel Piezometrico m	160	Nivel Piezometrico m	110
PERMEABILIDAD - (m/seg)	3.20E-06	PERMEABILIDAD - (m/seg)	4.35E-05
LITOLOGIA	Esquistos verdes	LITOLOGIA	Esquistos verdes
GSI	51	GSI	53
PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244	PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244
ESFUERZO VERTICAL (MPa)	4.43	ESFUERZO VERTICAL (MPa)	5.40
Relacion K	1	Relacion K	1

**Excavacion en roca sin revestimiento**

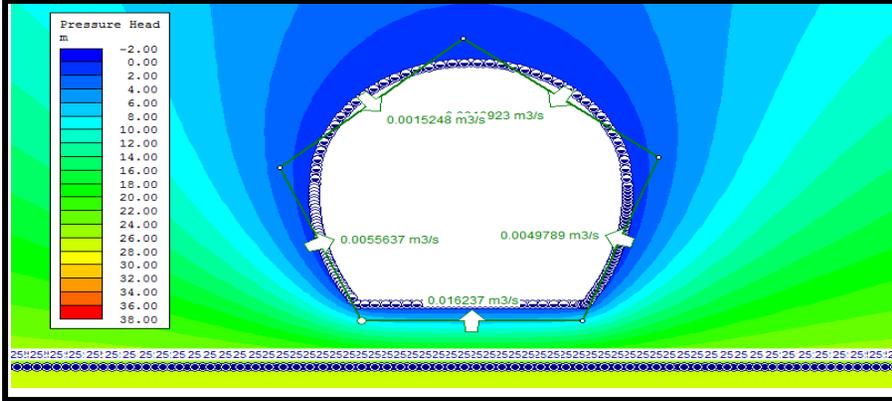


**Excavacion en roca sin revestimiento**

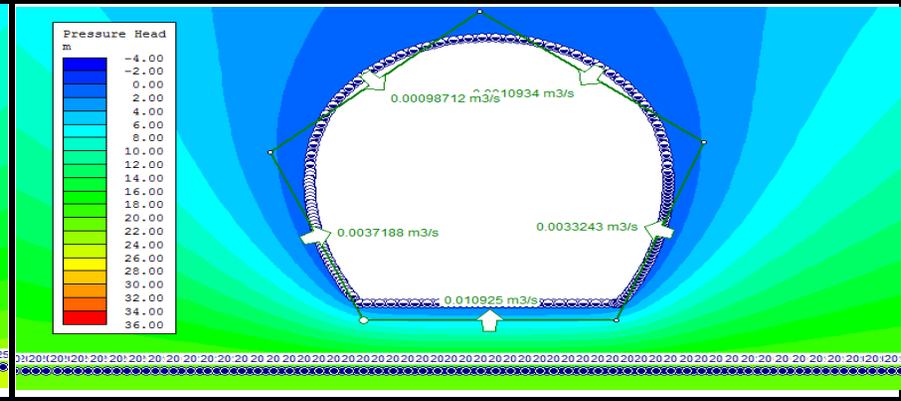


TRAMO 11		TRAMO 12	
DESCRIPCION		DESCRIPCION	
COBERTURA MÁXIMA	211	COBERTURA MÁXIMA	45
Nivel Piezometrico m	25	Nivel Piezometrico m	20
PERMEABILIDAD - (m/seg)	2.20E-04	PERMEABILIDAD - (m/seg)	1.77E-04
LITOLOGIA	Esquistos verdes	LITOLOGIA	Esquistos verdes
GSI	52	GSI	52
PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244	PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244
ESFUERZO VERTICAL (MPa)	5.84	ESFUERZO VERTICAL (MPa)	1.25
Relacion K	1	Relacion K	1

**Excavacion en roca sin revestimiento**



**Excavacion en roca sin revestimiento**

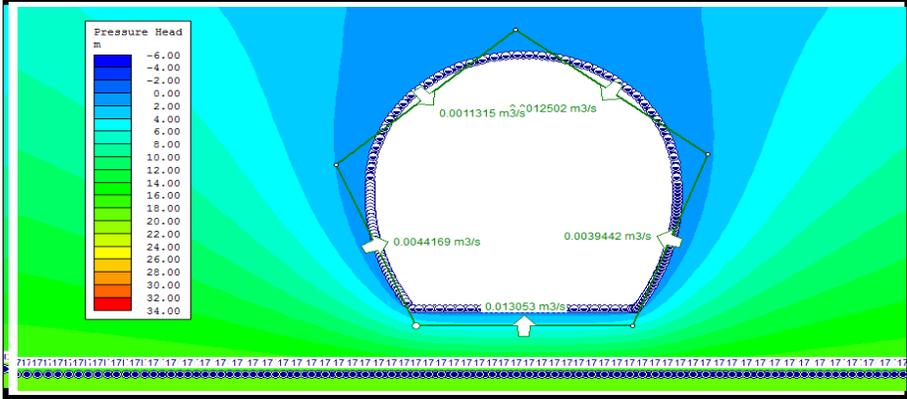


**TRAMO 13**

**DESCRIPCION**

COBERTURA MÁXIMA	25
Nivel Piezometrico m	17
PERMEABILIDAD - (m/seg)	2.60E-04
LITOLOGIA	Esquistos verdes
GSI	60
PESO UNITARIO (MN/m3)	0.0244
ESFUERZO VERTICAL (MPa)	0.69
Relacion K	1

**Excavacion en roca sin revestimiento**



# **CASOS HISTORICOS NACIONALES**

**FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION**

**Tunelcolombia - 0001**

**DATOS GENERALES**

<b>PROYECTO</b>	Túneles Machotes
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Túnel vial - Bidireccional
<b>AÑO</b>	2013
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura paredes curvas

<b>LOCALIZACIÓN</b>	Primavera - Medellín / Antioquia
<b>PENDIENTE</b>	5%
<b>COBERTURA (m)</b>	20 a 25
<b>LONGITUD (m)</b>	103 a 123

**DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION**

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	La Geología del área se compone suelos residuales espesos del Miembro Volcánico de la Formación Quebradagrande (Kivqg), correspondiente a rocas volcánicas con intercalaciones de grauwacas, limolitas y chert. En el área donde se excavarán los túneles se presentan rasgos geomorfológicos controlados por las estructuras resultantes de los procesos tectónicos recientes, del tipo de litología, así como de la intensidad con la que actúan los procesos geodinámicos externos.
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Mesozoico
<b>TIPO DE ROCA</b>	Grawaca, limolitas
<b>ORIGEN DE LA ROCA</b>	Volcánicas / Sedimentaria
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	5
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	10
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Rocas blandas y materiales tipo suelo
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Materiales poco consolidados, rocas blandas y suelos.
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Excavación mecánica con equipo excavador
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Concreto lanzado reforzado con fibra o malla metálica (donde se requiera), arcos de acero estructura arcos metálicos tipo HEB-140, I y micro pilotes auto perforantes según lo especificado.
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto de 280 kg/cm <sup>2</sup> , malla electro soldada de 8,5 mm con cuadrícula de 10cm x 15cm en doble parrilla



**CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA**

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Materiales no consolidados, rocas blandas y suelos, múltiples zonas con posibilidad para el almacenamiento e infiltración de agua, de acuerdo a recargas y aportes en superficie
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	No se reporta
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	2.88E-06
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Inyecciones cementicias y de consolidación del terreno, Enfilajes y micro pilotes
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Drenajes longitudinales y perimetrales al túnel.
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Membranas de geo textil PVC, capas de concreto lanzado de 50 mm
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Humedecimiento y goteos esporádicos



**COMENTARIOS GENERALES**

Los túneles Machotes forman parte del proyecto de la "CONSTRUCCIÓN DE LA SEGUNDA CALZADA PRIMAVERA (PR95+000) – CAMILO C, corresponde al segundo sector diseñado del proyecto en el Km. 8+887 al Km. 9+010 donde finaliza la salida del túnel y continúa la calzada. Este proyecto muestra una solución a los problemas de movilidad. La impermeabilización se realizó mediante la colocación de geotextil de protección y membrana de PVC impermeabilizante, para preparar la superficie se colocó una capa de concreto lanzado de 0,05 ms de espesor con lo cual se eliminó las irregularidades de la superficie dando cumplimiento que la relación entre el diámetro y la profundidad de las irregularidades no será menor de 5:1. La superficie a ser impermeabilizada se preparó con una textura suave, de manera que no presentó protuberancias, irregularidades y/o cárcavas. Para colocar el geotextil de protección y la membrana de PVC impermeabilizante se garantizó una superficie libre de elementos corto punzantes como varillas, alambres, puntas de pernos de anclaje o platinas; estos elementos fueron cortados y cubiertos con la última capa de concreto neumático. Las franjas de geotextil fueron fijadas perimetralmente a la superficie del concreto lanzado o gunita, utilizando discos de PVC (estoperoles), anclados por tecnofijación los cuales fueron ubicados en relación de hasta 4 por metro cuadrado dependiendo la condición de irregularidad de la superficie, garantizando siempre la estabilidad de la membrana de PVC. Las franjas siguientes de geotextil se traslaparon 10 ms aproximadamente. El geotextil fue colocado de manera que se cubrió en su totalidad las paredes del túnel, desde la clave hasta los drenajes laterales. Las características del geotextil un material No Tejido NT7000 de 500gr/m<sup>2</sup>, Membrana PVC de señalización de 2mm, Geo dren vial de 1m de altura y tubería d=200mm.

**Fuente y referencias Bibliográficas**

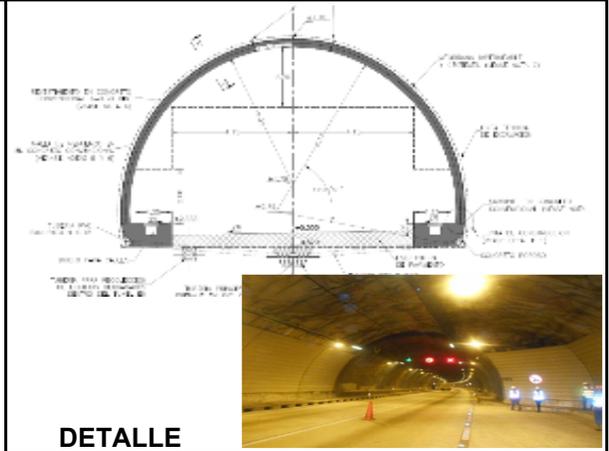
La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. <http://www.pavco.com.co/2111/proyecto-de-impermeabilizacion-de-tuneles-sector-kachotis>, Interventoría INVIAS. ACTOS. Memorias XI Seminario de túneles, Bogotá - Octubre de 2016.

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Sumapaz	LOCALIZACIÓN	Melgar
OBRA SUBTERRÁNEA	Vial	PENDIENTE	2%
AÑO	2006 - 2016	COBERTURA (m)	1000
TIPO DE SECCIÓN	Herradura paredes Curvas	LONGITUD (m)	4200

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Geológicamente el área se encuentran depósitos del Cretáceo, compuestos principalmente por arenisca con intercalaciones de limolitas, lidita, lutitas y arcillolitas y rocas del Terciario como areniscas conglomeraticas y conglomerados, cubiertas en algunos sectores por coluviones compuestos por grandes bloques de arenisca en una matriz areno - arcillosa. Las estructuras geológicas del sector corresponden a anticlinales y sinclinales amplios, dislocados por dos fallas denominadas la Falla de Quininí y la Falla de Melgar. La primera divide prácticamente el área en dos grandes bloques: el bloque oriental, conformado por arenisca del Grupo Guadalupe que buzanan hacia el occidente con ángulos promedio de 35° a 45°; en el contacto con la falla se presentan buzamientos suaves en rocas de la Formación Villeta.	
EDAD DE LA ROCA	Cretácico y Terciario	
TIPO DE ROCA	Conglomerados, coluviones, limolitas, arcillolitas, liditas, Areniscas	
ORIGEN DE LA ROCA	Sedimentarias	
ALTURA TUNEL (m)	8	
ANCHO TUNEL (m)	10.8	
ALTERACION DEL MACIZO	Sin Información	
TIPO DE TERRENO		
METODO DE EXCAVACION	Arcos metálicos, concreto lanzado reforzado con fibras y malla electrosoldada, en tramos específicos, y pernos metálicos	
MEDIDAS DE SOPORTE	Perforación y Voladura	
REVESTIMIENTO	Concreto convencional, en nichos paneles metálicos y membrana impermeabilizante	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	La características del conglomerado y roca arenisca presentan características para el almacenamiento y transmisión del agua subterránea, presentando en el túnel fenómenos de goteo y humedad localizadas.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-07	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	3.57E-05	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Pernos localizados en zonas alteradas del túnel y portales	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Tubería longitudinal de PVC diámetro 0.15 m	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Membrana impermeabilizante y geo textil	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Humedad, goteos y filtraciones en los 100 m iniciales del túnel	

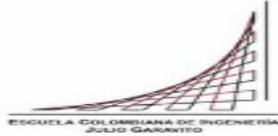


### COMENTARIOS GENERALES

El túnel cuenta con dos carriles de 3.65 m de ancho cada uno, un ancho de calzada de 0.5 m a cada lado, andenes de 1.25 m de ancho a lo largo de ambos carriles, Gálibo mínimo de 4.60 m. El soporte empleado consistió principalmente en arcos metálicos, concreto lanzado reforzado con fibras y malla electro soldada, en tramos específicos, y pernos metálicos. En cortos tramos del Túnel se requirió la construcción de solera curva debido al comportamiento las deformaciones registradas, con lo cual se buscó cerrar el anillo de la sección y la estabilidad de la misma. El Sistema de Impermeabilización y Revestimiento del túnel, consiste en un sistema conformado por una Membrana Impermeable y Geo textil fijados con anclajes siguiendo la geometría de la sección del túnel, y revestimiento en concreto convencional de espesor mínimo de 0.30 m. Además, presenta fisuras en el revestimiento los primeros 100 m, por filtración de agua y debido a la falta de impermeabilización en este tramo.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. ANI, 2015. Inspección y diagnostico Túnel de Sumapaz.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0003

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Las Juntas	LOCALIZACIÓN	Sutatenza, Boyacá
OBRA SUBTERRÁNEA	Vial / Carretera	PENDIENTE %	5
AÑO	1960 - 1981	COBERTURA (m)	Sin información
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con Paredes y solera Recta	LONGITUD (m)	206

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Arenisca cuarzosa gris oscura, dura, intercalada con Lutitas laminada, de la formación las Juntas	
EDAD DE LA ROCA	Cretácico Temprano	
TIPO DE ROCA	Sedimentarias	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Poco alterado, fisuras, agrietamiento y descompresión parcial del macizo.	
TIPO DE TERRENO	Rocas blandas	
METODO DE EXCAVACION	Excavación Mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Arcos tipo HE 200 B separados cada metro, auto soporte en roca	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado	



#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Filtraciones localizadas en los planos y contactos de la roca, zonas de discontinuidades, que se pronuncian en puntos esporádicos del túnel y periodos invernales.	
NIVEL FREATICO (m)	No se reportan	
PERMEABILIDAD (m/s)	No se reportan	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	No se reportan	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se reportan	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	No se cuenta con medidas de manejo de agua, se conduce por desnivel a través de la vía del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto lanzado	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos puntuales y filtraciones en zonas del túnel	

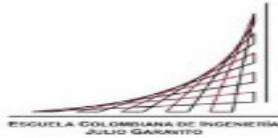


#### COMENTARIOS GENERALES

En zona de portales se presenta deslizamientos rotacionales, en el túnel se observan bloques de roca y cunas que deberán ser retirados por tareas desbombe. Se instaló pavimento rígido y medidas de iluminación las cuales funcionan parcialmente.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. ANI. Túneles concesión Transversal del Sisga. INVIAS. (2010). Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0004

#### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel El Volador	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Macanal / Sutatenza, Boyacá
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Vial / Carretera	<b>PENDIENTE %</b>	5
<b>AÑO</b>	1960 - 1981	<b>COBERTURA (m)</b>	Sin información
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura con Paredes y solera Recta	<b>LONGITUD (m)</b>	206

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Lutitas negra laminada, dura en bancos de hasta 90 cm de espesor, con intercalaciones de arenisca dura, color negro y gris. Arenisca cuarzosa con cemento silíceo y cuarzo arenitas de 1 a 3 m de espesor, fracturada y sana, con intercalaciones de lutitas laminadas, dura y sana.		
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Cretácico Temprano		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentarias		
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	6		
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	8		
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Poco alterado, fisuras, agrietamiento y descompresión parcial del macizo.		
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas blandas		
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Excavación Mecánica, perforación y voladura		
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Arcos tipo HE 200 B separados cada metro, auto soporte en roca		
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto lanzado		

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Filtraciones localizadas en los planos y contactos de la roca, zonas de discontinuidades, que se pronuncian en puntos esporádicos del túnel y periodos invernales.		
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	No se reportan		
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	No se reportan		
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	No se reportan		
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	No se reportan		
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	No se cuenta con medidas de manejo de agua, se conduce por desnivel a través de la vía del túnel		
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Concreto lanzado		
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Goteos puntuales y filtraciones en zonas del túnel		

#### COMENTARIOS GENERALES

Se instalo pavimento rígido y medidas de iluminación las cuales funcionan parcialmente.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016. ANI. Túneles concesión Transversal del Sisga. INVIAS. (2010). Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS

**FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION**

Tunelcolombia - 0005

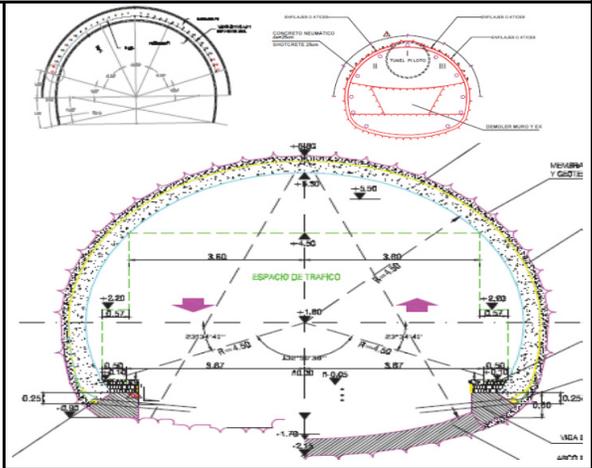
**DATOS GENERALES**

<b>PROYECTO</b>	Túnel Buenavista	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Bogotá - Villavicencio
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Túnel vial	<b>PENDIENTE</b>	2.6
<b>AÑO</b>	1995 - 2002	<b>COBERTURA (m)</b>	650
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura paredes curvas, con anillo de solera en tramos	<b>LONGITUD (m)</b>	4520

**DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION**

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Se encuentran rocas con un metamorfismo bajo, paquetes arcillosos esquistosos de coloración azul y verdosas, cuarcitas y conglomerados cuarcíticos, lutitas negras, areniscas. Las estructuras que se encuentran en este sector se encuentran relacionadas a la historia tectónica regional del oriente colombiano que formó un cinturón plegado de la cordillera oriental y sistemas de fallas asociados a estas estructuras	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Paleozoicas, cretácicas, terciarias y cuaternarias de origen sedimentario	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentarias / Metamórficas	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	4.6	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	7.34	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Material descompuesto, rocas fisuradas.	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas blandas y poco consolidadas	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y Voladura / Excavación mecánica	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Concreto neumático 28 mpa, segunda capa de concreto con malla electro soldada, arcos de acero, inyecciones de consolidación y mejoramiento del macizo con soluciones cementicias.	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto Hidráulico	

**CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA**

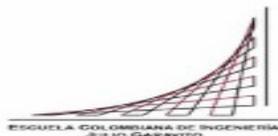
<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Se presentan rocas sedimentarias de tipo arenisca, del Grupo Guadalupe y la Formación Cacho, que contienen acuíferos de tipo confinado con flujos de agua importantes, con capacidades de 1.0 y 2.0 l/s/m., como se mencionó anteriormente, especialmente en las cercanías de la falla de tipo inverso ubicada cercana al portal SE del túnel del Boquerón, que pone en contacto la Formación Chipaque con el Grupo Guadalupe, en donde las areniscas son más friables y presentan mayor fracturamiento.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin Información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-05	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	5.09E-05	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Se utilizaron morteros sellantes con la adición de arena a las lechadas para inyecciones ya probadas. Enfilajes: son tubos de acero de diámetro 4" y longitud de 12 m	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Sistema de drenaje en tubería de PVC Perforada, alojada en concreto poroso sin finos, longitudinal y en los hastiales del túnel, cajas de inspección y sumideros	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Membrana impermeabilizante de geotextil, recubierta por concreto Neumático de 28 Mpa como soporte Inicial	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Chorros, humedad y goteos continuos, se conducen por canales a superficie.	

**COMENTARIOS GENERALES**

La obra subterránea se inició el 19 de Octubre de 1995 y se culminó en Julio de 2002, se encuentra en las coordenadas de los Portales; 1031503m.E, 987184 m.N / 1047920 m.E, 947627m.N, se diseñó, excavo y construyo bajo los parámetros del método NATM, la cual estableció una velocidad de deformación o del desplazamiento en cualquier punto de la periferia del túnel, en la zona a revestir, fuera menor a 2 mm por mes. El sector del túnel de Buenavista presenta dificultades del manejo de aguas y es así como el túnel existente presentó demoras importantes en la construcción debido a la presencia de aguas subterráneas especialmente en el portal en frente de Villavicencio. En el túnel se implementaron tecnologías para llevar a cabo: la inyección de consolidación, el sostenimiento de la excavación de las diferentes clases de terreno por medio del concreto proyectado, el revestimiento final de concreto hidráulico, las inyecciones de contacto y la construcción de las diferentes partes que componen el pavimento y los andenes. Inyección y lechadas cementantes. Con este sistema se consolidó el frente y se ejecutaron Enfilajes perforados para ayudar a la inyección, al drenaje y al pre soporte, acompañados de una galería piloto para ayudar en los trabajos de drenaje e inyección. También se utilizaron morteros sellantes con la adición de arena a las lechadas para inyecciones ya probadas. Enfilajes: son tubos de acero de diámetro 4" y longitud de 12 m, inyectados con mortero de cemento que se colocaron antes de ejecutar la excavación a fin de evitar caídas de material durante este proceso y para protección de la misma en zonas de alto riesgo. Se utilizaron 45.350 ton de cemento tipo III y 4.300 ton de cemento tipo I, repartidas entre: los Enfilajes, las inyecciones para pernos, la consolidación y contacto; 26.074 m3 de concreto proyectado; 70.769 m3 de revestimiento en concreto hidráulico; y 13.215 m3 de concretos en pavimentos. Para a construcción e instalación de los diferentes elementos de la sección fue colocada la formaleta diseñada especialmente para la sección del túnel, con una longitud útil de 9 m y con dispositivos de ampliación para las zonas de nichos de parqueo. La formaleta estaba dotada con bocas de llenado de 5" de diámetro, ventanas de inspección y vibrado y una red de vibradores neumáticos.

**Fuente y referencias Bibliográficas**

La información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. NOTICRETO. Túnel de Buenavista. Numero 66, Bogotá, abril de 2003.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

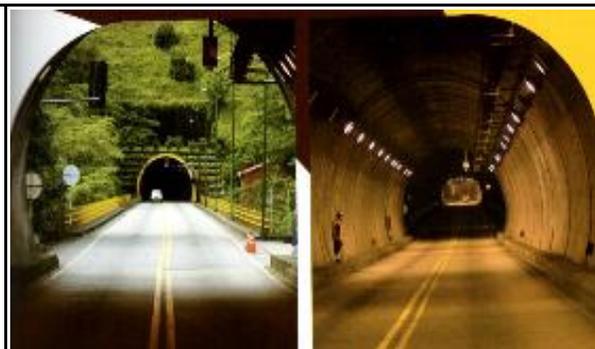
Tunelcolombia - 0006

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Bijagual	LOCALIZACIÓN	Pipiral - Villavicencio
OBRA SUBTERRÁNEA	Vial	PENDIENTE %	2.6
AÑO	1995 - 2002	COBERTURA (m)	Sin información
TIPO DE SECCIÓN	Herradura paredes Curvas	LONGITUD (m)	185

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Rocas metamórficas y sedimentarias de los periodos paleozóico inferior al terciario. Cruza fallas geológicas como las de Maizaro, Mirador y Buenavista.	
EDAD DE LA ROCA	Paleozoicas, cretácicas, terciarias y cuaternarias de origen sedimentario	
ORIGEN DE LA ROCA	Sedimentarias / Metamórficas	
ALTURA TUNEL (m)	4.9	
ANCHO TUNEL (m)	7.5	
ALTERACION DEL MACIZO	Material descompuesto, rocas fisuradas.	
TIPO DE TERRENO	Rocas blandas y poco consolidadas	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica	
MEDIDAS DE SOPORTE	Concreto neumático, malla electro soldada, arcos de acero.	
REVESTIMIENTO	Concreto formaleteado	



#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	El macizo presenta formaciones rocosas con permeabilidad de primer y segundo grado, fracturamiento, estas condiciones sumadas al microclima de precipitaciones abundante, hacen que la zonas sea rica en agua y que existan afloramientos de aguas sobre las vertientes rocosas.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-05	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.62E-04	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Sin Información	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Sistema de drenaje en tubería de PVC Perforada, alojada en concreto poroso sin finos, longitudinal y en los hastiales del túnel, cajas de inspección y sumideros	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Membrana impermeabilizante de geotextil, recubierta por concreto Neumático.	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Humedad y goteos puntuales	

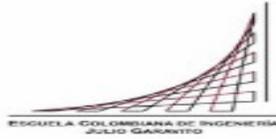


#### COMENTARIOS GENERALES

Calzada existente. Construido por el INVIAS. Ancho de calzada 7.50 m. Gálibo de 4.90 m. Revestido en concreto convencional. Pavimento en concreto hidráulico. Tráfico bidireccional. Velocidad de diseño 60 km/h.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0007

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Pozo Azul	LOCALIZACIÓN	Bogotá - Guateque, Guateque - Yopal
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretera	PENDIENTE %	6.5
AÑO	1960 -1981	COBERTURA (m)	
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	290

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Tipo de Roca Lutitas negra laminada en bancos de hasta 1 m de espesor, de la formación Las Juntas (B3j).	
EDAD DE LA ROCA	Cretácico Temprano	
ORIGEN DE LA ROCA	Sedimentarias	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Poca alteración, zonas con alto fracturamiento pero sin evidencias de desplazamiento.	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras y fracturadas	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, arcos de acero HE 200B, concreto como revestimiento	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado en sectores puntuales, en mayor medida el túnel no presenta revestimiento	



DETALLE

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Posible infiltración en las juntas de roca, zonas fracturadas, condicionado por las precipitaciones características climáticas, el macizo presenta zonas filtración puntual en la zonas de los portales	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se realizaron	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	No se cuenta con medidas de manejo de agua, se conduce por desnivel a través de la vía del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto lanzado	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos localizados en dos sectores entre los arcos, aledaño a la zona de portales	

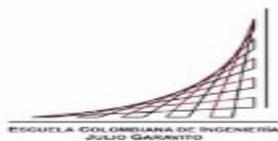


#### COMENTARIOS GENERALES

En la actualidad el portal no presenta estabilidad, sin embargo durante la excavación del túnel presento fenómenos de deslizamientos. La sección del túnel es de 42 m2, tiene iluminación en algunos tramos, no posee andenes. Requiere medidas de manejo donde se encuentran los arcos, se presenta corrosión y deterioro, mejorar el sistemas de señalización y seguridad del túnel.

##### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sisga.HSEQ Cualitas.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0008

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel El Infierno	LOCALIZACIÓN	Gararoga - Macanal
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretera	PENDIENTE %	6.5
AÑO	1981 - 1983	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	488

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Lutitas negra laminada en bancos de hasta 90 cm con algunas intercalaciones de arenisca gris oscura en capas medias y dura. Hacia la zona de portales se presenta material coluvial escasamente consolidado.	
EDAD DE LA ROCA	Cretácico Temprano	
ORIGEN DE LA ROCA	Sedimentarias / Depósitos Recientes	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Zonas con alto fracturamiento, formación de cuñas, Hacia las zonas donde la roca está expuesta se observan áreas intensamente fracturadas y planos desfavorables/	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras y fracturadas, en portales rocas alteradas.	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Autosoporte, arcos de acero HE 200B, concreto como revestimiento	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado en sectores puntuales, en mayor medida el túnel no presenta revestimiento	

DETALLE

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

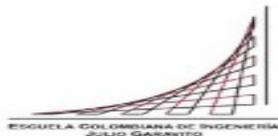
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Posible infiltración en las juntas de roca, zonas fracturadas, condicionado por las precipitaciones características climáticas, el macizo presenta zonas filtración puntual en la zonas de los portales	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se realizaron	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	No se cuenta con medidas de manejo de agua, se conduce por desnivel a través de la vía del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto lanzado	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos localizados en la clave y hastiales del túnel	

### COMENTARIOS GENERALES

El túnel presenta fenómenos de corrosión en la zona de arcos y tacos de madera, además en el revestimiento en concreto lanzado. En uno de los tramos del túnel se observa el concreto lanzado agrietado y fisurado.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. INVIAS. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sisga.HSEQ Qualitas.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0009

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel El Trapiche	LOCALIZACIÓN	Macanal
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretera	PENDIENTE %	5
AÑO	1960 - 1981	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	90

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El deposito se encuentra sobre la formación lutitas de Macanal, compuesto en Lutitas silíceas negras, sanas, muy dura, potentes en capas de hasta 1 metro de espesor, macizo fracturado	
EDAD DE LA ROCA	Cretácico Temprano	
ORIGEN DE LA ROCA	Sedimentarias / Depósitos Recientes	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Macizos fracturados, generación de cuñas y bloques en tramos del túnel.	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras y fracturadas, en portales rocas alteradas.	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, arcos de acero HE 200B, concreto como revestimiento	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado en sectores puntuales, en mayor medida el túnel no presenta revestimiento	

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

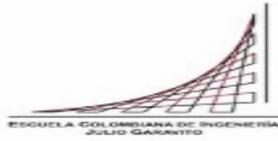
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Posible infiltración en las juntas de roca, zonas fracturadas, condicionado por las precipitaciones características climáticas, el macizo presenta zonas filtración puntual en la zonas de los portales	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se realizaron	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	No se cuenta con medidas de manejo de agua, se conduce por desnivel a través de la vía del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto lanzado	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos localizados, en general el cuerpo del túnel se presenta humedad	

#### COMENTARIOS GENERALES

Se encuentran familias de juntas que intersectan el túnel generando cunas invertidas hacia la clave de la bóveda, en general la excavación se encuentra estable, de acuerdo a inspecciones consultadas.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sigsa.HSEQ Qualitas.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0010

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel El Ventarrón	LOCALIZACIÓN	Macanal
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretera	PENDIENTE %	5.5
AÑO	1960 - 1981	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	612

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Formación Geológica Santa Rosa, compuesta por depósitos de lodolitas, arcillolitas negras, bien estratificadas y laminadas, meteorizadas, fracturadas de resistencia media.	
EDAD DE LA ROCA	-	
ORIGEN DE LA ROCA	Sedimentarias / Depósitos Recientes	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Rocas blandas, alteradas y en tramos materiales fracturados. Alta meteorización de la roca hacia los portales.	
TIPO DE TERRENO	Rocas blandas y alteradas	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica.	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, arcos de acero HE 200B, concreto como revestimiento	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado	



DETALLE

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Posible infiltración en las juntas de roca, zonas fracturadas, condicionado por las precipitaciones características climáticas, el macizo presenta zonas filtración puntual en la zonas de los portales	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se realizaron	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	No se cuenta con medidas de manejo de agua, se conduce por desnivel a través de la vía del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Manejo del agua, sin medidas de manejo del agua de infiltración	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	El cuerpo del túnel presenta filtraciones generalizadas, con goteos considerables en la zona de arcos, en las claves y hastiales, el estado general del túnel es húmedo.	

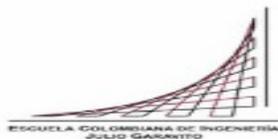


#### COMENTARIOS GENERALES

El macizo en general en las inspecciones visuales se encuentra estable, sin embargo esta altamente fracturado, en las intercalaciones de lutitas laminada que al momento de realizar procesos de perfilacion o desabombe podrían caer.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sigsa.HSEQ Qualitas.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0011

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel El Salitre	LOCALIZACIÓN	Macanal
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretera	PENDIENTE %	4
AÑO	1960 - 1981	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	634

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Materiales de la formación Santa Rosa, la cual se encuentra estratificada en láminas delgadas, fracturadas y medianamente meteorizadas. Compuesta por depósitos de lodolitas silíceas negras, estratificadas en láminas delgadas, fracturada y plegada, sana y muy dura, intercalada con arenisca negra, sana, muy dura, en capas potentes de 60 cm.	
EDAD DE LA ROCA	-	
ORIGEN DE LA ROCA	Sedimentarias / Depósitos Recientes	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	El macizo se encuentra fracturado, húmedo, pero se encuentra sano y buenas condiciones de resistencia	
TIPO DE TERRENO	Macizo fracturado y húmedo	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, arcos de acero HE 200B, concreto como revestimiento	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado	

DETALLE

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

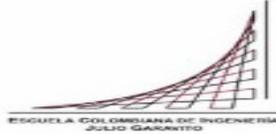
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Posible infiltración en las juntas de roca, zonas fracturadas, condicionado por las precipitaciones características climáticas, el macizo presenta zonas filtración puntual en la zonas de los portales	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se realizaron	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	No se cuenta con medidas de manejo de agua, se conduce por desnivel a través de la vía del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Manejo del agua, sin medidas de manejo del agua de infiltración	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	El cuerpo del túnel presenta filtraciones generalizadas, con goteos considerables en la zona de arcos, en las claves y hastiales, el estado general del túnel es húmedo.	

### COMENTARIOS GENERALES

El macizo en general en las inspecciones visuales se encuentra estable, sin embargo esta altamente fracturado. Se encuentra caída de pequeños bloques y tamaños de grava, el macizo es general estable. Presenta filtraciones generalizadas, en varios sectores de los arcos. Hacia la zona de los portales no se observan fenómenos de inestabilidad.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sigsa.HSEQ Qualitas.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0012

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel El Polvorín	LOCALIZACIÓN	Santa María
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretero	PENDIENTE %	6.5
AÑO	1950 - 1960	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	1640

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Materiales de la formación Santa Rosa, compuesta por limolitas silíceas negras, sanas, muy duras, potentes, fracturadas, intercaladas con depósitos de lodolitas estratificadas, sanas y fracturadas.	
EDAD DE LA ROCA	Paleozoico Superior	
ORIGEN DE LA ROCA	Sedimentarias / Depósitos Recientes	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	El macizo se encuentra fracturado, húmedo, sano	
TIPO DE TERRENO	Macizo fracturado y húmedo	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporte, arcos de acero HE 200B, concreto como revestimiento	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado	



DETALLE

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Infiltraciones en las zonas de juntas e infiltración hacia las zonas de los portales, en general el macizo del túnel presenta humedad y goteos.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m <sup>3</sup> /seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se realizaron	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	No se cuenta con medidas de manejo de agua, se conduce por desnivel a través de la vía del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Manejo del agua, sin medidas de manejo del agua de infiltración	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	El cuerpo del túnel presenta humedad, con goteos en la zona de arcos, el estado general del túnel es húmedo.	

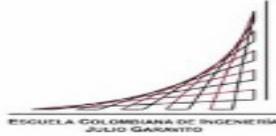


#### COMENTARIOS GENERALES

El macizo en general en las inspecciones visuales se encuentra estable, en inspecciones realizadas se encontraron arcos inclinados y deformados, además de un deterioro debido a las infiltraciones, también caída y fenómenos de graneos.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sigsa.HSEQ Qualitas.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0013

### DATOS GENERALES

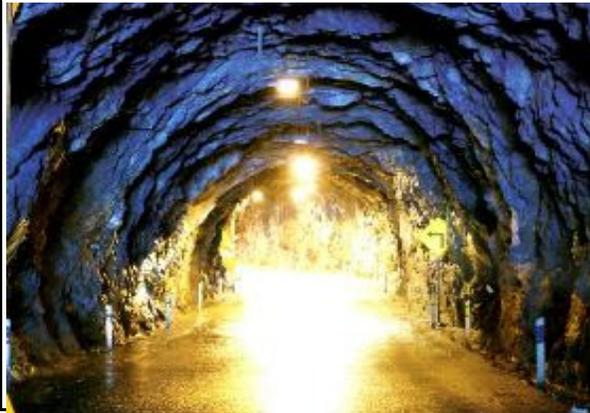
PROYECTO	Túnel La Esmeralda	LOCALIZACIÓN	Santa María
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretera	PENDIENTE %	7
AÑO	1960 - 1981	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	400

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Limolitas sílicea, verde y gris sana, muy dura, fracturada en bancos potentes, intercalada menormente con lodolitas sílicea negra, muy dura.	
EDAD DE LA ROCA	-	
ORIGEN DE LA ROCA	Rocas Sedimentaria - Formación Farallones	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Rocas fracturadas, muy duras, con humedad y goteos intermitentes	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras fracturadas	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, arcos de acero HE 200B, hacia los portales un túnel falso en concreto de 1 m de espesor, Spilling hacia la clave del túnel.	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado, roca natural	

DETALLE

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

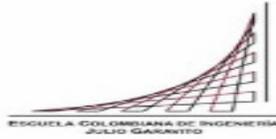
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Infiltraciones en las zonas de juntas e infiltración hacia la zonas de los portales, en general el macizo del túnel presenta humedad y goteos.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Mejoramiento del contorno de la excavación Spilling hacia la clave del túnel	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	No se cuenta con medidas de manejo de agua, se conduce por desnivel a través de la vía del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Manejo del agua, sin medidas de manejo del agua de infiltración	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Los goteos son importantes y se presentan en general en toda la longitud del túnel, tanto en la clave como en los hastiales. Hacia la mitad se observan chorros, el túnel en general se presenta con humedad.	

### COMENTARIOS GENERALES

El macizo en general se ve estable, se presenta planos desfavorables que pueden provocar fenómenos de fallas planares, hay caída de pequeños bloques y granos de gravilla, que se encuentran acumulados hacia los costados de la excavación. Presenta una estructura de túnel falso en concreto reforzado con longitud de 15 m y de espesor de 1 m, luego con tramos en concreto lanzado y roca natural expuesta. Los portales no evidencian inestabilidades.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sisga.HSEQ Qualitas.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0014

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel Presa	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Santa María
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Carretera	<b>PENDIENTE %</b>	6.5
<b>AÑO</b>	1960 - 1981	<b>COBERTURA (m)</b>	-
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura con paredes y solera recta	<b>LONGITUD (m)</b>	475

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Limolitas sílicea, verde y gris sana, muy dura, fracturada en bancos potentes, intercalada menormente con lodolitas sílicea negra, muy dura.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	-	
<b>ORIGEN DE LA ROCA</b>	Rocas Sedimentaria - Formación Farallones	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	6	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	8	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Rocas fracturadas, muy duras, con humedad y goteos importantes	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas duras fracturadas	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Excavación mecánica, perforación y voladura	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Auto soporté, arcos de acero HE 200B, hacia los portales un túnel falso en concreto de 1 m de espesor, Spilling hacia la clave del túnel.	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto lanzado, roca natural	

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

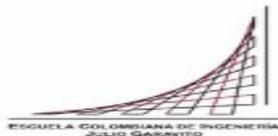
<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Infiltraciones en las zonas de juntas e infiltración hacia la zonas de los portales, en general el macizo del túnel presenta humedad y goteos.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin Información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin Información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	Sin Información	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Mejoramiento del contorno de la excavación Spilling hacia la clave del túnel	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Canalización y tubería del agua direccionada por el desnivel de la vía.	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Manejo del agua, sin medidas de manejo del agua de infiltración	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Los goteos son importantes, incluso chorros y se presentan en general en toda la longitud del túnel, en la clave como en los hastiales	

### COMENTARIOS GENERALES

Hacia uno de los portales se presenta un chorro producto de la caída de un manantial, el cual se encuentra encauzado. Los portales no evidencian fenómenos de inestabilidad, sin embargo debido al flujo permanente de agua se podrían generar bloques potenciales en avenidas torrenciales. Posee señalización vertical hacia los portales y el cuerpo del túnel, banderines reflectivos hacia los hastiales cada 10 m.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sisga.HSEQ Cualitas.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0015

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Pluma de Agua	LOCALIZACIÓN	Santa María
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretero	PENDIENTE %	6.5
AÑO	1960 - 1981	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	770

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

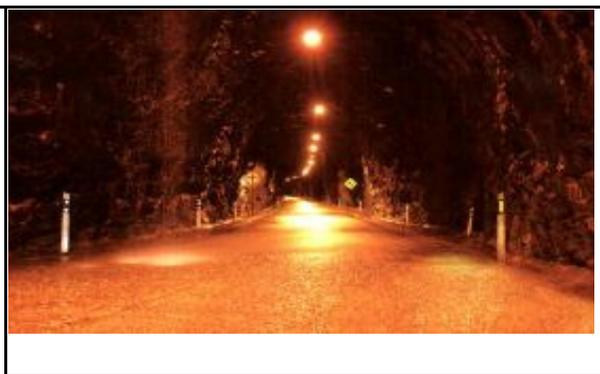
DESCRIPCION GEOLOGICA	Arenita silíceas gris, sana, muy dura, fracturada, en bancos potentes de hasta 1.5 m	
EDAD DE LA ROCA	-	
ORIGEN DE LA ROCA	Rocas Sedimentaria - Formación Farallones	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Se encuentran planos de roca desfavorables hacia el túnel, las cuales no presentan movimiento.	
TIPO DE TERRENO	Roca dura, fracturada	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Concreto reforzado con espesor de 1m por tramos, Arcos HE200B	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado, roca natural	



DETALLE

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Infiltraciones en las zonas de juntas e infiltración hacia las zonas de los portales, en general el macizo del túnel presenta humedad y goteos.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m <sup>3</sup> /seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Sin Información	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Canalización y tubería del agua direccionada por el desnivel de la vía.	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Manejo del agua, sin medidas de manejo del agua de infiltración	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Los goteos son importantes, incluso chorros hacia los sectores cercanos a la salida, el túnel presenta humedad en general.	

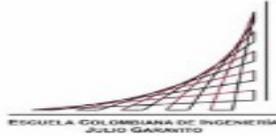


#### COMENTARIOS GENERALES

Hacia la zona de los portales se observan evidencias de fenómenos de remoción en masa, reptación, deslizamientos superficiales con vegetación inclinada y cicatrices en el terreno. Hacia el portal se encuentran tramos revestidos en concreto con ancho de 2 m, las zonas de los arcos presenta corrosión y los tacos de madera se encuentran podridos. Sobre el portal de entrada se encuentran manantiales, con un caudal importante, el cual es canalizado.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sigsa.HSEQ Qualitas.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0016

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Cascada	LOCALIZACIÓN	Santa María
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretero	PENDIENTE %	5.5
AÑO	1960 - 1981	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	420

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Arenita silíceas gris, sana, muy dura, fracturada, en bancos potentes, intercaladas con limolitas silíceas grises y verdosas, sanas y duras	
EDAD DE LA ROCA	-	
ORIGEN DE LA ROCA	Rocas Sedimentaria - Formación Farallones	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Se encuentran planos de roca desfavorables hacia el túnel, las cuales no presentan movimiento.	
TIPO DE TERRENO	Roca dura, fracturada	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, pernos de anclaje, arcos de acero HE160A	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado, roca natural	

DETALLE

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

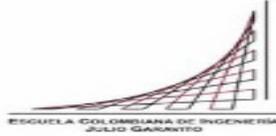
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Infiltraciones en las zonas de juntas e infiltración hacia la zonas de los portales, en general el macizo del túnel presenta humedad y goteos.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Sin Información	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Manejo y desnivel en la vía, hacia la salida de los túneles.	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Manejo del agua, sin medidas de manejo del agua de infiltración	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Los goteos son importantes, incluso chorros, los goteos son intermitentes en la clave y constantes en toda la longitud hacia los hastiales.	

#### COMENTARIOS GENERALES

Los portales no evidencian fenómenos de inestabilidad, el pavimento se encuentra rígido con algunas fisuras, con luminarias intermitentes, con medidas de soporte por tramos, en arcos, pernos, concreto lanzado y auto soporte. Los arcos presentan fenómenos de corrosión, vegetación y tacos podridos.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Siga.HSEQ Qualitas.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0017

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Moyas	LOCALIZACIÓN	Santa María
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretero	PENDIENTE %	6.5
AÑO	1960 - 1981	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	350

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Lodolitas síliceas laminadas, grises, sanas, muy duras y fracturadas.	
EDAD DE LA ROCA	-	
ORIGEN DE LA ROCA	Rocas Sedimentaria - Formación Farallones	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Macizo húmedo, poco alterado, con musgo y vegetación superficial, fenómenos de cunas localizadas y estables	
TIPO DE TERRENO	Roca dura, fracturada y con humedad\	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, arcos de acero HE160A, concreto convencional	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado, roca natural	

DETALLE

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

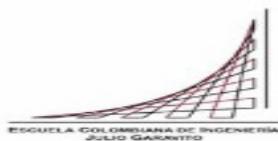
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Infiltraciones en las zonas de juntas e infiltración hacia la zonas de los portales, en general el macizo del túnel presenta humedad y goteos.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Sin Información	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Manejo y desnivel en la vía, hacia la salida de los túneles.	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Manejo del agua, sin medidas de manejo del agua de infiltración	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Los goteos son importantes, en las juntas de la zona de protección de los portales, hacia la longitud del túnel se observa húmedo	

### COMENTARIOS GENERALES

Las cunas localizadas se encuentran estables debido a la alta resistencia de la roca y entre las discontinuidades, la zona de ventanas han sido selladas con materiales de la excavación. El túnel presenta luminarias, con señalización en su longitud, pavimento rígido en buenas condiciones.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Siga.HSEQ Qualitas.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0018

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Muros I	LOCALIZACIÓN	Santa María
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretero	PENDIENTE %	6.5
AÑO	1960 - 1981	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	134

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Limolitas sílicea verde, sana, muy dura, masiva, fracturada, intercalada con arenisca sílicea sana, muy dura potente	
EDAD DE LA ROCA	-	
ORIGEN DE LA ROCA	Rocas Sedimentaria - Formación Farallones	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Macizo húmedo, roca dura	
TIPO DE TERRENO	Roca dura, fracturada y con humedad\	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporte	
REVESTIMIENTO	Roca natural	

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

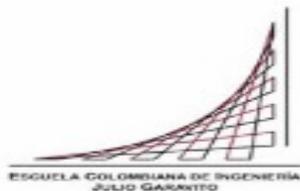
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Infiltración en la zona de juntas y diaclasas del cuerpo de roca.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Sin Información	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Manejo y desnivel en la vía, hacia la salida de los túneles.	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Manejo del agua, sin medidas de manejo del agua de infiltración	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Los goteos son importantes, en toda la longitud del túnel, en general húmedo.	

#### COMENTARIOS GENERALES

Se presentan grandes bloques y cuñas que se encuentran trabadas, que podrían caer en el momento de mantenimiento y desabombe, no cuenta con señalización, el tipo de pavimento es rígido.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sigsa.HSEQ Qualitas.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelcolombia - 0019

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Muros II	LOCALIZACIÓN	Santa María
OBRA SUBTERRÁNEA	Carretero	PENDIENTE %	6.5
AÑO	1960 - 1981	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura con paredes y solera recta	LONGITUD (m)	350

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Limolitas silíceas verdes, sana, muy dura, masiva, fracturada	
EDAD DE LA ROCA	-	
ORIGEN DE LA ROCA	Rocas Sedimentaria - Formación Farallones	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	8	
ALTERACION DEL MACIZO	Macizo húmedo, roca dura	
TIPO DE TERRENO	Roca dura, fracturada y con humedad	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, revestimiento en concreto de 1 m de espesor, arcos HE200B	
REVESTIMIENTO	Roca natural, revestimiento en concreto	

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Infiltración en la zona de juntas y diaclasas del cuerpo de roca.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Sin Información	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Manejo y desnivel en la vía, hacia la salida de los túneles.	
CAUDAL	Sin Información	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Manejo del agua, sin medidas de manejo del agua de infiltración	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos importantes, chorros en la longitud del túnel, en la clave y hastiales, en general se presenta húmedo	

#### COMENTARIOS GENERALES

Se presentan grandes bloques y cunas que se encuentran trabadas, que podrían caer en el momento de mantenimiento y desabombe. Los portales no presentan fenómenos de inestabilidad, presenta pavimento rígido con algunas fisuras, no tiene iluminación y escaso mantenimiento.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

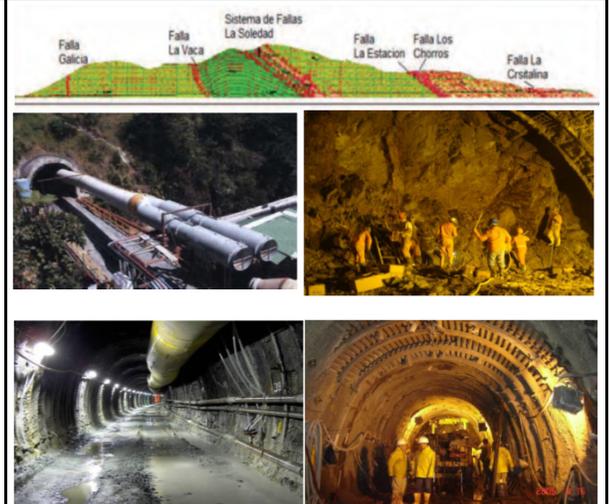
La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 82. Informe de Inspección - Túneles de Concesión Transversal del Sisga.HSEQ Qualitas.

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel de la Línea	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Quindío / Tolima
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Vial - Túnel Piloto	<b>PENDIENTE %</b>	1
<b>AÑO</b>	2004 - 2016	<b>COBERTURA (m)</b>	850
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura con paredes y solera curva	<b>LONGITUD (m)</b>	8763

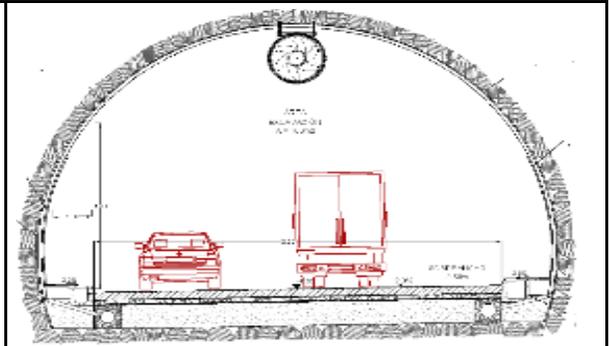
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Está constituida por rocas metamórficas de edad paleozoica correspondientes al Complejo Cajamarca, rocas vulcano-sedimentarias de edad cretácea correspondientes al Complejo Quebradagrande y rocas ígneas de edad terciaria, todas éstas cubiertas en superficie por depósitos piroclásticos de edad cuaternaria. Desde el punto de vista de la geología estructural, se anticipa que el túnel atravesará varias fallas y zonas de cizallas activas.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Cretáceo / Terciario / Cuaternario	
<b>ORIGEN DE LA ROCA</b>	Ígneo / Metamórfico / Sedimentario	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	4.4	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	10.5	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Rocas milonitizadas, fracturadas, en mayoría, además se presenta macizos rígidos y continuos moderadamente fracturados en una parte del túnel.	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas duras, fracturadas con múltiples zonas filtración	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura, excavación mecánica.	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Pernos de anclaje de 3 m, Arco de acero TH 21, malla de acero q2 y q6. Capas reforzado con fibras de Polipropileno en espesor de 35 cm	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto Lanzado y formateado, espesor entre 5 a 25 cm	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	El macizo esta conformado por unidades hidrogeológicas de características disimiles, las características acuíferas están dadas en su mayor parte por el fracturamiento de las rocas, las cuales se clasificarían como materiales impermeables. Los acuíferos cuaternarios no son importantes debido a su extensión, los cuales se concentran en los sectores aledaños a los ríos. Las zonas contiguas a las zonas de fallas corresponden en áreas de mayor conductividad hidráulica.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	682.5	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-07	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	2.28E-05	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	En tramos refuerzo del anillo de roca con pernos de anclaje y refuerzo al contorno de la excavación	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Zanjas longitudinales, cajas de inspección, desniveles	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Sistemas de impermeabilización en concreto, membranas y sistemas de recubrimiento.	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Chorros y goteos continuos en tramos en sectores de la excavación	



### COMENTARIOS GENERALES

La finalidad del proyecto fue disminuir los tiempos de tráfico vehicular, a una velocidad promedio en el túnel de 60 Km/hor. El Túnel ha sido excavado desde 2 frentes: el portal inferior, llamado Galicia o portal Quindío 883730m.E, 989546m.N, inicia a 11 kilómetros de la ciudad de Calarcá, departamento del Quindío, y El portal superior, llamado Bermellón o portal Tolima 983605m.N, 839768m.E, se encuentra a 37.8 kilómetros de la ciudad de Ibagué. A la fecha el proyecto se encuentra en fase de construcción.

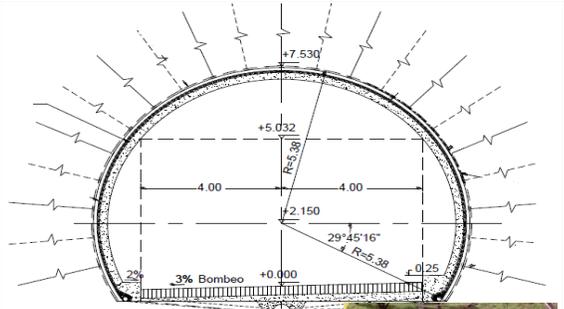
### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Referencias túneles de Colombia, biblioteca Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Gil, Juan. Cuantificación y evaluación del uso potencial de las aguas de infiltración del Túnel de la Línea. Bogotá - 2004. Universidad de los Andes. Pérez, Diana. Propuesta Técnica para la determinación del comportamiento en excavaciones subterráneas con base en un túnel exploratorio: Caso. Túnel de la Línea. Universidad Nacional de Colombia, Medellín - 2012. Cámara Colombiana de Infraestructura, informes de visitas técnicas, Bogotá - 2011. ANLA. Resolución 523 de 2012, cuando se imponen medidas adicionales al proyecto Túnel de la Línea.

#### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel de Boquerón - Argelino Duran Quintero	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Bogotá - Villavicencio
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Vial - Bidireccional	<b>PENDIENTE %</b>	206
<b>AÑO</b>	1999 - 2005	<b>COBERTURA (m)</b>	390
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura Paredes Rectas cortas con solera plana o curva	<b>LONGITUD (m)</b>	2405

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	El túnel atraviesa paquetes de Arcillolita, arenisca y lutitas, cubiertas casi en su mayor parte por suelos orgánicos y residuales, y materiales no consolidados como depósitos fluvio-glaciares y coluviales	  
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Terciario a Cretáceo	
<b>ORIGEN DE LA ROCA</b>	Rocas arcillosas, areniscas. Grupo Guadalupe y arenisca de Chipaque	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	4.60	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	8.00	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Macizos meteorizados y muy fracturados, rocas blandas, depósitos no consolidados.	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Macizos buenos a muy pobres que requieren medidas de soporte y mejoramiento	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura, excavación mecánica	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Concreto neumático reforzado con fibras metálica, espesor de 40 cm, malla electro soldada, pernos, arcos metálicos TH21, micro pilotes y Jetgrouting.	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto Formaleteado	

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	El corredor se encuentra sobre rocas paleozoicas y del Jurásico que corresponden a esquistos, filitas y cuarcitas de baja permeabilidad y sobre rocas del cretácico que se agrupan en formaciones de areniscas y/o de lutitas principalmente. Además, se encuentran rocas terciarias de composición también predominantemente areniscas o lutítica. Por último, los suelos cuaternarios que recubren el sustrato terciario y cretácico pueden presentar un elevado contenido arcilloso (cuando proceden de la alteración y transporte de las formaciones más lutítica) o bien presentar un predominio de arenas y gravas, sobre todo cuando se trata de suelos aluviales.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	6.65281E-05	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Fortalecimiento del contorno y anillo de roca adyacente a la excavación por medio de pernos de anclaje de 4 m de longitud	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Tubría principal de drenaje con micro cementó	
<b>CAUDAL (m3/hor/m) *</b>	Sin información	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Membranas impermeabilizantes, concreto neumático	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Sin información	

#### COMENTARIOS GENERALES

El túnel cruza el sistema montañoso conocido como el Boquerón - Chipaque, el túnel atraviesa diferentes tipos de terreno muy bueno a malo. La sección total de excavación fue acometida sobre terrenos tipo 3, 4 y 5. El volumen total de excavación fue de aproximadamente 350.000 m<sup>3</sup>. Para la entibación o sostenimiento se dispuso de dos lanzadoras de concreto proyectado por vía húmeda provistas de brazo robot, así como de dos plataformas elevadoras para la colocación de la malla electro soldada, inyección y colocación de pernos. **Diseño del Concreto Lanzado:** Cemento: 430 kg Río Claro Tipo III  
 Aditivos: • Plastiment BV-40 (7 cm<sup>3</sup>/kg cemento, dosificado en planta) • Plastiment RMX (2 cm<sup>3</sup>/kg cemento, dosificado planta. Para portal entrada) • Sigunit L-22 (3.0% del peso del cemento dosificado en obra), Asentamiento antes de aditivos fluidificantes: 2" Asentamiento después de fluidificantes: 6"  
 Relación A/C: 0.41 .

#### Fuente y referencias Bibliográficas

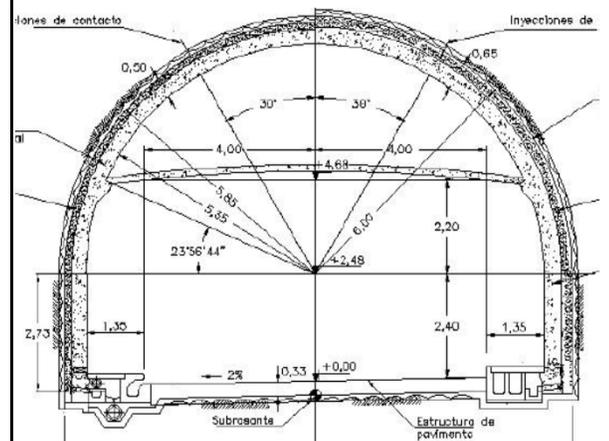
La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Referencias túneles de Colombia, biblioteca Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.. ANI. Consultoría especializada para le estructuración de concesiones viales por grupos de carretera. Proyecto 2 – Doble Calzada, Bogotá – Villavicencio, sectores 1 y 3. Bogotá, Febrero de 2013. INVIAS. Los Túneles Carreteros de Colombia. Bogotá: INVIAS, pag 86. SIKA. Túnel el Boquerón, revista Sika noticias. DCT-SN-50-01-2000

## DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel de Occidente - Fernando Gómez	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Medellín - Antioquia
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Vial	<b>PENDIENTE %</b>	2.25
<b>AÑO</b>	1996 - 2006	<b>COBERTURA (m)</b>	600
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura paredes rectas	<b>LONGITUD (m)</b>	4603

## DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	La excavación se desarrolló sobre rocas ígneas del cretáceo y sobre rocas metamórficas del paleozoico, que se encuentran cubierto por depósitos de materiales coluviales y suelos residuales, el túnel atraviesa zonas de esfuerzo, cizallamiento.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Cretáceo y paleozoico	
<b>ORIGEN DE LA ROCA</b>	Rocas ígneas y metamórficas, dioritas, granodioritas, esquistos, cuarzo sericíticos, cuarcitas, filitas y calizas marmolíticas	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	8	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	12	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Por tramo alterado a muy alterado, roca masiva y de buena calidad en algunos sectores	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas duras, fracturadas en algunos sectores meteorizada	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>		
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Malla electro soldada, arco metálico TH21, pernos de anclaje 4 m de longitud, concreto neumático 15 cm de espesor	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto Convencional, 40 cm de espesor	



DETALLE

## CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	La hidrogeología esta influenciada por la alteración del terreno, las discontinuidades asociadas al tipo de roca y sistema de fallas, las cuales son sistemas de canales subterráneos que son recargados por los depósitos de materiales no consolidados y las precipitaciones.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	582.5	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	1.738E-05	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Reforzamiento del terreno circundante a la excavación por medio de pernos	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Conducción de las aguas perimetrales, cunetas y zanjas longitudinales, tanques colectores y desnivel	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Membranas y geotextiles impermeabilizantes	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Goteos, chorros y humedad localizada	



## COMENTARIOS GENERALES

El proyecto atraviesa la divisoria de aguas entre la quebrada la Iguaña, tributaria del río Medellín, y la quebrada la Frisola, tributaria del río Cauca. Su diseño, ajustado a las exigencias de comodidad y seguridad, se construyó en herradura con paredes rectas cortas, con un ancho de calzada de 8,0 m con andenes laterales de 1,35 m y un gálibo vertical de 4,60 m de acuerdo al tráfico bidireccional propuesto para el túnel. Entre 2006 a 2009 los portales del túnel requirieron obras de estabilización y manejo del agua, con la instalación de tubos drenantes hacia la montaña, bombeo y revestimiento de los taludes en concreto lanzado. El túnel se encuentra 50% revestido

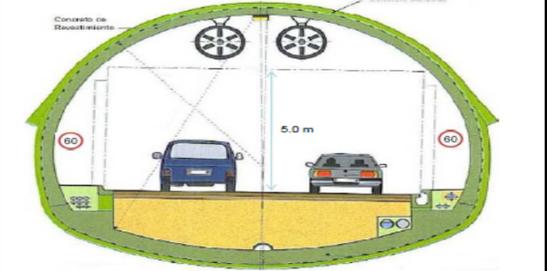
### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Referencias túneles de Colombia, biblioteca Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. <https://prezi.com/mxju7fmzjj7f/proyecto-vial-aburra-rio-cauca-tunel-de-occidente/>

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Seminario	LOCALIZACIÓN	Rionegro - Antioquia
OBRA SUBTERRÁNEA	Vial	PENDIENTE %	5.8
AÑO	2014 - 2017	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura paredes curvas, con solera curva en tramos	LONGITUD (m)	786.5

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Geológicamente, el túnel transcurre en su totalidad por el cuerpo del Gabro de San Diego, con un 70% de su longitud bajo material saprolítico y un 30% en roca, los depósitos corresponden a depósitos de suelo meteorizado de las anfibolitas de Medellín, el cual cubre la mayor parte de la zona de estudio; la segunda unidad es la que representa el suelo residual del Stock de Samarcanda, ambas unidades tienen espesores inferiores a los 100 m y se encuentran ubicadas en la parte superior del modelo. Las otras tres unidades restantes corresponden a las anfibolitas de Medellín, al Stock de Samarcanda y las fallas de mayor incidencia en el alineamiento del túnel.	 
EDAD DE LA ROCA	Las edades de estas unidades van desde el Cretáceo inferior hasta el Cuaternario.	
ORIGEN DE LA ROCA	Rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas	
ALTURA TUNEL (m)	5	
ANCHO TUNEL (m)	11.48	
ALTERACION DEL MACIZO	Roca fracturada y moderadamente alterada, y materiales no consolidados.	
TIPO DE TERRENO	Rocas fracturadas, blandas y suelos	
METODO DE EXCAVACION	Excavación por equipos mecánicos	
MEDIDAS DE SOPORTE	Refuerzo sistemático de pernos de roca BAL8 de 5,0 m de longitud espaciados cada 2,0 m en sistema tresbolillo, concreto lanzado reforzado con fibra de 0,05 m de espesor, en tramos sistemas tipo sombrilla de 12 m, traslapados 4 m, reforzado con arcos de acero separados cada metros.	
REVESTIMIENTO	Concreto convencional	

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Las características hidrogeológicas del terreno vienen marcadas por la estructura geológica y litológica, la estratificación del macizo rocoso o sedimentario, la presencia de discontinuidades, fallas o diaclasas, o bien el desarrollo de certificaciones, en función de su naturaleza geológica. Cuando la permeabilidad se debe a la presencia de grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como por disolución de la matriz, se habla de acuíferos fisurados o cársticos. Normalmente, se originan en macizos rocosos de calizas, dolomitas, o bien de areniscas, esquistos, granitos y basaltos.	 
NIVEL FREÁTICO (m)	440	
PERMEABILIDAD (m/s)	3.70E-08	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.40E-05	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Sistema tipo sombrilla, con inyecciones de resinas cementicias para fortalecimiento de la excavación. En Preinyecciones y postinyecciones.	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Perforaciones de drenaje y despresurización en el frente de avance, longitud de 12 m, zanjas y cunetas colectoras.	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Membranas en polipropileno, concreto lanzado en capas	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Filtraciones y goteos puntuales en zonas de fallas y cizallamiento activo	

#### COMENTARIOS GENERALES

Las características de los depósitos donde se excavara el túnel, de acuerdo a las perforaciones exploratorias realizadas a lo largo del alineamiento del túnel, se atravesaron cinco tipos de terrenos, desde suelos, rocas blandas y fracturadas. De acuerdo a las condiciones del terreno se podrá excavar en una sola etapa en macizos buenos, con avances máximos de 10,0 m antes de completar la instalación del sistema de soporte, hasta cortes en varias etapas en macizos pobres, con avances máximos de 1.5 m. Los sistemas tipo sombrilla (forepoling) se instalarán para sostener el techo previamente al avance en materiales de baja cohesión, deleznable y/o de roca muy fracturada y alterada.

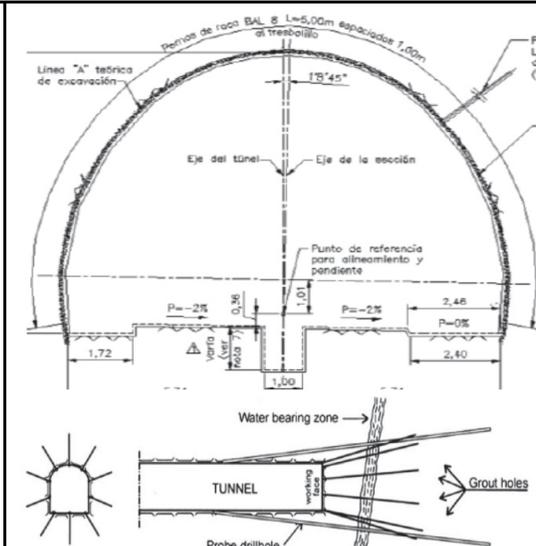
#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gobernación Antioquia, Audiencia Publica Túneles Oriente, Santuario - 2011. Concesión Túnel Aburra Oriente. Estudio de Impacto Ambiental Actualizado, capítulo 2 y 3, Medellín - 2013. GEODATA. Complementación de estudios Componente Hidrogeológico Túneles Seminario y Santa Elena. Julio de 2013

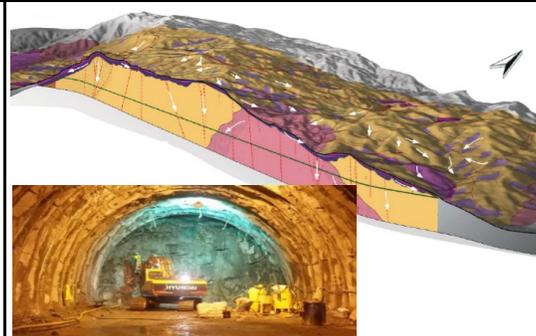
**DATOS GENERALES**

<b>PROYECTO</b>	Túnel Santa Helena	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Rionegro - Antioquia
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Vial	<b>PENDIENTE %</b>	2.25
<b>AÑO</b>	2014 - 2017	<b>COBERTURA (m)</b>	469
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura paredes curvas, con solera curva en tramos	<b>LONGITUD (m)</b>	8200

**DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION**

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Los terrenos sobre los que se desarrolla el corredor vial están constituidos por diversos materiales, que incluyen rocas metamórficas; rocas ígneas ultra básicas, básicas, intermedias y ácidas; un conjunto litológico complejo afectado tectónicamente y denominado como "zona de cabalgamiento"; y depósitos recientes no litificados de varios tipos.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Las edades de estas unidades van desde el Cretáceo inferior hasta el Cuaternario.	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	5	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	11.48	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Roca dura masiva, fracturada en algunos tramos.	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Roca dura, moderadamente fracturada, en zonas de portales materiales blandos y sueltos alterados y en tramos roca fracturada, cizallada y meteorizada.	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura, excavación por equipos mecánicos	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Auto soporté de la roca, pernos de anclaje en cunas localizadas, concreto lanzado reforzado con fibra. En tramos, Refuerzo sistemático de pernos de roca BAL8 de 5,0 m de longitud espaciados cada 2,0 m en sistema tresbolillo, concreto lanzado reforzado con fibra de 0,05 m de espesor.	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto convencional	

**CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA**

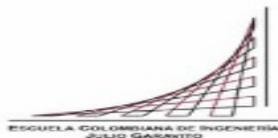
<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Este macizo ha sido definido como un bloque cordillerano conformado en su mayoría por rocas plutónicas y metamórficas, tectónicamente activo y en proceso de erosión (Botero, 1963), fenómenos dominantes para la modelación del relieve actual, en la cual han contribuido significativamente la profunda meteorización de las rocas y un abundante régimen de lluvias. Entre las rocas plutónicas que conforman esta parte del macizo deben mencionarse las pertenecientes al Batolito Antioqueño, al Stock de Samarcanda y al Stock de San Diego. Entre las rocas metamórficas se destacan las Anfibolitas de Medellín que incluyen variaciones a neis y esquistos.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	440	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	2.2561E-05	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Sistema tipo sombrilla, con inyecciones de resinas cementicias para fortalecimiento de la excavación. En Preinyecciones y pos inyecciones.	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Perforaciones de drenaje y despresurización en el frente de avance, longitud de 12 m, zanjas y cunetas colectoras.	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Membranas en polipropileno, concreto lanzado en capas	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Filtraciones y goteos localizados	

**COMENTARIOS GENERALES**

El túnel atraviesa sistema de fallas y roca descompuesta o muy fracturada, cizallada, triturada y milonitizada, de resistencia blanda, con un RQD menor del 10%, las cuales requerirán inyecciones de consolidación y mejoramiento del terreno, estas inyecciones, a diferentes presiones, realizan un sellado de las fisuras presentes y los caminos por donde puede fluir el agua de infiltración, logrando conformar una barrera en el perímetro del túnel formando un sello y lográndose el objetivo de conservar el estado de equilibrio natural de estas aguas en el macizo rocoso y disminuir el ingreso de agua al túnel. Las características de los depósitos donde se excavara el túnel, de acuerdo a las perforaciones exploratorias realizadas a lo largo del alineamiento del túnel, se atravesaran cinco tipos de terrenos, desde suelos, rocas blandas y fracturadas, la secciones para del túnel consistirán en dos tubos. Se inyecta, a muy alta presión, un micro cementó especial traído de Alemania. Con eso obturan todas las fisuras que hay en la montaña por donde se filtra el agua.

**Fuente y referencias Bibliográficas**

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016, <http://www.elcolombiano.com/antioquia/excavaciones-del-proyecto-tunel-de-oriente-llegan-a-4-6-km-FB4102531>. Gobernación Antioquia, Audiencia Pública Túneles Oriente, Santuario - 2011. Concesión Túnel Aburra Oriente. Estudio de Impacto Ambiental Actualizado, capítulo 2 y 3, Medellín - 2013. GEODATA. Complementación de estudios Componente Hidrogeológico Túneles Seminario y Santa Elena. Julio de 2013



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

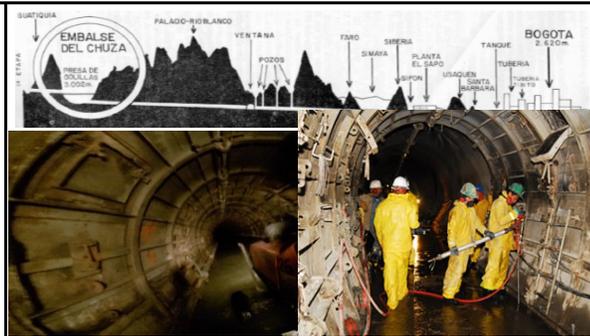
Tunelfaro- 0025

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Chingaza - Túnel el Faro	LOCALIZACIÓN	Bogotá, Cundinamarca
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidráulico	PENDIENTE %	4.32
AÑO	1971	COBERTURA (m)	83
TIPO DE SECCIÓN	Herradura paredes Curvas	LONGITUD (m)	978

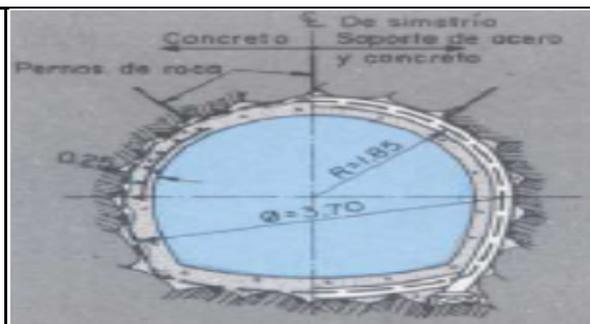
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Rocas sedimentarias del Cretácico, compuestas por: lutitas, limolitas, areniscas y arcillolitas, con propiedades expansivas	
EDAD DE LA ROCA	Cretácico y Terciario	
TIPO DE ROCA	Areniscas y arcillolitas	
ALTURA TUNEL (m)	3.7	
ANCHO TUNEL (m)	3.7	
ALTERACION DEL MACIZO	Medianamente fracturada a muy fracturada	
TIPO DE TERRENO	Rocas blandas en algunos sectores fracturadas	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Pernos de anclaje, concreto lanzado	
REVESTIMIENTO	Concreto simple y blindaje	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Materiales sedimentarios, granulares, con propiedades de almacenamiento de agua y transmisión a través de los intersticios.	
NIVEL FREATICO (m)	75	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.23E-06	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Mejoramiento y refuerzo del anillo de roca en el contorno de la excavación	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	El túnel se encuentra diseñado para conducción y direccionamiento del agua.	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Capas de concreto	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Góteros rápidos, lentos y humedad localizada por tramos	

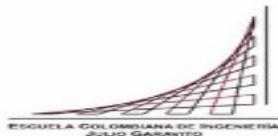


### COMENTARIOS GENERALES

El túnel se dividió en cuatro tramos, de acuerdo a las características geológicas de la roca, presento altos índices de convergencia, por fenómenos de expansión y Sweeling, la cual requirió solera en concreto convencional reforzada con malla metálica y pernos en el piso adecuadamente. En el año 1983 se presentan derrumbes parciales y emergencias graves en el proyecto.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Ministerio de Ambiente. Gaceta Oficial - ISSN 0122-3070. Bogotá - 2004. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelsiberia - 0026

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Chingaza - Túnel Siberia	LOCALIZACIÓN	Bogotá, Cundinamarca
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidráulico	PENDIENTE %	4.32
AÑO	1971	COBERTURA (m)	232
TIPO DE SECCIÓN	Herradura paredes Curvas	LONGITUD (m)	3056

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel se encuentra excavado en roca Arenisca, en coloración gris clara de grano fino a medio y por tramos medianamente fracturada con buena resistencia, poco alterado.	
EDAD DE LA ROCA	Cretáceo	
TIPO DE ROCA	Areniscas	
ALTURA TUNEL (m)	3.7	
ANCHO TUNEL (m)	3.7	
ALTERACION DEL MACIZO	Roca sanas y poco alteradas	
TIPO DE TERRENO	Rocas blandas en algunos sectores fracturadas	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Concreto lanzado, pernos, arcos en mayor separación	
REVESTIMIENTO	Concreto simple y blindaje	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Materiales sedimentarios, granulares, con propiedades de almacenamiento de agua y transmisión a través de los intersticios y discontinuidades asociadas.	
NIVEL FREATICO (m)	213	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.14529E-05	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Mejoramiento y refuerzo del anillo de roca en el contorno de la excavación por pernos de anclaje	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	El túnel se encuentra diseñado para conducción y direccionamiento del agua.	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Revestimiento en concreto y blindaje	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteros rápidos, lentos y chorros localizada por tramos	

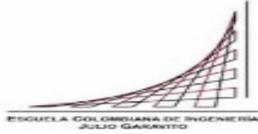


### COMENTARIOS GENERALES

El túnel se dividió en cinco tramos, de acuerdo a las características geológicas de la roca, presento altos índices de convergencia, por fenómenos de expansión y Sweeling en la solera, el túnel ha recibido reforzamiento y blindaje en la sección en varias ocasiones. Las obras que componen el sistema Chingaza, fueron diseñadas y construidas con la proyección de una vida útil entre 25 y 30 años de los elementos electromecánicos y 50 años para las estructuras hidráulicas y demás obras civiles. En la optimización de sus componentes, ha sido necesario la construcción de las siguientes obras: túnel auxiliar del pozo de compuertas, revestimiento en concreto convencional en gran parte del tramo túnel Palacio – río Blanco, instalación de una válvula de guarda de Ventana, optimización del sistema de compuertas de la entrada del túnel Guatiquía y construcción de una galería de acceso al túnel de Guatiquía.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016. Ministerio de Ambiente. Gaceta Oficial - ISSN 0122-3070. Bogotá - 2004. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TunelUsaquen- 0027

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Chingaza - Túnel Usaquén	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Bogotá, Cundinamarca
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Hidráulico	<b>PENDIENTE %</b>	0.96
<b>AÑO</b>	1971	<b>COBERTURA (m)</b>	229
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura paredes Curvas	<b>LONGITUD (m)</b>	2220.8

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	El túnel se encuentra excavado en roca Arenisca, en coloración gris pardo amarillenta, de grano fina a media, poco fracturada, medianamente duras, por tramos se encuentra fresco y sano.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Cretáceo	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Areniscas	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	3.7	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	3.7	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Roca sanas y poco alteradas	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas blandas en algunos sectores fracturadas	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Concreto lanzado y pernos de anclaje	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto simple y blindaje	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Materiales sedimentarios, granulares, con propiedades de almacenamiento de agua y transmisión a través de los intersticios y discontinuidades asociadas.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	213	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	1.576E-05	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Mejoramiento y refuerzo del anillo de roca en el contorno de la excavación por pernos de anclaje	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	El túnel se encuentra diseñado para conducción y direccionamiento del agua.	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Concreto simple y blindaje	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Goteos y chorros por tramos	

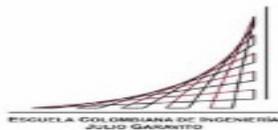


### COMENTARIOS GENERALES

El túnel se dividió en cuatro tramos, de acuerdo a las características geológicas de la roca, presento altos índices de convergencia, por fenómenos de expansión y Sweeling en la solera, el túnel ha recibido reforzamiento y blindaje en la sección en varias ocasiones. Las obras que componen el sistema Chingaza, fueron diseñadas y construidas con la proyección de una vida útil entre 25 y 30 años de los elementos electromecánicos y 50 años para las estructuras hidráulicas y demás obras civiles. En la optimización de sus componentes, ha sido necesario la construcción de las siguientes obras: túnel auxiliar del pozo de compuertas, revestimiento en concreto convencional en gran parte del tramo túnel Palacio – río Blanco, instalación de una válvula de guarda de Ventana, optimización del sistema de compuertas de la entrada del túnel Guatiquía y construcción de una galería de acceso al túnel de Guatiquía.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Ministerio de Ambiente. Gaceta Oficial - ISSN 0122-3070. Bogotá - 2004. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

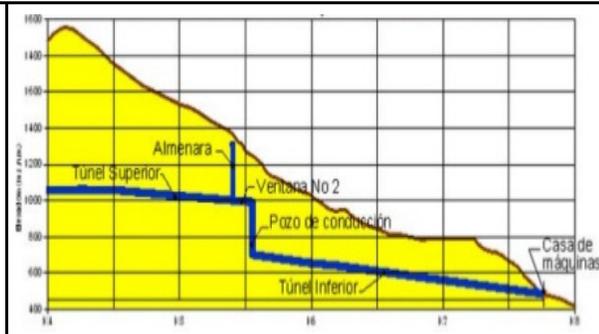
TunelChivorII- 0028

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Chivor II	LOCALIZACIÓN	Chivor - Boyacá
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel Hidráulico Presión	PENDIENTE %	0 - 10
AÑO	1977	COBERTURA (m)	813
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Rectas	LONGITUD (m)	5550

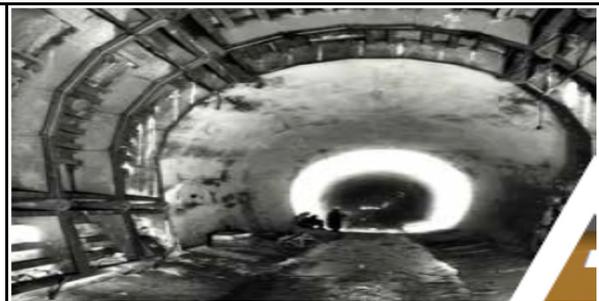
#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel se encuentra excavado en rocas metamórficas y sedimentarias, que varía el grado de metamorfismo, desde rocas filitas gris oscura a verde, Argilita verde hasta material de arenisca gris oscura, medianamente a muy fracturada en algunos sectores del proyecto.	
EDAD DE LA ROCA	Paleozoica, Mesozoica y Cretáceo	
TIPO DE ROCA	Filitas, Argilitas y Areniscas	
ALTURA TUNEL (m)	6.4	
ANCHO TUNEL (m)	6.6	
ALTERACION DEL MACIZO	El macizo se encuentra poco a medianamente meteorizado	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras y fracturadas	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura convencional	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, concreto lanzado, pernos de anclaje	
REVESTIMIENTO	Concreto convencional y blindaje	



#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Infiltración y flujo del agua por las zonas de discontinuidad asociada, al fracturamiento y zonas más alteradas en el interior de los trabajos.	
NIVEL FREATICO (m)	800	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	2.16216E-05	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Reforzamiento y mejoramiento del contorno de la excavación por pernos	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Conducción y desnivel del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Revestimiento y blindaje del revestimiento	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Chorros, goteos rápidos y lentos en algunos tramos del túnel.	

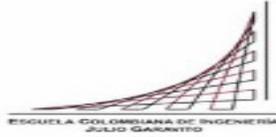


#### COMENTARIOS GENERALES

El proyecto tunelero tiene la finalidad de conducción y direccionamiento del agua. El sistema consiste, en una presa de enrocado de 237 m de altura, medidos desde el nivel de cimentación. Esta presa tendrá las aguas del río Bata para permitir que, mediante 5.550 m de túnel y 2.100 m de tubería, se puedan conducir estas aguas hasta la casa de máquinas, situada en la margen derecha del río Lengupá, aguas arriba de San Luis de Gaceno; de esta manera se aprovecha una caída neta promedio de 756 m, el túnel se encuentra revestido en un 5%.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016. ASOCRETO. Seminario de Túneles en Colombia. Bogotá 2014. Tobar, Gabriel. Hidroeléctrica de Chivor. Bogotá - 1977.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garvito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TunelGuarino- 0029

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Trasvase Guarinó	LOCALIZACIÓN	Tolima
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidráulico	PENDIENTE %	1.73
AÑO	2004	COBERTURA (m)	513
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Rectas	LONGITUD (m)	3382

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Túnel se excavan en macizos ígneos y metamórficos, compuestos por rocas de Dacita, Granodiorita, Dacitas, Esquistos, de diversa coloración gris clara, amarillenta, de grano fino a medio, poco a medianamente fracturada.	
EDAD DE LA ROCA	Cretáceo y Paleozoico	
TIPO DE ROCA	Dacita, Granodiorita, Dacitas y Esquistos	
ALTURA TUNEL (m)	4.2	
ANCHO TUNEL (m)	4.2	
ALTERACION DEL MACIZO	Roca masiva a medianamente fracturada	
TIPO DE TERRENO	Duras a medianamente duras, poco alterado en otros puntos meteorizado.	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	En la mayoría del túnel se presenta auto soporte, en tramos pernos de anclaje y concreto lanzado y arcos a una mayor separación.	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado y blindaje por tramos	

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

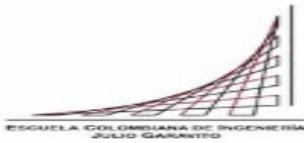
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Macizo en rocas con escasas características de almacenamiento y transmisión del agua, la filtración esta asociada a las diaclasas, fracturas, foliación e intercalación y contactos entre los diferentes cuerpos de roca. Además, zonas de fallas, cizallamiento y zonas alteradas donde el agua puede almacenarse y transmitirse con mayor facilidad.	
NIVEL FREATICO (m)	490	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	7.10E-06	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	En tramos de mayor alteración del macizo refuerzo en pernos de anclaje	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Desnivel longitudinal del agua	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Revestimiento en concreto convencional	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	En tramos goteos lentos y chorros	

#### COMENTARIOS GENERALES

Las obras del Proyecto Guarinó están conformadas por: Una presa en concreto hidráulico sobre el río Guarinó con una altura aproximada de 7,0 m, las estructuras de la bocatoma, canal de aducción, estructura de captación del caudal ecológico, un túnel, estructuras portal de Salida. La captación y el túnel están ubicados en el sitio de mayor proximidad entre los ríos Guarinó y La Miel, en jurisdicción de la Inspección de Cañaveral, localizada aproximadamente a 29 km aguas arriba de la desembocadura del río Guarinó en el río Magdalena. El portal de salida del túnel, se encuentra próximo al cauce del río La Miel.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016. <https://www.isagen.com.co/comunidades/centrales/miel-y-transvase-guarino/poblacion/>



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Tunelalterusaquen- 0030

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel Alterno de Usaquén	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Bogotá, Cundinamarca
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Túnel Hidráulico a presión	<b>PENDIENTE %</b>	0.96
<b>AÑO</b>	2000 - 2003	<b>COBERTURA (m)</b>	
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura paredes curvas	<b>LONGITUD (m)</b>	2496

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	La zona donde se construyo el túnel se encuentran depósitos sedimentarios, en una morfología montañosa, que pertenecen a la formación Guaduas y grupo Guadalupe, conformada por material de arenisca, las cuales generan el anticlinal y falla de Usaquén, que están cubiertas por depósitos recientes y suelos orgánicos.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Terciario y Cretácico Superior	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Arenisca	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	1.95	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	4.5	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	El macizo presento alteración y filtraciones localizadas, hacia las fallas y zonas de cizallamiento que corta el túnel.	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	El unel se clasifico el macizo tipo II, IIIA y IIIB. Correspondiendo rocas de dureza media, fracturadas a muy fracturadas, alteradas hacia la zona de falla.	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Excavación con martillos manuales, Maquinas Tuneladora ATM - Rozadora, perforación y voladura	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Soporte natural en algunos sectores, Concreto neumático, pernos de anclaje de 2.5 en la clave y pilares, arcos de acero TH 21, malla electro soldada.	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto convencional, espesor de 0.25 a 0.2 de acuerdo a la condición del terreno.	

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

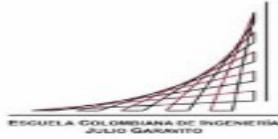
<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Los depósitos corresponden a sistemas acuíferos pobres, con flujos y almacenamiento del agua subterránea en las zonas de fallas y fracturación del macizo, donde se presentan filtraciones y chorros puntuales en diferentes tramos del túnel.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin Información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin Información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	1.84E-06	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Se realizaron perforaciones tipo spilling y pernos de anclaje con lechadas cementicias en zonas de falla, portales y algunos tramos. Las inyecciones se realizaron en dos tapas, una profunda de 4 a 9 m y la restante de 0,5 a 4,0 m.	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Tuberías de 4" de diámetro en la parte central de la "batea" del túnel, ZH 6, conectadas mediante Codos y Yees a la tubería principal de 4" para captación de las aguas de infiltración	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Cortinas de impermeabilización de 12 perforaciones con longitud de 9 m en la roca.	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Goteos y chorros localizados, humedad afectando los lentes de areniscas	

### COMENTARIOS GENERALES

El túnel se excavo bajo la metodología del NATM, se clasificaron III clases de terreno en el túnel, en las zonas presentaba mayor deterioro y meteorización del macizo se realizaron perforaciones de drenaje, y de consolidación en el anillo de roca. Los caudales de infiltración del túnel fueron captados con anterioridad a la colocación del revestimiento, con el fin de que no se vieran afectadas las actividades de fundida del concreto por la acción del agua. En el momento en que se inició el revestimiento, gran parte de las infiltraciones se habían secado o descendido a la solera del túnel; las restantes se captaron mediante mangueras y se condujeron a través de una tubería de 8" por el margen derecho hidráulico. Posteriormente esta tubería se inyectó con mortero.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. NOTICRETO. Reduciendo la vulnerabilidad de abastecimiento de Bogotá. Publicación 66. Acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá, informe de interventoría durante la construcción del túnel alternativo de Usaquén, Restrepo y Uribe, Bogotá - 2003.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TúnelAcguavio - 0031

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel de Acceso El Guavio	LOCALIZACIÓN	Bogotá - Cundinamarca
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidráulica	PENDIENTE %	12
AÑO	1983	COBERTURA (m)	717
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Curvas	LONGITUD (m)	2060

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel se encuentra excavado en material sedimentario heterogéneo, compuesto por depósitos de arenisca, argilita, limolitas y conglomerados, con diferentes grados de cementación y litificación, las cuales presentan poca meteorización y resistencia.		
EDAD DE LA ROCA	Mesozoica y Cretácico		
TIPO DE ROCA	Arenisca, argilita, limolitas y conglomerados.		
ALTURA TUNEL (m)	8.2		
ANCHO TUNEL (m)	8.2		
ALTERACION DEL MACIZO	Poco alterado.		
TIPO DE TERRENO	Rocas medianamente duras, poco meteorizadas		
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura		
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, concreto lanzado, pernos de anclaje		
REVESTIMIENTO	Concreto simple y blindaje		

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

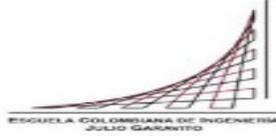
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Macizo con goteos por tramos y características de la roca, en zonas de contactos, intercalación y de poca litificación de la roca.		
NIVEL FREATICO (m)	699		
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información		
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	7.76699E-05		
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Refuerzo y mejoramiento del contorno de la excavación en algunos tramos del túnel.		
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Conducción, longitudinal del túnel		
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel		
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos rápidos y chorros		

#### COMENTARIOS GENERALES

El túnel de acceso se dividió en 11 tramos de diferentes características, el proyecto hidroeléctrico consiste en una presa de enrocado de 243 m de altura para formar un embalse útil de 950 millones de m<sup>3</sup>. El caudal promedio del río en el sitio de presa es de 62 m<sup>3</sup>/s, túnel de desviación de 1160 m de longitud, rebosadero: dos túneles de 600 m de longitud y con vertedero de entrada controlado mediante compuertas. Túnel de desviación al embalse de los ríos Batatas de 2330 m de longitud y Chivor de 2190 m de longitud. Túnel superior de carga de 13315 m de longitud.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016. [https://www.ingetec.com.co/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=28:guavio&Itemid=35&lang=es](https://www.ingetec.com.co/index.php?option=com_k2&view=item&id=28:guavio&Itemid=35&lang=es)



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TunelfuGuavio- 0032

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel de Fuga el Guavio	LOCALIZACIÓN	Bogotá - Cundinamarca
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidráulica	PENDIENTE %	0.25
AÑO	1983	COBERTURA (m)	538
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Curvas	LONGITUD (m)	5250

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel se excavo en depósitos de limolitas negra poco a medianamente fracturada, además de material de arenisca en coloración gris claro, oscuro y blanco de mediana a baja resistencia, el macizo se encuentra sano, y en algunos sectores meteorizado.	
EDAD DE LA ROCA	Jurásico y Cretácico	
TIPO DE ROCA	Limolitas y Areniscas Cuarzosas	
ALTURA TUNEL (m)	8.9	
ANCHO TUNEL (m)	8.9	
ALTERACION DEL MACIZO	El macizo se encuentra sano, y en otros sectores meteorizado.	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras, blandas y medianamente meteorizadas	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Concreto lanzado, pernos de anclaje, arcos	
REVESTIMIENTO	Concreto convencional y blindaje	

DETALLE

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

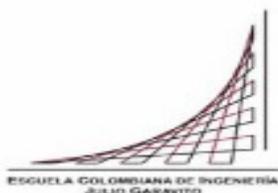
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Macizo con goteos por tramos y características de la roca, en zonas de contactos, intercalación y de poca litificación de la roca.	
NIVEL FREATICO (m)	522	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	5.90476E-06	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Por tramos y donde se requirió mejoramiento de contorno de la excavación pernos de anclaje	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Conducción, longitudinal del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos rápidos y chorros	

#### COMENTARIOS GENERALES

El túnel de fuga se dividió en 12 tramos de diferentes características, el proyecto hidroeléctrico consiste en una presa de enrocado de 243 m de altura para formar un embalse útil de 950 millones de m<sup>3</sup>. El caudal promedio del río en el sitio de presa es de 62 m<sup>3</sup>/s, túnel de desviación de 1160 m de longitud, rebosadero: dos túneles de 600 m de longitud y con vertedero de entrada controlado mediante compuertas. Túnel de desviación al embalse de los ríos Batatas de 2330 m de longitud y Chivor de 2190 m de longitud. Túnel superior de carga de 13315 m de longitud.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero de 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TunelSupcaGuavio- 0033

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel superior carga Guavio	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Bogotá, Cundinamarca
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Hidráulico	<b>PENDIENTE %</b>	1.4 - 2
<b>AÑO</b>	1983	<b>COBERTURA (m)</b>	1200
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura paredes Curvas	<b>LONGITUD (m)</b>	12793

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	El túnel se encuentra excavado en rocas metamórficas y sedimentarias, en algunos tramos se encuentra como roca masiva, poco a medianamente fracturadas, de coloración oscura, algunos sectores se presenta la roca fractura, con una resistencia moderada a intermedia de la roca.		<p>Tunel Inferior de Carga - Blindaje Ramal 1</p>
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Paleozoica y Mesozoica		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Cuarcita, argilita, caliza, limolitas, arenisca		
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	8.9		
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	8.9		
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Fresco y sano, medianamente y altamente meteorizado en algunos sectores.		
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Roca masiva fracturada, en algunos sectores poco a medianamente meteorizado.		
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura, excavación mecánica		
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Por sectores dependiendo la calidad de la roca, concreto lanzado, pernos de anclaje, arcos de acero.		
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto Simple y Blindaje		

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

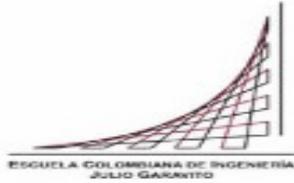
<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Macizo con goteos por tramos y características de la roca, en zonas de contactos, intercalación y de poca litificación de la roca.		<p>Tunel Superior de Carga - Tronzo de Graues</p>
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	1173		
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información		
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	2.74E-05		
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Donde se requirió, fortalecimiento del contorno de la excavación.		
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Conducción, longitudinal del túnel		
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel		
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Goteos rápidos, lentos y chorros por tramos.		

### COMENTARIOS GENERALES

El túnel de fuga se dividió en 19 tramos de diferentes características, el proyecto hidroeléctrico consiste en una presa de enrocado de 243 m de altura para formar un embalse útil de 950 millones de m<sup>3</sup>. El caudal promedio del río en el sitio de presa es de 62 m<sup>3</sup>/s, túnel de desviación de 1160 m de longitud, rebosadero: dos túneles de 600 m de longitud y con vertedero de entrada controlado mediante compuertas. Túnel de desviación al embalse de los ríos Batatas de 2330 m de longitud y Chivoro de 2190 m de longitud. Túnel superior de carga de 13315 m de longitud, la obra se encuentra parcialmente revestida en un 35%

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. <http://guavio.blogspot.com.co/Gutierrez>, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero de 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TunelFugaMiel- 0034

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel Fuga - La Miel	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Norcasia, Caldas
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Hidráulico	<b>PENDIENTE %</b>	0.1 a 0.5
<b>AÑO</b>	1997 a 2002	<b>COBERTURA (m)</b>	220
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura Paredes Rectas	<b>LONGITUD (m)</b>	4097

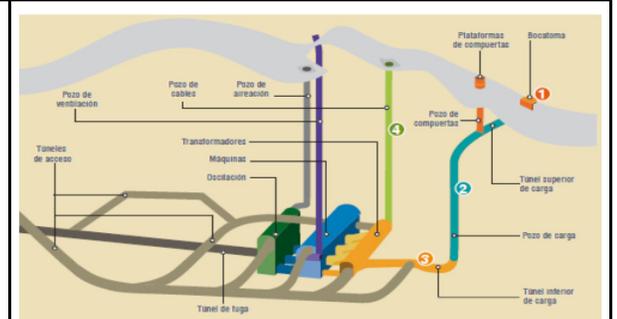
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	El túnel se encuentra excavado en roca ígneas y metamórficas, el proyecto intercepta diferentes grados de terreno, en macizos duros poco alterados y características de resistencia alta y moderada para la roca.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Mesozoica y Paleozoica	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Neis, Cuarzo diorita, Cuarzita y Esquistos	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	9	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	9	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Fresco y sano, poco alterado	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas duras, masivas y poco fracturadas	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Auto soporte, concreto, pernos de anclaje en cunas de roca localizadas.	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto convencional y blindaje	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Macizos con características de transmisión de agua en puntos localizados en zonas de contactos geológicos, intercalaciones, la excavación presenta poca alteración y filtraciones esporádicas.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	207	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin Información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	9.28E-06	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Pernos puntales para asegurar cuñas localizadas y revestimiento con blindaje del túnel	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Conducción, longitudinal del túnel	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Goteos rápidos y lentos localizados en algunos tramos.	

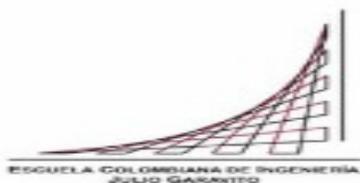


### COMENTARIOS GENERALES

La central Miel I, localizada en el municipio de Norcasia, forma parte del potencial hídrico del oriente del departamento de Caldas, región conformada por las cuencas de los ríos Guarinó, La Miel, Moro, Manso, Samaná Sur y afluentes menores como los ríos Pensilvania y Tenerife. Tiene tres cavernas subterráneas: de máquinas, de transformadores y de oscilación; un túnel de fuga 4097 m, una capacidad instalada de 396 MW. y una generación media 1.460 GW-h/año. Otros datos importantes son: el área de la cuenca con 770 Km<sup>2</sup>, un caudal medio del río de 84 m<sup>3</sup>/s, una potencia de 375 MW y una longitud de túneles construidos de más de 6 km.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016. <https://www.isagen.com.co/nuestra-empresa/generacion-de-energia/generacion-hidroelectrica/central-hidroelectrica-miel/>



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

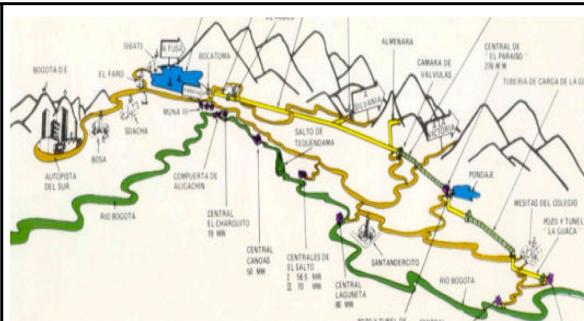
TúnelGuaca- 0035

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Mesitas - Túnel La Guaca	LOCALIZACIÓN	Mesitas, Cundinamarca
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidráulico	PENDIENTE %	8
AÑO		COBERTURA (m)	215
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Curvas	LONGITUD (m)	2060

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

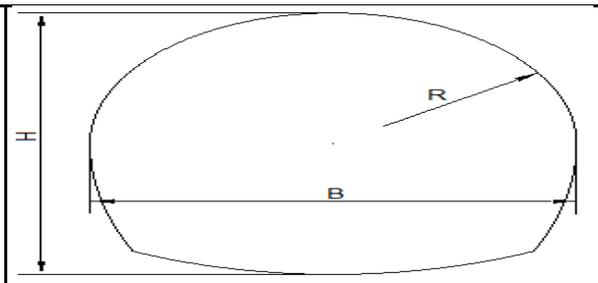
DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel se encuentra excavado en roca limolitas Arcillosa de color negro, fracturado, con una resistencia intermedia a alta	
EDAD DE LA ROCA	Mesozoica - Cretáceo	
TIPO DE ROCA	Limolitas Arcillosa	
ALTURA TUNEL (m)	4.2	
ANCHO TUNEL (m)	4.2	
ALTERACION DEL MACIZO	Poco meteorizado	
TIPO DE TERRENO	Rocas algo fracturadas, sin alteración	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, concreto lanzado, pernos de anclaje y arcos en algunos tramos	
REVESTIMIENTO	Concreto simple y blindaje	



DETALLE

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Macizo sin alteración tramos y características de la roca, en zonas de contactos, intercalación y de poca litificación de la roca.	
NIVEL FREATICO (m)	198	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	2.43E-06	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Donde se requirió, fortalecimiento del contorno de la excavación.	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Conducción, longitudinal del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos lentos y chorros	

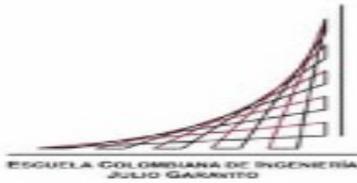


#### COMENTARIOS GENERALES

Este túnel pasa bajo la población de Mesitas, a 190 m. de profundidad y corresponde al tramo final de conducción para entregar el agua a la Casa de máquinas de la Central. Tiene 2.1 Km. de longitud y un diámetro de excavación de 4.2 m.; la sección efectiva hidráulica es de 3.1 m.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Ministerio de Ambiente. Gaceta Oficial - ISSN 0122-3070. Bogotá - 2004. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TunelParaiso- 0036

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Mesitas - Túnel Paraíso	LOCALIZACIÓN	Mesitas, Cundinamarca
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidráulico	PENDIENTE %	2
AÑO		COBERTURA (m)	162
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Curvas	LONGITUD (m)	1272

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel se encuentra excavado en roca limolitas Arcillosa de color negro, fracturado, con una resistencia intermedia a alta	
EDAD DE LA ROCA	Mesozoica - Cretáceo	
TIPO DE ROCA	Limolitas Arcillosa	
ALTURA TUNEL (m)	4.2	
ANCHO TUNEL (m)	4.2	
ALTERACION DEL MACIZO	Poco meteorizado	
TIPO DE TERRENO	Rocas algo fracturadas, sin alteración	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, concreto lanzado, pernos de anclaje y arcos en algunos tramos	
REVESTIMIENTO	Concreto simple y blindaje	



#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Macizo sin alteración tramos y características de la roca, en zonas de contactos, intercalación y de poca litificación de la roca.	
NIVEL FREATICO (m)	144	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-06	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	2.75E-05	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Donde se requirió, fortalecimiento del contorno de la excavación.	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Conducción, longitudinal del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos lentos y chorros	

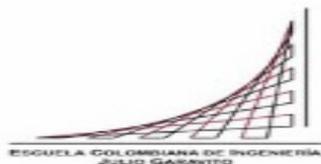


#### COMENTARIOS GENERALES

El túnel se encuentra dividido en 8 tramos. Este túnel capta a través del pozo el Paraíso las aguas que salen de la casa de maquinas el Paraíso. Tiene una longitud de 1273 y un diámetro de 4.2 m, el túnel lleva las aguas procedentes de la central Paraíso hasta la central la Guaca para ser turbinadas en el proceso de generación de energía eléctrica.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TúnelGrandall- 0037

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Mesitas - Túnel Granada II	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Cundinamarca, Granada
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Hidráulico	<b>PENDIENTE %</b>	2.7
<b>AÑO</b>		<b>COBERTURA (m)</b>	367
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura Paredes Curvas	<b>LONGITUD (m)</b>	11066

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	El túnel se encuentra excavado en macizos de arenisca gris poco fracturada, moderadamente duras, limolitas y lutitas negras duras, fracturadas, con escasa alteración, el macizo presenta cambios litológicos, y tiene una competencia moderada.		
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Mesozoica - Cretáceo		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Arenisca, limolitas y lutitas		
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	4.8		
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	4.8		
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Poco meteorizado		
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas algo fracturadas, sin alteración		
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura		
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Auto soporté, concreto lanzado, pernos de anclaje y arcos 8WF 30 en algunos tramos, inyecciones de contacto		
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto simple y blindaje		

DETALLE

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

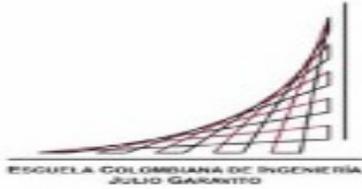
<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Macizo sin alteración tramos y características de la roca, en zonas de contactos, intercalación y de poca litificación de la roca.		
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	349.6		
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-05		
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	5.47E-05		
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Donde se requirió, fortalecimiento del contorno de la excavación, principalmente hacia la solera, con la perforación e instalación de perno e inyecciones de contacto		
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Conducción, longitudinal del túnel		
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel		
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Goteos rápidos y chorros		

### COMENTARIOS GENERALES

El túnel desarrollo fenómenos de Sweeling, debido a la infiltración y la mineralogía del macizo que produjo hinchamiento y grandes deformaciones hacia la solera del túnel, requiriendo procesos de mantenimiento y refuerzo del túnel, cambios de los arcos instalados. Las medidas para controlar la alta convergencia fueron; marco rígido temporal para frenar el modo de falla por efecto cremallera, Invertí curvo, colocación de pernos, Inyecciones de contacto.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

- INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016. ECI. Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y máquinas TBM en la Cordillera de Los Andes. Casos históricos. Camilo Marulanda, Conferencias preliminares Túneles en suelo y roca. Bogotá - 2014



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

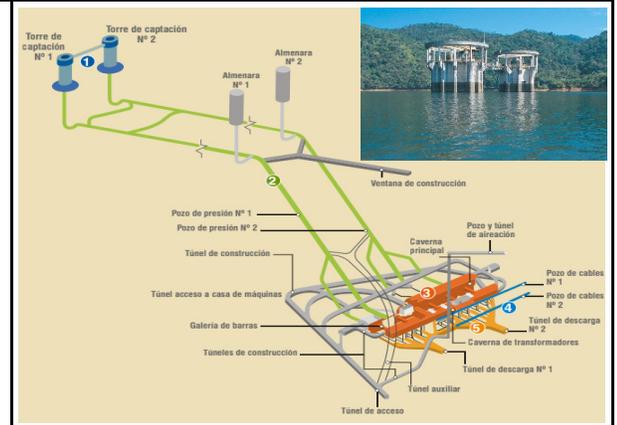
TunelSanCarlos- 0038

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel Descarga - San Carlos	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Antioquia
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Hidroeléctrico	<b>PENDIENTE %</b>	0.18
<b>AÑO</b>	1972-1991	<b>COBERTURA (m)</b>	243
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura Paredes Rectas	<b>LONGITUD (m)</b>	1633

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	El túnel fue construido en roca metamórfica, Ortogénesis de color gris claro, grano fino, en tramos, presenta poca a muy fracturada, y un grados de meteorización avanzado y escaso.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Paleozoica	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Ortogénesis	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	10.8	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	10.44	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	El túnel presenta tramos en condiciones poco alterados a muy meteorizados.	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Roca Dura fracturada poco a muy meteorizada.	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Auto soporté, pernos de anclaje y concreto lanzado en gran porcentaje del túnel. Arcos de acero en las zonas en los terrenos mas pobres	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto convencional y blindaje	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	El macizo rocoso actúa como frontera impermeable, con transmisión del agua en zonas puntuales, fracturas, cizallas, contactos litológicos y otras discontinuidades asociadas.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	227	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	2.14E-06	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Reforzamiento en el contorno de la excavación, en las cunas localizadas y zonas mas fracturadas.	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Conducción, longitudinal del túnel	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Goteos Lentos	

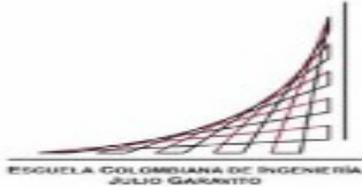


### COMENTARIOS GENERALES

Este proyecto tunelero se dividió en VII tramos de acuerdo a la condición geológica. La central San Carlos tiene el embalse Punchiná que se encuentra localizado sobre los ríos San Carlos y Guatapé, la presa es del tipo gravedad en tierra con 70 m de altura y 800 m de longitud, formando un embalse con una capacidad de 61,67 Mm<sup>3</sup>, de los cuales 53,21 Mm<sup>3</sup> son de embalse útil. El embalse cuenta con una descarga de fondo controlada por compuertas deslizantes que aprovecha el túnel que se usó para la desviación del río durante la construcción de la presa. El vertedero de la presa es del tipo libre con un canal superficial de concreto, diseñado para evacuar la creciente máxima probable estimada de 7.200 m<sup>3</sup>/s

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016.  
[https://www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoIn\\_Galeria&tipoInforme=CC&pagerId=2073947380&pageNumber=2](https://www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoIn_Galeria&tipoInforme=CC&pagerId=2073947380&pageNumber=2)



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

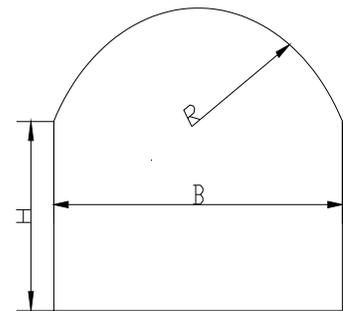
TunelSancarpres - 0039

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Presión - San Carlos	LOCALIZACIÓN	Antioquia
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidroeléctrico	PENDIENTE %	0.5 a 1.5
AÑO	1972-1991	COBERTURA (m)	280
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Rectas	LONGITUD (m)	4507

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel se encuentra excavado en roca Cuarzodiorita, arenisca y lutitas, de adecuada competencia. Las rocas ígneas - Cuarzodioritas se presenta como rocas masivas, de grano grueso, duras y poco alteradas, los depósitos de arenisca, presenta una coloración gris, poco a medianamente fracturada, y se encuentra parcialmente meteorizado y deteriorado. Las lutitas tienen un color oscuro, se encuentra fracturado, poco deteriorado.	
EDAD DE LA ROCA	Cretáceo	
TIPO DE ROCA	Ígnea / Sedimentaria	
ALTURA TUNEL (m)	5	
ANCHO TUNEL (m)	6	
ALTERACION DEL MACIZO	En depósitos de arenisca se encuentra parcialmente meteorizada.	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras masivas y en algunos tramos fracturados y meteorizados	
METODO DE EXCAVACION	Maquina Tunneladora TBM	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporte, pernos de anclaje y concreto lanzado	
REVESTIMIENTO	Concreto simple y blindaje	



DETALLE

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	El macizo rocoso actúa como frontera impermeable, con transmisión del agua en zonas puntuales, fracturas, cizallas, contactos litológicos y otras discontinuidades asociadas, principalmente en los estamos de arenisca que se encuentran parcialmente meteorizados.	
NIVEL FREATICO (m)	263	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m <sup>3</sup> /seg/ml)	7.544E-07	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Reforzamiento en el contorno de la excavación, en las cuñas localizadas y zonas más fracturadas.	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Conducción, longitudinal del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos Rápidos y lentos, principalmente hacia las zonas meteorizadas en los depósitos de arenisca	

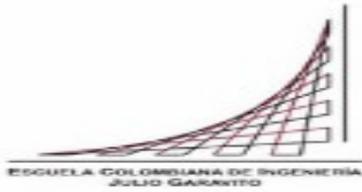


### COMENTARIOS GENERALES

Estos túneles empalman con dos pozos de presión inclinados a 46 grados con la horizontal y 346 m de longitud cada uno, tienen revestimiento en concreto y sección circular de diámetro interior de 5,50 m, el de la primera etapa, y 6,75 m, el de la segunda etapa. Los pozos inclinados terminan en tuberías de presión de 3,30 m de diámetro embebidas en concreto que en su parte inferior se ramifican en dos distribuidores por cada ramal de tubería de presión, los cuales alimentan cuatro unidades de generación en la primera etapa y cuatro unidades de generación en la segunda. El túnel se encuentra dividido en 11 tramos.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016. [https://www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoIn\\_Galeria&tipoInforme=CC&pagerId=2073947380&pageNumber=2](https://www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoIn_Galeria&tipoInforme=CC&pagerId=2073947380&pageNumber=2)



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TunelRiogrande 0040

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Carga - Rio grande	LOCALIZACIÓN	Antioquia
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidroeléctrico	PENDIENTE %	
AÑO	1993	COBERTURA (m)	250
TIPO DE SECCIÓN	Herradura	LONGITUD (m)	7165

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel se encuentra excavado en rocas ígneas y metamórficas del intrusivo Batolito Antioqueño	
EDAD DE LA ROCA	Cretáceo	
TIPO DE ROCA	Cuarzo dioritas	
ALTURA TUNEL (m)	Sin información	
ANCHO TUNEL (m)	Sin información	
ALTERACION DEL MACIZO	Sin información	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, concreto lanzado, pernos localizados en cunas	
REVESTIMIENTO	Concreto Convencional y Blindaje	



DETALLE

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Cuerpo ígneo intrusivo, con características de barrera impermeable, filtraciones en las zonas de discontinuidades y fallas asociadas.	
NIVEL FREATICO (m)	232	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.12E-06	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Reforzamiento en el contorno de la excavación, en las cunas localizadas y zonas mas fracturadas.	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Conducción, longitudinal del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Sin información	

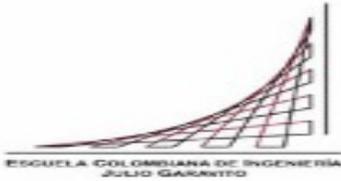


#### COMENTARIOS GENERALES

La represa de Rio Grande se encuentra ubicada en la cuenca del río Grande, dentro del municipio de San Pedro. La condición multipropósito del embalse del RIOGRANDE es atender la demanda del acueducto metropolitano de Medellín, y adicionalmente, producir energía mediante el aprovechamiento de la diferencia de altura de 900 m, existente entre la altiplanicie del río Grande y el Valle de Aburra El embalse se forma dado el represamiento de los ríos Grande y Chico mediante la construcción de una presa sobre el río Grande, ubicada 2.0 km aguas abajo de la confluencia de estos ríos. Una estructura de captación toma y distribuye las aguas a los túneles, que conducen a las centrales de La Tasajera y Niquía. Los túneles tienen 7.2 y 16.4 km de longitud respectivamente.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016. Empresas Publicas de Medellín, Central Hidroeléctrica la Tasajera



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

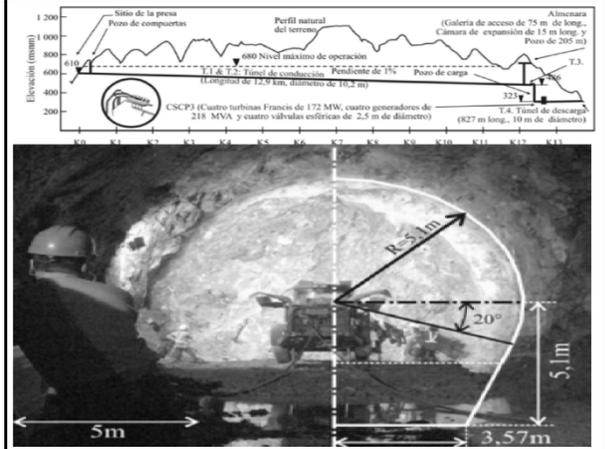
TunelPorcellIII- 0041

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel de Carga Porce III	LOCALIZACIÓN	Antioquia
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidráulico	PENDIENTE %	1
AÑO	2010	COBERTURA (m)	600
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Curvas	LONGITUD (m)	12417

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Estas rocas en profundidad muestran pliegues a lo largo del eje del túnel de conducción superior orientados hacia el norte. El macizo rocoso en este sitio, muestra una afectación por fallas, diaclasas, zonas de cizalla y variación en las ondulaciones indicadas por la foliación. Las unidades litológicas se encuentran conformadas por suelos residuales y depósitos de coluvión cuaternarios; los cuales cubren las rocas conformadas por esquistos, esquistos néisicos y neises de edad Paleozoica	
EDAD DE LA ROCA	Depósitos recientes, paleozoico, Cuaternario	
TIPO DE ROCA	Esquisto Cuarzocercítico, Neis, depósitos coluviales	
ALTURA TUNEL (m)	10.2	
ANCHO TUNEL (m)	10.2	
ALTERACION DEL MACIZO	El túnel presente diversas zona de diaclasamiento y alteración, principalmente hacia los tramos donde se encuentran los depósitos cuaternarios	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras fracturadas, rocas blandas, depósitos no consolidados	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporté, concreto lanzado, pernos de anclaje	
REVESTIMIENTO	Concreto convencional y blindaje	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Las filtraciones están asociadas al sistema y familias de fallas, zonas de cizallamiento e intersección con el túnel.	
NIVEL FREATICO (m)	582	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	2.53684E-05	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Reforzamiento en el contorno de la excavación, en las cunas localizadas y zonas mas fracturadas.	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Conducción, longitudinal del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto simple y blindaje como revestimiento del túnel	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Sin información	

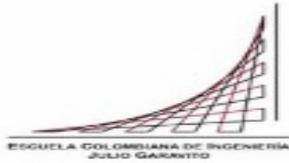


### COMENTARIOS GENERALES

Porce III está ubicado a 147 kilómetros de Medellín, nordeste de Antioquia, en una zona entre los municipios de Amalfi, Anorí, Gómez Plata y Guadalupe, el túnel se encuentra parcialmente revestido en un 25%.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gutiérrez, Ramiro - INGETEC. Información de consultoría realizada al proyecto. Bogotá - 2016.. SIKA. Proyecto Hidroeléctrico Porce III, Bogotá -2010. Ludger Burgoa. Ingeniería de rocas en el túnel de conducción superior del proyecto Hidroeléctrico Porce III- Colombia.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TunelTuluabajo- 0042

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel de Carga - Tuluá Bajo	LOCALIZACIÓN	Tuluá - Valle del Cauca
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidroeléctrica	PENDIENTE %	1
AÑO	2011	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Rectangular	LONGITUD (m)	5400

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Grupos Diabasicos y basaltos	
EDAD DE LA ROCA	Cretáceo	
TIPO DE ROCA	rocas volcánicas y sedimentarias	
ALTURA TUNEL (m)	3	
ANCHO TUNEL (m)	3	
ALTERACION DEL MACIZO	Medianamente a muy alterado.	
TIPO DE TERRENO	Mediana y baja calidad	
METODO DE EXCAVACION	Mecánica	
MEDIDAS DE SOPORTE	Concreto hidráulico y lanzado de 28 Mpa.	
REVESTIMIENTO	Concreto Lanzado y blindaje	

#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

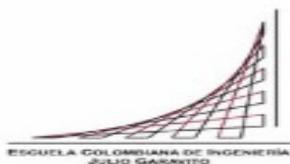
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Flujos de agua asociados a la geología de las capas volcánicas y diaclasamiento de las coladas de lava.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin información	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-07	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.2037E-05	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO		
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Bombeo y drenaje longitudinal del túnel.	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Revestimiento concreto hidráulico	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Flujo y chorros localizados a lo largo del túnel.	

#### COMENTARIOS GENERALES

Ubicada en la cuenca media del río Tuluá, el corredor de la línea de distribución parte de la casa de máquinas (cota 1247) hasta la subestación Tuluá, cruzando por los municipios de Buga, San Pedro y Tuluá. El proyecto se desarrolla entre las cotas 1477 y 1247, la presa tiene una longitud de 50 m de ancho y 7 m de altura, el área de inundación es de 2 ha, la bocatoma es lateral, se sedimenta en un desarenador de dos naves de 13 m de ancho y 40 m de longitud, de ahí se conduce a través de canales hasta el tanque de sumergencia y por el túnel de conducción que tiene 5.73 km de longitud. En la salida del túnel se tiene un blindaje metálico de 244 m que se conecta con la tubería de carga de aproximadamente 400 m de longitud que conecta con la casa de máquinas. En la casa de máquinas se cuenta con dos turbinas Francis de eje horizontal. Parcialmente revestido concreto hidráulico en un 25%. Las aguas originadas en la cuenca son aprovechadas por el complejo de generación hidroeléctrica del Alto y Bajo Anchicayá, cuya capacidad es de 404 Mw.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016.  
<http://blog.360gradosenconcreto.com/centrales-hidroelectricas-en-el-corazon-del-valle-hidrotuluá/>



**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**  
Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

TunelTuluaito 0043

**DATOS GENERALES**

<b>PROYECTO</b>	Túnel de Carga - Tuluá Alto	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Tuluá
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Hidroeléctrica	<b>PENDIENTE %</b>	1
<b>AÑO</b>	2011	<b>COBERTURA (m)</b>	-
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Rectangular	<b>LONGITUD (m)</b>	5700

**DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION**

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Grupos Diabasicos y basaltos	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Cretáceo	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Rocas volcánicas y sedimentarias	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	3	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	3	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Medianamente a muy alterado.	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Mediana y baja calidad	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Mecánica	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Concreto hidráulico y lanzado de 28 Mpa. Arcos de acero	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto Lanzado y blindaje	

**CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA**

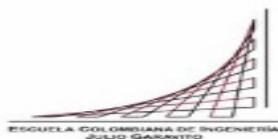
<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Flujos de agua asociados a la geología de las capas volcánicas y diaclasamiento de las coladas de lava.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-07	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	1.05263E-05	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>		
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Bombeo y drenaje longitudinal del túnel.	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Revestimiento concreto hidráulico	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Flujo y chorros localizados a lo largo del túnel.	

**COMENTARIOS GENERALES**

La central del Alto Tuluá está ubicada en la cuenca media del río Tuluá. El corredor de la línea de distribución parte de la casa de máquinas (cota 1516) hasta la subestación Tuluá, cruzando por los municipios de Buga, San Pedro y Tuluá. El proyecto se desarrolla entre las cotas 1800 y 1516, la presa de barrera tiene una longitud de 34 m de ancho, el área de inundación es de 0.5 ha. En este sector se hace la toma de agua, se conduce por canales y se sedimenta en un desarenador de dos naves de 12 m de ancho y 81.2 de longitud, de ahí se realiza la sugerencia para ingresar el agua al túnel de conducción que tiene 5.13 km de longitud. En la salida del túnel se tiene un blindaje metálico de 155 m que se conecta con la tubería de carga de aproximadamente 600 m de longitud, que conecta con la casa de máquinas. En la casa de máquinas se cuenta con dos turbinas Francis de eje horizontal. La capacidad instalada es de 20 MW, se espera una producción anual media de 127 GWh/año. Parcialmente revestido concreto hidráulico en un 15%.

**Fuente y referencias Bibliográficas**

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016.  
<http://blog.360gradosenconcreto.com/centrales-hidroelectricas-en-el-corazon-del-valle-hidrotulua/>



**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**  
Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control, manejo de agua e impermeabilización en túneles

**Anexo - Casos históricos**

**Febrero 2017**

**FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION**

**tunelpalarioblanco- 0044**

**DATOS GENERALES**

<b>PROYECTO</b>	Túnel Palacio Río Blanco	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Cundinamarca
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Hidráulico	<b>PENDIENTE %</b>	1
<b>AÑO</b>	1990	<b>COBERTURA (m)</b>	
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura Sección Plana	<b>LONGITUD (m)</b>	28280

**DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION**

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Rocas sedimentarias del Cretácico, compuestas por: lutitas, limolitas, areniscas y arcillolitas.		
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Cretácico		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentarias		
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	3.7		
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	3.7		
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	En contacto con el agua presenta fenómenos de empujes e hinchamiento		
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas blandas y mineralogía reactiva		
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Mecánica		
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Pernos, arcos de acero, concreto fundido in situ		
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto Hidráulico, pernos		

**CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA**

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Filtraciones asociadas al sistema de diaclasamiento, y mineralogía de la roca		
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	0		
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-06		
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	1.06082E-05		
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Pernos en el contorno de la excavación.		
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Desniveles, bombeo		
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Revestimiento concreto in situ.		
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Goteos y chorros continuos.		

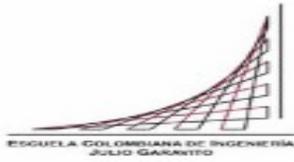
**COMENTARIOS GENERALES**

Macizo corresponde a material de baja resistencia, generara grandes desplazamientos por redistribución de esfuerzos. • Deformación controlada de 25 cm. Permitirá controlar presión con concreto neumático y pernos. • Sobreexcavación de 0.5m. En la actualidad el túnel está compuesto por varios tipos de secciones transversales: las del tipo herradura sin revestir de 3.70 m de diámetro, las de herradura con concreto neumático, las de herradura con soportes de acero, las de herradura con revestimiento de concreto, la circular revestida de concreto de 3.20 m de diámetro y la circular blindada de 2.72 m de diámetro en el sector de la cámara de la válvula Howell Bunger.

**Fuente y referencias Bibliográficas**

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Abril de 2017. <http://www.actiweb.es/jriveras/pchventana.html>. Consultado el día 6 de Abril de 2017.

# **CASOS HISTORICOS INTERNACIONALES.**



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

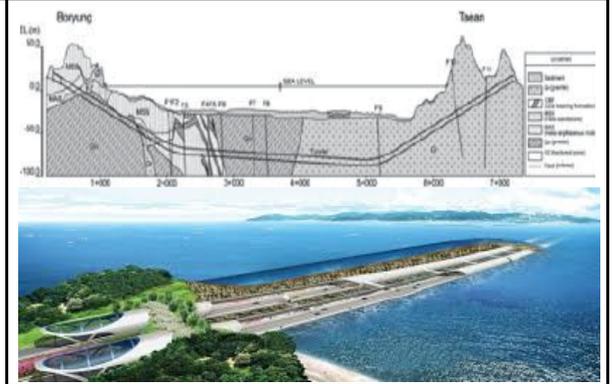
Int - Korea1 - 0001

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Boryung tunnel	LOCALIZACIÓN	Corea del Sur
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel bajo el mar	PENDIENTE	1
AÑO	-	COBERTURA (m)	80
TIPO DE SECCIÓN	Circular	LONGITUD (m)	6927

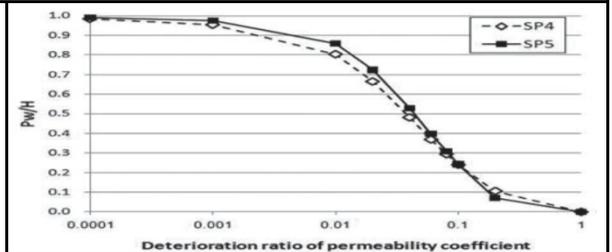
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	La cobertura y zona de excavación del proyecto corresponde a geológica del fondo marino, correspondiendo a granitos y rocas metamórficas, hacia la parte frontal del túnel se encuentra material de arenisca. La condición geológica del Gneis que se encuentra en el proyecto es muy buena desde el punto de vista de ingeniería, sin embargo las rocas sedimentarias y metamórficas sus características presenta una calidad y características ingenieriles bajas y complejas debido a la intercalaciones de los estratos de arenisca, lutitas, esquisto y estratos de carbón.	
EDAD DE LA ROCA		
TIPO DE ROCA	Gneis, Areniscas, lutitas, Esquistos	
ORIGEN DE LA ROCA	Ígnea / Metamórfica / Sedimentaria	
ALTURA TUNEL (m)	10	
ANCHO TUNEL (m)	10	
ALTERACION DEL MACIZO	Buenos a muy alterados	
TIPO DE TERRENO	Mediano a baja calidad	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Bulones, concreto lanzado, arcos Lattice girder e Inyecciones	
REVESTIMIENTO	Capas de concreto	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Macizos impermeables y con una condón hidrogeológica de acuífero, en las zonas mas próximas a los portales se presenta deterioro de la calidad del macizo, cambios en la geología presentando múltiples zonas de infiltración.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.2 e-5 a 4e-5	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	7.22E-08	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Inyecciones, bulones y anclajes	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Drenes y capas de concreto impermeable	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Inyecciones al terreno, capas de revestimiento, membranas	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Alta presión de agua de infiltración ingresando por fracturas del macizo	

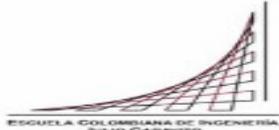


### COMENTARIOS GENERALES

Construcción del túnel arranco en 2010. Los esfuerzos generado por la cobertura, además de la presión de agua por las infiltraciones de agua subterránea fueron variables, su condición dependía de las juntas, diaclasamiento, alteración del macizo. Para el diseño del soporte se adoptó el modelo donde la trasferencia de las cargas que soportara el túnel, se distribuirá en los soportes primario, secundaria y el contorno de la excavación, evaluando en una condición conservadora en los modelos el túnel sin elementos de soporte bajo la condición de Terzaghi de Carga de roca. Finalmente, se adopto una metodología Ground-Lining Interacción, para la ejecución delas medidas de revestimiento y soporte de los trabajos subterráneos.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

Kwang-Su Joo & Young-Ho Suh. (2012). Harmonising Rock Engineering and the Environment – Qian & Zhou (eds) - The secondary lining design of subsea tunnel due to water inflow, pag 184 - 185



Luis Alejandro Ruiz

# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

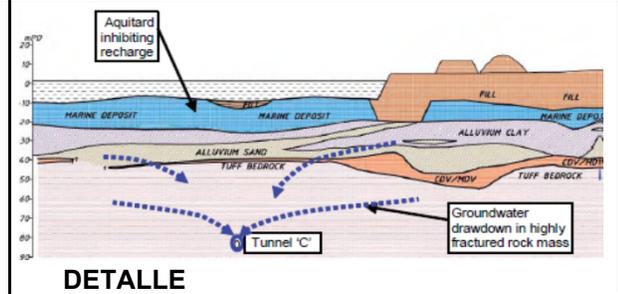
## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int - Hong Kong1 - 002

<b>PROYECTO</b>	Túnel C Suburbano	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Bahía Tseung Kwan / Hong Kong
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Vial	<b>PENDIENTE</b>	Sin información
<b>AÑO</b>	-	<b>COBERTURA (m)</b>	30 a 150
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Circular	<b>LONGITUD (m)</b>	1700

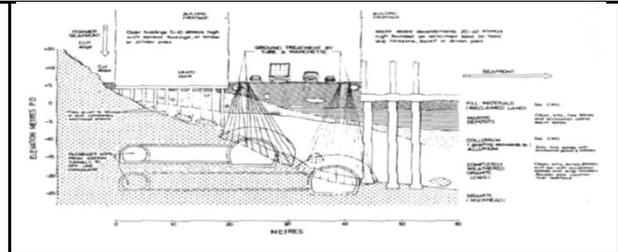
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	El modelo geológico y los mecanismos de las aguas subterráneas inferidos se muestran en la Figura, la zona de Tseung Kwan O Bay es un paleo valle que probablemente está relacionado con la erosión a lo largo de un sistema de fallas NNW-de tendencias dentro de la masa de roca toba general articulado estrechamente. Los canales de arena aluviales corren a lo largo del eje de la paleo valle y se han depositado los aluviones arcillosos y depósitos marinos. La aportación de agua en el túnel y la prevención de la recarga efectiva de los depósitos marinos llevaron a menores de drenaje de los depósitos marinos debajo de la recuperación a través de los canales de macizo rocoso, saprolito y arena aluvial.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Sin información	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Depósitos aluviales, volcánicos y granito	
<b>ORIGEN DE LA ROCA</b>	Ígnea, sedimentaria	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	3.56	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	4.8	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Medianamente a muy alterado	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Maquina Tunneladora	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Congelación e inyecciones	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Mampostería, revestimiento en concreto	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	El contacto e interacción de los depósitos aluviales con el material y roca de granito a generado la migración y sellamiento de las fracturas y juntas que se presentan en el túnel, generando sistemas acuitardos, en las zonas donde se presentan fallas se tienen filtraciones continuas y extendidas a lo largo de las obras.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	6.88235E-05	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Preinyecciones - Post inyecciones	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Inyecciones, drenes, revestimiento en concreto	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Preinyecciones - Post inyecciones, capas impermeabilización concretos	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Goteos continuos, preferencialmente en las zonas de falla y cizallamiento	

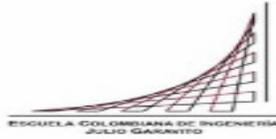


### COMENTARIOS GENERALES

Medidas de abatimiento por pozos de bombeo, congelación del macizo de mala calidad y preinyecciones de mejoramiento. Aunque algunos picos en la tasa de entrada de agua parecían estar relacionadas con las fallas y la intensidad conjunta, la tasa media de entrada de agua aumentó constantemente hasta alrededor de 7.000 litros por minuto en el momento en el túnel se había progresado hasta el PK 1,700, además de una presión de agua de 15 Bar. El nivel de las aguas subterráneas por consiguiente, se dibuja hacia abajo, y los grandes asentamientos, inesperados ocurrió a distancias de hasta 2 km del túnel.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Civil Engineering and Development Department The Government of the Hong Kong Special Administrative Región



# Escuela Colombiana de Ingeniera Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

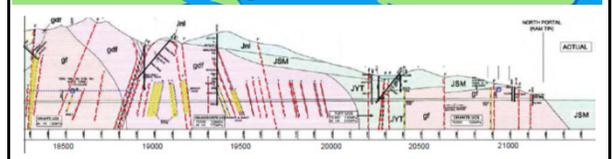
## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int -HongKong2 - 0003

PROYECTO	Route 3 Country Park Sección – Tai Lam Túnel (dual 3-lane)	LOCALIZACIÓN	Hong Kong
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel vial	PENDIENTE	-
AÑO	1998	COBERTURA (m)	
TIPO DE SECCIÓN	Bóveda	LONGITUD (m)	3800

## DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Roca granito de buenas características, hacia la parte exterior de los portales desmejora, sistemas de fallas Ho Pui Falla y Tseng Sham interceptan el túnel	
TIPO DE ROCA	Granito - Grano fino	
EDAD	Jurásico y Cretácico Temprano	
ORIGEN DE LA ROCA	Ígnea	
ALTURA TUNEL (m)	10.9	
ANCHO TUNEL (m)	14	
ALTERACION DEL MACIZO	Roca fresca, en portales y superficie granito muy alterado	
TIPO DE TERRENO	Buena calidad, en portales pobre a extremadamente pobre	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura, en los portales entibado y anclajes	
MEDIDAS DE SOPORTE	En la zona de portales inyecciones	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado	



## CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Granito de buena calidad, que actúa como barrera impermeable, infiltración esporádica por juntas y sistema de fallas que intercepta el túnel	
NIVEL FREATICO (m)	Sin información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.84E-06	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	En zona de portales inyecciones químicas	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Revestimiento en concreto, canalización y drenaje	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Inyecciones al terreno, capas de revestimiento	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION		

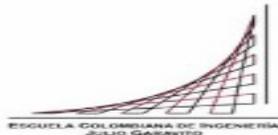


## COMENTARIOS GENERALES

Esta obra inaugurado en mayo de 1998, el proyecto de obra civil se construyo siguiendo el esquema NATM de construcción de túneles, las distancias entre elementos de sostenimiento fueron de 15 a 18 metros en la zona donde se presentaba la roca masiva. El avance se realizo siguiendo patrones controlados de voladura evaluando la incidencia de las detonación frente a infiltraciones esporádicas del macizo.

### Fuente y referencias Bibliográficas

Government of the Hong Kong. (2007). Geotechnical Engineering Office. GEO PUBLICATION No. 1. Hong Kong.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int -HongKong3 - 0004

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Kau Shat Wan Tunnel and Audits (Mines División Lantau Island Explosives Magazine)	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Hong Kong
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Minería / Almacén para Explosivos	<b>PENDIENTE</b>	
<b>AÑO</b>	1997	<b>COBERTURA (m)</b>	
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura paredes planas	<b>LONGITUD (m)</b>	1150

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Granito de grano con intrusiones y diques de riolita feldespáticas.	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Granito y Riolita	
<b>EDAD</b>	Jurásico y Cretácico Temprano	
<b>ORIGEN DE LA ROCA</b>	Ígnea	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	6.8	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	20	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Alterado en la zona de portal	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Macizo de mediana a baja calidad	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Se utilizaron casi 7000 pernos, longitudes de 3 a 4 m, (algunas de hasta 6 m), perno separación generalmente alrededor de 2 m o menos.	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto lanzado, en portales hormigón Armado. Acerca de 10.00m <sup>2</sup> de hormigón no reforzado (40 mm - 100 mm) y 6.000m <sup>2</sup> de hormigón proyectado reforzado con fibras	



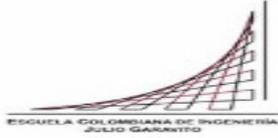
### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Se presento elevada afluencia de agua en varias zonas cortadas o diques de basalto. En la actualidad presenta filtración y goteos localizados en las paredes y zonas adyacentes a los almacenes principales.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	30 m	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	Sin información	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Pernos en cuñas de roca	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Revestimiento en concreto, canalización y drenaje, membranas	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Membranas, canalización	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Humedad y goteos en revestimiento en concreto	



### COMENTARIOS GENERALES

<p>Obra esta destinada para la manipulación, almacenamiento, transporte y uso de explosivos en Hong Kong, consta de un túnel de acceso 1,15 kilómetros de largo, diez socavones de 27 m de largo, con una capacidad de almacenamiento de 500 toneladas de explosivos, construido en 1997, los cuales fueron diseñados siguiendo la metodología de análisis de Q y evaluación por bloques y cuñas. Tiene una zona de vuelo restringido de 350 m de radio y 400 m de exclusión del mar desde el muelle de descarga. Cada depósito de almacenamiento (50 toneladas de capacidad) reforzó la estructura de caja de hormigón de 17 m de largo, 7 m de luz y 3,5 m de altura.</p>
<b>Fuente y referencias Bibliográficas</b>
<p>La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Proceedings of the 30th International Geological Congresses y Chan &amp; Ng (2006). Civil Engineering and Development Department The Government of the Hong Kong Special Administrative Region</p>



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int -HongKong4 - 0005

PROYECTO	Tai Lam túnel	LOCALIZACIÓN	Hong Kong
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel Vial - bidireccional	PENDIENTE	-
AÑO	2004	COBERTURA (m)	360
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Alta	LONGITUD (m)	5500

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El macizo rocoso se compone de rocas tobas volcánicas, granito intrusivo, granodiorita, dacita, dique de basalto, riolita dique. El proyecto atravesó zonas de fallas 1-8 m de ancho.	 
TIPO DE ROCA	Granito intrusivo, granodiorita, dacita, dique de basalto, riolita	
EDAD	Ígnea - Metamórficas	
ORIGEN DE LA ROCA	Ígnea - Metamórficas	
ALTERACION DEL MACIZO	Roca alterada en zona de portales y fallas, granodiorita fracturado, débil, moderada y altamente degradado	
TIPO DE TERRENO	Sin información	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Medidas de enfilaje y soporte temporal con preinyecciones.	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado y reforzado, 200 a 500 mm de espesor	

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

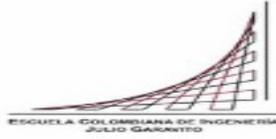
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	En zona de portales roca alterada y fallas sistemáticas, infiltración de agua importante en las zonas donde la roca desmejora	
NIVEL FREATICO (m)	Sin información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.27E-06	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Preinyecciones químicas, en las proximidades de las zonas de falla	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Drenes longitudinales	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Geomembranas de impermeabilización	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION		

### COMENTARIOS GENERALES

Para el avance del túnel se utilizó trituradoras, con una cinta transportadora de 3.5 Km de largo, con la excavación del túnel producirá en torno a los 700.000 metros cúbicos de roca.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Gould et al (2002), GEO (2007). Civil Engineering and Development Department The Government of the Hong Kong Special Administrative Región



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - Milan Italia - 0006

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Suburbanos Milán	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Milán, Italia
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Ferroviario	<b>PENDIENTE</b>	1.40%
<b>AÑO</b>	2004	<b>COBERTURA (m)</b>	20 a 60
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura paredes circulares	<b>LONGITUD (m)</b>	80000

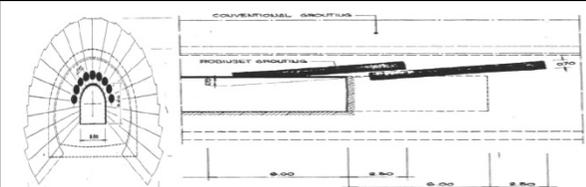
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Depósitos fluvio-glaciares con un espesor promedio entre 50 a 60 ms, compuestos por arenas y gravas en una matriz arcillosa poco a medianamente consolidados		
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Depósitos recientes		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Conglomerados, arenas y arcillas		
<b>ORIGEN DE LA ROCA</b>	Sedimentaria		
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	8.5		
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	10.5		
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Medianamente alterados		
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas blandas y suelos		
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Maquina Tuneladora		
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Inyecciones y mejoramiento		
<b>REVESTIMIENTO</b>	Dovelas y segmentos pre construidos		



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Materiales poco consolidados, niveles piezómetros y de presión de agua de acuerdo a la geología heterogénea del macizo.		
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	15		
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información		
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	Sin información		
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Inyecciones de consolidación y mejoramiento del terreno		
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Cunetas y zanjas longitudinales, sistemas de multicapas para drenaje y conducción del agua de infiltración		
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Membranas, preinyecciones. La mezcla contiene; aceleradores alcalinos para el sistema de hormigón proyectado húmedo, superplastificante establecimiento de inhibidores para el relleno de lechada y retardadores para el sistema de hormigón y relleno. Estabilizador de bombeo y sistema de ayuda para el relleno.		
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Sin información		

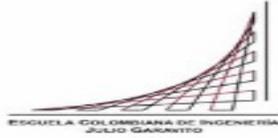


### COMENTARIOS GENERALES

El proyecto ferroviario consiste en una longitud de 80 km, más de 90 estaciones. Junto a esto, durante finales de los 80 y principios de los 90, el MM construyó una conexión subterránea ciudad entre todas las estaciones de ferrocarril principales de la ciudad: el Passante Ferroviario con una longitud de 10 km conecta 7 estaciones de ferrocarril. En las líneas férreas necesitan capacidad de carga muy rápido de hormigón proyectado. Altamente mecanizada con el método EPB - TBM ha sido adoptado. El relleno de lechada, como la estabilización del revestimiento prefabricado, se bombea mientras que el EPB está excavando, siendo un factor fundamental para evitar los asentamientos en la ciudad de la superficie.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. SIKA -Milán Underground System.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

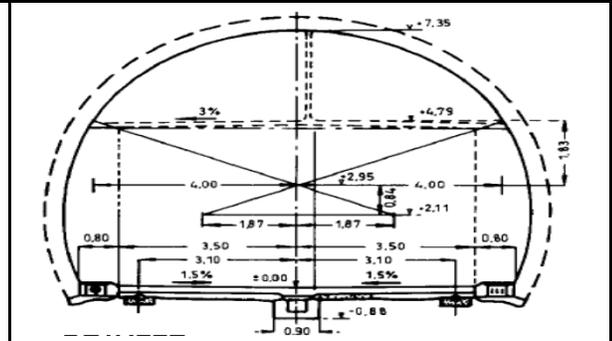
## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int - Austria - 0007

PROYECTO	Felbertauern Túnel	LOCALIZACIÓN	Austria
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel Vial	PENDIENTE	1.70%
AÑO		COBERTURA (m)	
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Curvas	LONGITUD (m)	5183

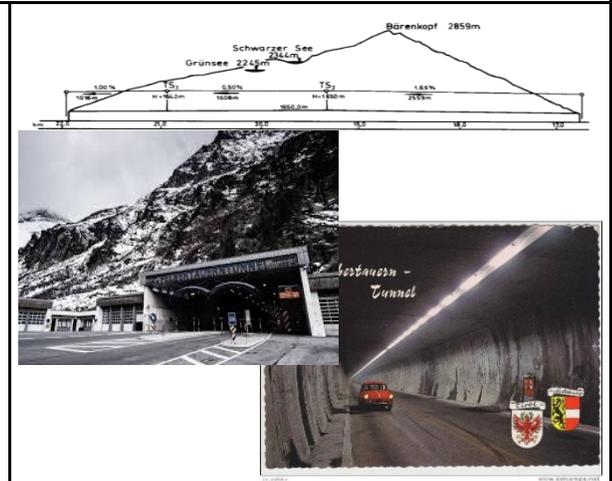
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Gneis, anfibolitas y pizarras	
TIPO DE ROCA	Ígneas - Metamórficas	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	11	
ALTERACION DEL MACIZO	En zona de portales se encuentra meteorizado y fracturado	
TIPO DE TERRENO		
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Hormigón, 400 mm de espesor, resistencia a la compresión 30N/m <sup>2</sup> , compuesto por 13 articulaciones de bloques sin sellar	
REVESTIMIENTO	Hormigón armado sin refuerzo	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Agua de infiltración en las juntas y diaclasas del macizo, zonas alteradas cerca ala superficie, recargas debido a zonas de drenaje y precipitaciones	
NIVEL FREATICO (m)	Sin información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se realizaron	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Canalización, drenes y canalización de aguas de infiltración, el agua de infiltración se recogió mediante el método de Oberhasli y fluye hacia el desagüe de fondo, que tiene cámaras de inspección cada 100 m. losa de techo (13 cm de espesor) está hecho de hormigón armado.	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Membranas, capas en concreto	
CARACTERISTICA DE LA INFILTRACION	El túnel presento daños, fugas y filtraciones de agua en las juntas de los anillos en los portales, en las losas de techo. Además fisuras por el congelamiento	

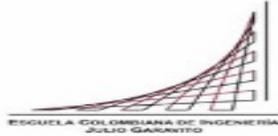


### COMENTARIOS GENERALES

El mantenimiento del sistema de drenaje diseñada será posible a través de las pequeñas bocas de acceso (cajas de servicio) en el cruce de los canales horizontales y las tuberías laterales de conexión al desagüe principal. Si la calcificación obstruye las ranuras verticales, la chapa de aluminio con el material de aislamiento, así como la membrana de impermeabilización se puede quitar fácilmente y el canal limpiado. Debido a la capacidad de mantenimiento del sistema y su aplicación flexible y de bajo costo el diseño fue elegido para rehabilitar el túnel Felbertauern. Por otra parte, el método ofrece una gran oportunidad de fugas de estructuras subterráneas para ser convertidos en los túneles secos modernos

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

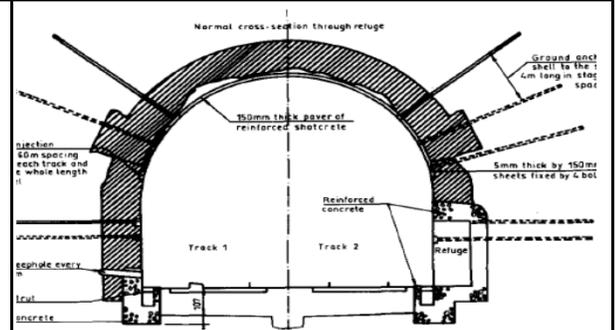
## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int - France - 0008

<b>PROYECTO</b>	Foug-tunnel	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Francia
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Túnel Ferroviario	<b>PENDIENTE</b>	1.00%
<b>AÑO</b>	1846 - 1851	<b>COBERTURA (m)</b>	
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Semicircular	<b>LONGITUD (m)</b>	1123

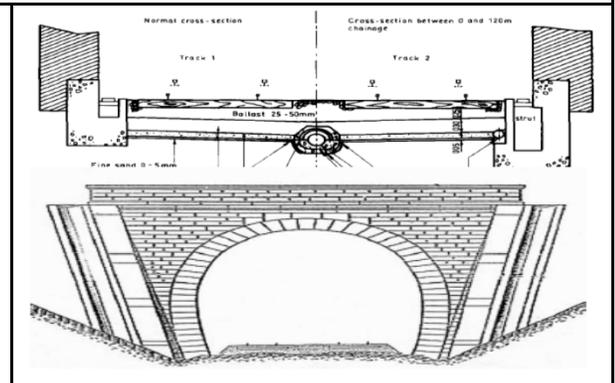
## DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	La geología de los túneles consiste en su parte superior de calizas, en el medio, la alternancia de margas arenosas y calizas silíceas; y en la parte inferior, de margas de arena de pasar a arcillas que son muy sensibles al agua.	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentaria	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	2.3	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	7.4	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Alterado, fenómenos de disolución	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Alterado, fenómenos de disolución	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Sin Información	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Concreto e inyecciones cementicias, concreto lanzado 150 mm de espesor	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto lanzado	



## CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Las formaciones de piedra caliza y los estratos de alternancia de margas y calizas forman la base de un estrato portador de agua, lo que hace que el agua significativa en los flujos a través de las paredes del túnel.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin Información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin Información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	Sin Información	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Medidas de inyecciones cementicias, reforzamiento del contorno de la excavación	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	El agua se recoge en canales laterales y conector longitudinal para el direccionamiento del agua de 300 mm de diámetro	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Inyecciones y mejoramiento del terreno	
<b>CARACTERISTICA DE LA INFILTRACION</b>	Humedad e infiltraciones a lo largo de la infraestructura	

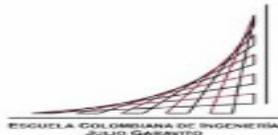


## COMENTARIOS GENERALES

El proyecto fue construido en 1850, con medidas de revestimiento de roca y daños en el macizo por disolución de la roca, la cual fue reparada en el transcurso del siglo XX con medidas de mejoramiento e inyecciones cementicias, instalación de membranas y productos de impermeabilización, y concreto reforzado.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Inventario de túneles ferroviarios de Francia. Código 54306.1



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

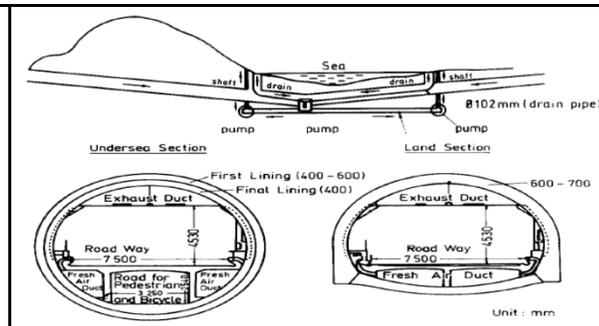
Int - Japón - 0009

PROYECTO	Kanmon Roadway Túnel
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel Vial
AÑO	1944
TIPO DE SECCIÓN	Circular y rectangular

LOCALIZACIÓN	Japón
PENDIENTE	1.80%
COBERTURA (m)	1100
LONGITUD (m)	3600

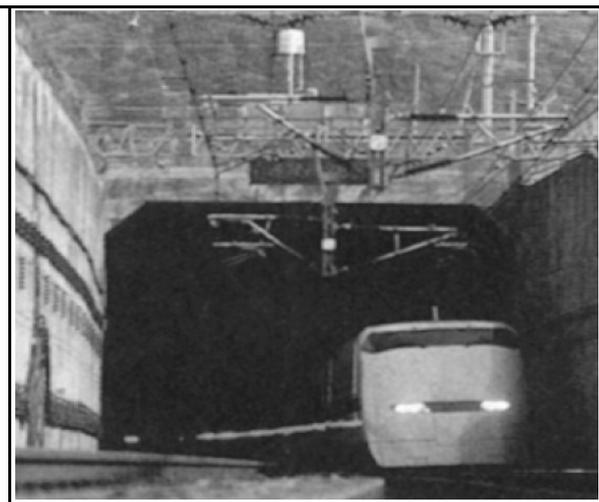
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Roca ígnea, metamórfica y sedimentaria.
TIPO DE ROCA	Estratos Mesozoicos
ALTURA TUNEL (m)	6
ANCHO TUNEL (m)	8
ALTERACION DEL MACIZO	Roca masiva, alteración en la zonas de portal y contactos de los diferentes paquetes geológicos
TIPO DE TERRENO	Masivo bueno, desmejora calidad hacia la zona de portales .
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura
MEDIDAS DE SOPORTE	Hormigón
REVESTIMIENTO	Concreto reforzado con malla



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Filtraciones localizadas en los contactos, intercalaciones y discontinuidades del macizo, en las proximidades de los portales alteración de la roca, múltiples zonas de filtración.
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Anillos de impermeabilización
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Drenes longitudinales de 102 mm de diámetro.
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Agentes de resina y medidas de impermeabilización de las bóvedas, los compuestos se mezclan con agua y se recubren sobre la superficie del hormigón. Después del recubrimiento, estos compuestos reaccionan permeables con la cal aislado del hormigón para alcanzar la cristalización y, por consiguiente, llenar el vacío capilar del hormigón, lo que resulta en un efecto de sellado.
CARACTERISTICA DE LA INFILTRACION	Humedad e infiltración en zonas de juntas de las placas de revestimiento.

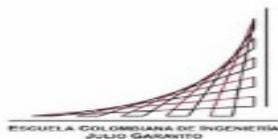


### COMENTARIOS GENERALES

El hormigón instalado presentó fenómenos de corrosión por infiltración del agua marina, además de daños en las instalaciones eléctricas por la salinización y corrosión. Un programa de 10 años de medidas de prevención de fugas de agua se ha llevado a cabo desde 1979; 10740 m están siendo tratados con obras de corte. Las medidas aplicadas implican la colocación de tuberías de desagüe y los revestimientos de hormigón de recubrimiento con un agente de sellado llama Hydeck-K-11, que se compone de los productos químicos permeables especiales como partículas de cemento y emulsión de resina. Los rieles se sustituyen cada 5,8 años. rielles de acero aleado tentativamente se han colocado en la sección submarina, y se está analizando su eficacia. Para otros materiales las medidas de prevención de la corrosión tales como la sustitución y limpieza de los elementos de sujeción se cardan a cabo. Un revestimiento periódica de resina de silicona se aplica al aislador, y se emplean tornillos de titanio aleado para los accesorios de tubería de drenaje también.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

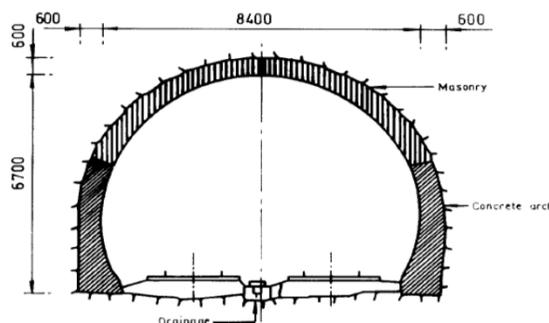
### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int - Suiza - 0010

PROYECTO	Basel / Olten Hauenstein túnel	LOCALIZACIÓN	Suiza
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel ferroviario	PENDIENTE	Sin información
AÑO	1916	COBERTURA (m)	Sin información
TIPO DE SECCIÓN	Semicircular	LONGITUD (m)	8100

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Hacia la parte norte se presentan estratos de arcilla margosa, poco permeable, presenta características de hinchamiento, con presión entre 20 a 200N/cm <sup>2</sup> , en la parte intermedia se presenta limos con filtraciones agua.	
TIPO DE ROCA	Arcillas y limos	
ALTURA TUNEL (m)	7	
ANCHO TUNEL (m)	8.6	
ALTERACION DEL MACIZO	Arcillas con características de hinchamiento y fenómenos de swelling	
TIPO DE TERRENO	Rocas blandas	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica	
MEDIDAS DE SOPORTE	Arcos en concreto	
REVESTIMIENTO	Revestimiento en concreto 600 mm de espesor, concreto lanzado	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Materiales de roca blanda poco permeable muy susceptibles a fenómenos de hinchamiento, swelling.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m <sup>3</sup> /seg/ml)	3.7037E-06	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Revestimiento en concreto 600 mm de espesor, concreto lanzado	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Drenajes laterales y canales colectores longitudinales	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Sellamiento de las fisuras y zonas de infiltración de los trabajos	
CARACTERISTICA DE LA INFILTRACION	Humedad y filtraciones a lo largo de la excavación	

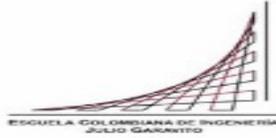


### COMENTARIOS GENERALES

Se presentaron fenómenos de humedad considerable en toda la estructura; en la solera; el agua tiene un tanto altas concentraciones de cal y sulfato. Fenómenos de corrosión y daños en las instalaciones eléctricas, rieles y estructura del túnel. Fenómenos de Swelling genera cambios en la pendiente y alineación de los túneles.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - Suiza - 0011

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Andeer / Sufers Rofla Túnel	LOCALIZACIÓN	Suiza
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel Carretera	PENDIENTE	5.60%
AÑO	1969	COBERTURA (m)	150
TIPO DE SECCIÓN	Herradura paredes Planas	LONGITUD (m)	995

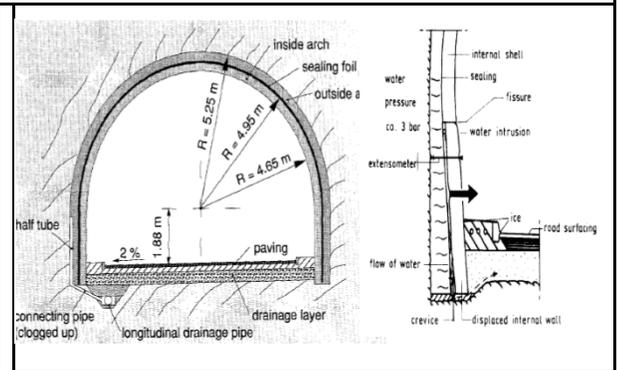
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel fue excavado en roca granítica y pórfidos, con materiales de gneises, presenta diversidad de zonas de falla y sistemas de fractura estructural determinados en los sondeos.	
TIPO DE ROCA	Ígnea / Metamórfica	
EDAD	-	
ALTURA TUNEL (m)	4.6	
ANCHO TUNEL (m)	4.6	
ALTERACION DEL MACIZO	Buena calidad y alterado en zonas de falla	
TIPO DE TERRENO	Buena calidad	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Hormigón	
REVESTIMIENTO	Estructura interna de hormigón de 30 cm de espesor; sellado de plástico entre la capas interior y exterior.	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Las recargas del agua subterránea se encuentra ligado a los sistemas de fractura determinados en los patrones estereográficos, presentando además zonas de cizallamiento activas. Además con filtraciones y fugas localizadas en puntos de la vía de evacuación	
NIVEL FREATICO (m)	Sin información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se requirió	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Perforaciones laterales de drenaje de 160 mm de diámetro, cunetas longitudinales de desagüe	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Cementación y sellado de las juntas de los bloques de concreto pre construidos	
CARACTERISTICA DE LA INFILTRACION	Humedad, filtraciones y goteos localizados	

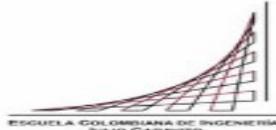


### COMENTARIOS GENERALES

El túnel Rofla es parte de la suiza Carretera Nacional N ° 13, que conecta el valle del Rin con el valle Mesolcina. Fue construida entre 1966 y 1969 por medio de la voladura. Se encuentra a unos 1250 metros sobre el nivel del mar y 1080 metros de largo, cayendo desde el sur al norte. El arco del túnel consiste en dos arcos de hormigón de 30 cm de espesor con una hoja de cierre hermético entre ellos. En la base del túnel unos 40 centímetros de espesor. El túnel presento fenómenos de fisuramiento en la estructura interna del hormigón instalado, se reporto presión de agua de 20 Bar.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016.



Luis Alejandro Ruiz

# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

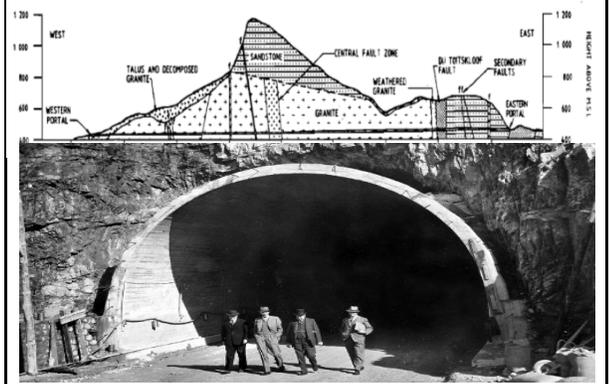
Int - Sudafrica1 - 0012

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel de Du Toitskloo	LOCALIZACIÓN	Sudáfrica
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel carretero	PENDIENTE	1.00%
AÑO	1988	COBERTURA (m)	60
TIPO DE SECCIÓN	Herradura paredes curvas	LONGITUD (m)	700

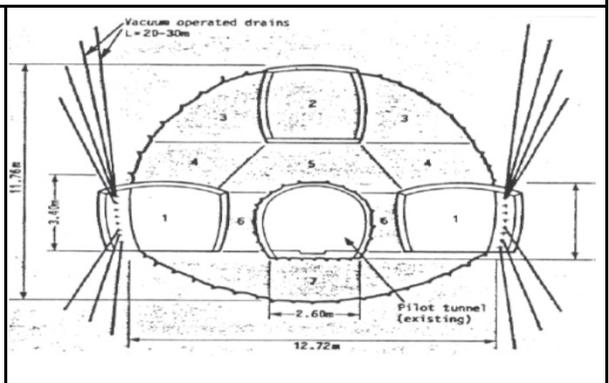
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	En superficie y hacia la parte superior de la formación se compone de roca arenisca, del grupo Cabo, que recubre los depósitos de granito, recubierto por depósitos de talud, coluviones. Los cuales se encuentran relacionados a las fases tectónicas de la estructura sinclinal de Malmbsuri, aproximadamente 610 a 505 m.a, los cuales han aflorando en superficie por fenómenos de erosión y sedimentación del grupo de areniscas techo de la formación. Estructuralmente se pueden distinguir zonas de cizallamiento de la falla de Toitskloof Du, la cual se extiende en superficie generando un amplio valle.	
EDAD DE LA ROCA	-	
TIPO DE ROCA	Arenisca, granitos, coluviones	
ORIGEN DE LA ROCA	Ígnea / Sedimentaria	
ALTURA TUNEL (m)	11.76	
ANCHO TUNEL (m)	12.72	
ALTERACION DEL MACIZO	Degradación y alteración hacia la zona de portales	
TIPO DE TERRENO	Buena calidad	
METODO DE EXCAVACION	Mecánica por etapas	
MEDIDAS DE SOPORTE	Sostenimiento natural, en la zona de fallas pernos, concreto reforzado y arcos de acero TH29	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado entre 100 a 150 mm de espesor.	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Los túneles de roca fueron en gran parte seco con en general, siendo las aguas subterráneas restringida a zonas de cizalla y fallas. la mayor parte del agua que está presente como la filtración lenta en roca erosionada, el agua subterránea no causó ningún problemas durante la excavación.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin información	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-07	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	2.14E-05	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Preinyecciones de mejoramiento, congelamiento transitorio, en la zona de portales, de pernos de 4 m de largo resina anclada pernos tensados.	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Instalación de zanjas y concreto	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Membranas impermeables, antes del revestimiento de hormigón	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	En general la roca no presenta filtraciones	

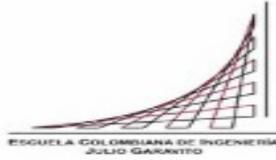


### COMENTARIOS GENERALES

En la zona de los portales se presenta con un alto grado meteorización, en obras complejas y medidas de mejoramiento del terreno por preinyecciones con longitud de 10 m, con una longitud total de 3000 m, con soluciones cementicias para el sellamiento de las fracturas, hacia la parte central del macizo se presentan fallas. Como revestimiento se colocó entre 100 mm a 150 mm de espesor de hormigón proyectado reforzado junto con el patrón de uso de pernos de 4 m de largo resina anclada pernos tensados a aproximadamente 1,5 m centros. Además donde se presentaron algunos desprendimientos se instaló arcos de tipo TH29 espaciados a 1 metro a 1,5 metros y rellenadas con hormigón proyectado reforzado con malla, para la zonas de los portales se instaló arcos pesados G1140 distanciados entre 0.8 a 1m, además con las presiones en el piso se instaló un arco invertido para completar el anillo de la sección. Se realizó seguimiento y monitoreo de los túneles, niveles de convergencia, la instalación de extensómetros de múltiples puntos, se instalaron células entre el revestimiento de hormigón y roca excavada la superficie para monitorear los esfuerzos (células tangenciales), evaluando la presión radial.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Artículo Du Toitskloof Túnel: A Geotécnica overview, THE CIVIL ENGINEER in South Africa-April 1988



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

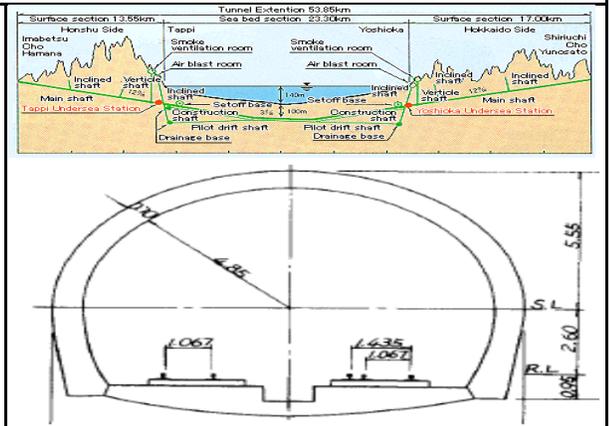
Int - Japon1 - 0013

PROYECTO	Seikan
OBRA SUBTERRÁNEA	Suburbano - Submarino
AÑO	1988
TIPO DE SECCIÓN	Herradura paredes curvas

LOCALIZACIÓN	Japón
PENDIENTE	3 - 12%
COBERTURA (m)	240
LONGITUD (m)	53800

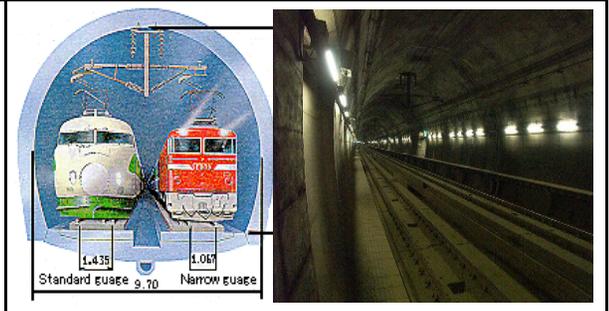
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	La geología del proyecto varia, consiste en rocas volcánicas (andesita, basalto, etc.), rocas sedimentarias (periodo Terciario toba, lutita, etc.); y la parte central se compone de estratos (periodo Terciario similar a la arena lutita). Se presenta intrusiones ígneas y fallas causadas por el cizallamiento y tectonismo de área.
EDAD DE LA ROCA	Terciarias - Neógeno
TIPO DE ROCA	Tobas, la pilli, Andesitas, Basaltos, lutitas, arenitas
ORIGEN DE LA ROCA	Rocas ígneas y sedimentarias
ALTURA TUNEL (m)	9.1
ANCHO TUNEL (m)	11.1
ALTERACION DEL MACIZO	Rocas Blandas y alteradas
TIPO DE TERRENO	Terreno inestable
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica
MEDIDAS DE SOPORTE	Preinyecciones, concreto lanzado
REVESTIMIENTO	Concreto Lanzado 150 a 200 mm, concreto armado, malla



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Las características de la roca presente múltiples zonas de fisuración, además tiene contacto con el agua de mar, que infiltre y puede ingresar a las bóvedas excavadas
NIVEL FREATICO (m)	Sin información
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.33829E-05
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Preinyecciones de 10 a 20 m, posterior se aplicó el revestimiento de hormigón proyectado.
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Zanjas y drenes longitudinales.
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Preinyecciones de mejoramiento del terreno
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Chorros y goteos

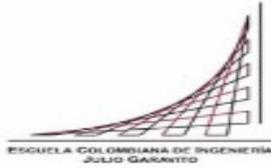


### COMENTARIOS GENERALES

Se excavo el túnel piloto y de servicios con el fin de recoger información sobre la geología, así como en las condiciones del agua de infiltración. Medidas de mejoramiento del terreno por preinyecciones con longitud de 10 a 20 m, con una longitud total de 3000 m, con cementos de consolidación y sellamiento de las fracturas. De acuerdo con otro estudio geológico en el lecho marino, llevada a cabo después, ha resistido estratos en un intervalo de aproximadamente 30 m por debajo del lecho marino, en el que la permeabilidad al agua es mayor. Además, la relación entre el recubrimiento y la tasa de agua irrupción se calculó utilizando varios modelos. La excavación del túnel principal llevada a cabo por el banco circular corta método. Durante la construcción hubo cuatro accidentes de irrupción de agua en la zona de fallas. La calidad química de las aguas de infiltración es casi cercana a la del agua del mar y es la alteración de tipo de agua de mar por intercambio de iones, y en parte es el tipo de aguas termales.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int - USA1 - 0014

<b>PROYECTO</b>	Washington	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Estados Unidos
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Suburbano - Metro	<b>PENDIENTE</b>	1.00%
<b>AÑO</b>	1987	<b>COBERTURA (m)</b>	6 a 31
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura paredes circulares	<b>LONGITUD (m)</b>	520

## DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Los suelos a lo largo del trazado del túnel incluyen principalmente suelos residuales y roca descompuesta completamente similar a la tierra. Los suelos residuales son el resultado de la erosión en el lugar de la roca subyacente y son típicamente sedimentos de arena fina, arcillas y arenas finas limosas. Compuesto por materiales de sedimentos de arena no consolidada y grava con menores cantidades de arcilla. Que contienen algunas concentraciones de óxido de hierro cementado arena o grava. Los sedimentos del Grupo Potomac, se clasifican como materiales de suelos y rocas blandas.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Depósitos recientes	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Gravas, limos, Arcillas	
<b>ORIGEN DE LA ROCA</b>	Sedimentaria - Grupo Potomac	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	4.5	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	4.3	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Roca degradada, materiales no consolidados	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas Blandas y suelos, roca descompuesta	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Excavación Mecánica	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Concreto y fortificación en malla	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto lanzado	

## CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

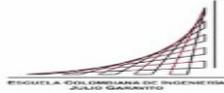
<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Debido a la naturaleza de los sedimentos de la Formación de Patuxent, las entradas de agua del subsuelo y agua subterránea se presentaron durante la construcción, con altas velocidades de flujo iniciales debido al drenaje de una gran cuenca de agua subterránea. La velocidad de flujo posterior de 2,8 litros por minuto a partir de uno de los dos orificios para el resto de la excavación estación se atribuyó a las aguas subterráneas de recarga de la cuenca (Darmody 1991).	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin información	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	9.62E-06	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Inyecciones y medidas de Enfilajes para sostenimiento y avance temporal de los túneles, Métodos de estabilización de la corona	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Geomembranas en el perímetro del túnel, concreto, drenes horizontales por cajas conductoras	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Impermeabilización parcial con membranas en PVC, capas en concreto lanzado	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Inyecciones químicas, membranas PVC, concreto lanzado	

## COMENTARIOS GENERALES

Medidas de revestimiento y reforzamiento en capas en concreto lanzado, mallas electro soldadas, capas de revestimiento primario y secundario, sistema de impermeabilización tipo sándwich. El soporte inicial para cada excavación ronda consistió en la aplicación de una capa de sellado de hormigón proyectado al suelo excavado, seguido de instalación de una viga de celosía, la instalación de la primera capa de tela de alambre soldado (WWF), hormigón proyectado hasta el borde exterior de la viga de celosía, excavación y hormigón proyectado de un invertido temporal, la instalación de una segunda capa de WWF, y, finalmente, la aplicación de una segunda capa de hormigón proyectado. Para bajar el nivel piezométrico y posterior a la instalación de las lechadas químicas, se perforaron tuberías de desagüe horizontales antes de la excavación del túnel.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. North American Tunneling 2010 Proceedings. Pág. 825



Luis Alejandro Ruiz

## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

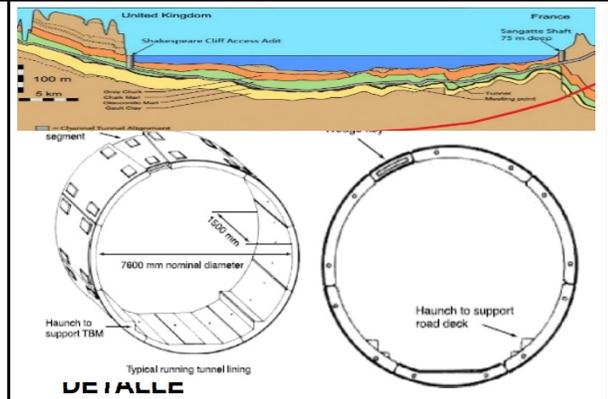
Int - British1 - 0015

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Canal de la Mancha	LOCALIZACIÓN	Inglaterra - Francia
OBRA SUBTERRÁNEA	Vial - Metro / Subacuático	PENDIENTE	1.2
AÑO	1994	COBERTURA (m)	40 - 75
TIPO DE SECCIÓN	Circular	LONGITUD (m)	60000

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel se encuentra excavado sobre una estructura anticlinal, hacia la parte inglesa los estratos presentan un bajo buzamiento < 5°, hacia la costa Francesa presentan una mayor inclinación en promedio 20°. Estratigráficamente se presenta estratos calcáreos y lutitas, que resultan materiales compactos y de buena resistencia, lo que resulta macizos con escasas fisuras abiertas. Hacia la parte inferior de la formación se presentan estratos mas débiles y propensos a fisuras y fragilidad de la roca, propensos a deformaciones con los cambios tensionales generados por las obras del túnel.	
TIPO DE ROCA	Caliza y Lutitas	
ORIGEN DE LA ROCA	Sedimentaria	
ALTURA TUNEL (m)	7.6	
ANCHO TUNEL (m)	7.6	
ALTERACION DEL MACIZO	Poco alterado	
TIPO DE TERRENO	Rocas blandas	
METODO DE EXCAVACION	Maquina Tunneladora	
MEDIDAS DE SOPORTE	Dovelas, con segmentos de 1,5 m de largo y 270-540mm segmentos de revestimiento de espesor, con refuerzo de Acero fue cubierto a 35 mm	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado de baja permeabilidad con mallas de refuerzo	



#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Las obras se encuentra dentro de las secuencias de carbonato, lutita arcillosos, que se sitúan en el contacto de las formaciones, se presentan escasas fisuras abiertas.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin información	
PERMEABILIDAD (m/s)	2.00E-09	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.85E-11	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se requirió	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Conductos y membranas de drenaje cerrado para que el agua sea conducida a los drenajes colectores	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto de baja permeabilidad, características especiales para el control de la corrosión. Anillo rejuntable El espacio anular entre el forro y el excavado suelo estaba cavidad rellena, junto con la prueba-grouting como necesarias para minimizar los flujos de agua.	

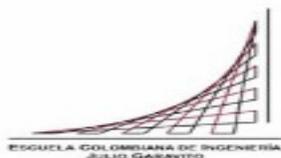


#### COMENTARIOS GENERALES

Fue un proyecto establecido por Napoleón, declarado en 1974 seguridad Nacional, luego su construcción inicio en la década del 80, el túnel fue construido para un periodo de 120 años. Las medidas de revestimiento garantizara que se presenta escasa a nula filtración de agua, siendo desviada al sistema de drenaje del túnel. Después del monitoreo y evaluación Geotécnica se propuso el modelo para evaluar el esfuerzo en las paredes del túnel siguiendo la teoría viscoelástica de Kelvin. Se realizaron pruebas de permeabilidad y difusibilidad a las mezclas de hormigón para evaluar sus propiedades y características.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Túnel lining design guide, The British Tunnelling Society and The Institución of Civil Engineers



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int - France1 - 0016

PROYECTO	Vexin	LOCALIZACIÓN	Noreste Francia
OBRA SUBTERRÁNEA	Almacenamiento Hidrocarburos	PENDIENTE %	-
AÑO	1975 - 2010	COBERTURA (m)	120 - 145
TIPO DE SECCIÓN	Rectangular	LONGITUD (m)	1045

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Geológicamente, el macizo se compone de materiales calcáreos, intercalada por capas calcáreas pero de una mayor permeabilidad, en el nivel de la caverna. Que descansa sobre estratos de arenas de 50 m de espesor. La conductividad hidráulica en la zona cuaternario y la parte superior de los estratos de material calcáreo meteorizado esta en entre Darcy (30 a 40 $10^{-5}$ m/s). Mientras la permeabilidad en los estratos calcáreos del Turoniana es de aproximadamente 4 MD (4 $10^{-8}$ m/s). Los niveles de detritos son más permeable pero no es continua, lo que produce una fuerte anisotropía en las propiedades del macizo.	
EDAD DE LA ROCA	Turoniano / Cretácico	
TIPO DE ROCA	Creta / Caliza, arenas, limos	
ORIGEN DE LA ROCA	Marino / Sedimentaria	
ALTERACION DEL MACIZO	Macizo alterado	
TIPO DE TERRENO	Mala a intermedia calidad	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica	
MEDIDAS DE SOPORTE	Reforzamiento y mejoramiento del terreno	

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	El sistema acuífero esta compuesta por depósitos aluviales y materiales calcáreos degradados, por la falta de la capa impermeable estas formaciones complejas están interconectados y constituyen el acuífero y son sensibles en lo que respecta a las contaminaciones. El río Sena es el principal afluente superficial, las relaciones entre el agua superficial y las aguas subterráneas están dirigidas en general a partir de la acuífero hacia el río, pero son a veces se presentan inversiones durante las inundaciones. El flujo de agua en la caverna fue de alrededor de 60 m <sup>3</sup> / h en el comienzo de la operación y estaba cerca de 20 m <sup>3</sup> / h justo antes del cierre.	
NIVEL FREATICO (m)	120	
PERMEABILIDAD (m/s)	3.50E-07	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.24E-04	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Preinyecciones	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Drenajes, pozos y bombeo de agua	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Preinyecciones	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Disolución de roca por infiltración de agua	

### COMENTARIOS GENERALES

La obra construida cuenta con una galería de 2620 m (8590 pies), un almacén en forma de huevo de 47 m<sup>2</sup> sección transversal, con un volumen de almacenamiento de 130 000 m<sup>3</sup>. Cavernas de almacenamiento excavados en depósitos de piedra caliza las dificultades que originaron un sistema de fracturas en el macizo de creta (Piedra Caliza) donde se excavaron los almacenes de productos de hidrocarburos (propano, gasolina y fuel oil pesado). Este proyecto contó con una abundante investigación previa de carácter geo mecánico que fue aparentemente incapaz de detectar el riesgo asociado al sistema de fracturas saturadas de agua. Se realizaron sondeos por Pozo vertical de reconocimiento 150 m, 3 m<sup>2</sup>, varias galerías de reconocimiento (la mayor de 50 m de longitud y 50 m<sup>2</sup> de sección) perforadas, en roca homogénea e impermeable. Para mantener la hermeticidad del gas dentro de las cavernas, se propuso mantener un nivel de saturación y flujo permanente del agua en la roca y macizo circundante, con el fin de oponerse a cualquier migración hacia el exterior del propano. Por esta razón, las caverna debe estar situada a suficiente profundidad por debajo del nivel freático y en las proximidades de una fuente permanente de recarga de aguas subterráneas de manera que la presión hidrostática natural no puede ser agotado por el drenaje en la caverna. Por lo tanto, la profundidad de la caverna es que ser diseñado de acuerdo a la presión del producto, aproximadamente 8 bar. En 2008, se cerro el proyecto por temas económicos inundando progresivamente la caverna con aguas de infiltración y materiales de relleno. Debido al contexto hidrogeológico (vulnerabilidad), la historia de la zona (existencia de una refinería de petróleo), el almacenamiento subterráneo bajo operación y la cercanía de agua potable campos, una importante red de monitoreo fue ubicados alrededor de la instalación subterránea en con el fin de controlar el comportamiento hidrogeológica.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. CityLink Groundwater Management - Burnley Túnel. Reliable Mine Water Tecnología, IMWA 2013.

FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

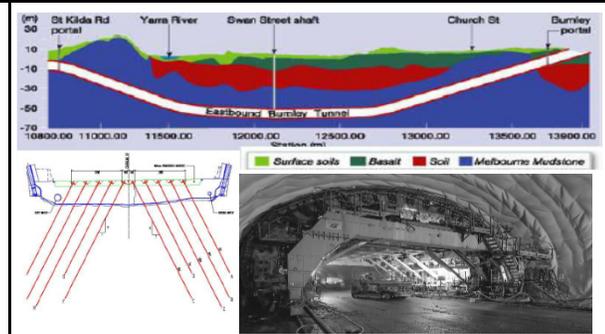
Int - Australia - 0017

DATOS GENERALES

PROYECTO	Burnley Túnel	LOCALIZACIÓN	Australia
OBRA SUBTERRÁNEA	Vial	PENDIENTE	-
AÑO	2000 - 2010	COBERTURA (m)	50
TIPO DE SECCIÓN	Herradura paredes curvas	LONGITUD (m)	3400

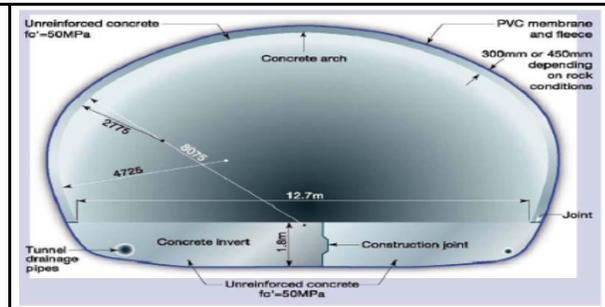
DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	La geología de la obra está asociada a capas de arenisca, arcillas, lutitas, gravas y cuerpos de basalto alterado. Las cuales conforman un sistema acuífero continuo. Los suelos superficiales se componen de materiales asociados a los cuerpos de roca basáltica, materiales aluviales y sedimentarios.		
TIPO DE ROCA	arenisca, arcillas, lutitas, gravas y cuerpos de basalto alterado		
ORIGEN DE LA ROCA	Ígnea y sedimentaria		
ALTURA TUNEL (m)	8		
ANCHO TUNEL (m)	12.7		
ALTERACION DEL MACIZO	Alterado y descompuesto		
TIPO DE TERRENO	Rocas blandas y poco consolidadas		
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica		
MEDIDAS DE SOPORTE	Concreto reforzado de 50 Mpa, arcos pre armados		



CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	El agua subterránea y sistemas acuíferos están asociados a la heterogeneidad geológica del área, los sistemas de fallas que interconectan las diferentes formaciones en el subsuelo. Que conectan las zonas de gravas Moray Street y el afluente principal del área, el río Yarra.		
NIVEL FREATICO (m)	40		
PERMEABILIDAD (m/s)	0.1 - 0.5		
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	4.41176E-05		
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Enfilajes, inyección químicas y cementicias		
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Tubería de drenaje longitudinales		
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Membranas de PVC, concreto armado 300 a 450 mm		
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Chorros		

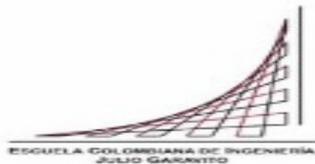


COMENTARIOS GENERALES

Debido a las condiciones hidrogeológicas, los sistemas acuíferos para el almacenamiento y recarga subterránea se presentaron problemas en la construcción del túnel, lo que conlleva a medidas drenaje y abatimiento del nivel freático de la zona adyacente al túnel. Estos descensos en el nivel generaron compresión de los estratos de arcilla y subsidencia en superficie, con problemas en las fundaciones de la infraestructura en vías y drenajes. Para prevenir fenómenos de deslave y mejorar el terreno excavado durante la excavación se perforaron pernos con cables de acero e inyecciones cementicias en la roca circundante, además de generar un refuerzo al concreto y revestimiento del túnel. Reforzando y mejorando las características del terreno alrededor de la excavación. Sin embargo, para no generar un abatimiento del nivel piezométrico se debe bombear desde el túnel cerca de 200 y 300 MLts de agua subterránea cada año, actividad que se realiza en la actualidad. El túnel presentó retrasos en su entrega, y en su construcción, además ha requerido múltiples obras de mantenimiento y mejoras debido a la filtración continua del agua, presión de agua 0.1 a 0.5 Mpa

Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016. CityLink Groundwater Management - Burnley Túnel. <http://www.wetocks.com.au/state-curriculum/victoria>



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - New York - 0018

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel de Manhattan - Etapa III	LOCALIZACIÓN	New York, Usa
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidráulico	TIPO DE TÚNEL	Hidráulico
AÑO	1970 - 2020	COBERTURA (m)	150
TIPO DE SECCIÓN	Circular	LONGITUD (m)	97000

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	<p>La formación Manhattan donde se excavó los túneles presenta variedad de roca de esquistos, Gneis, con cantosales menores de granito, pegmatita granítica, cuarcitas y rocas máficas, como hornblenda, serpentinita, y anfibolita, en edades desde el Cámbrico Inferior a Medio periodo Ordovícico, aproximadamente 450 y 500 millones de año. Los basamentos de roca se origina en un ambiente marino poco profundo, que consistió en gruesas secuencias de esquistos y areniscas, con un poco de piedra caliza intercalada. Subsiguiente eventos tectónicos inyectaron rocas ígneas como el granito y basalto.</p> <p>Que consisten en un complejo conjunto de estructuras geológicas que exhiben a la vez un comportamiento dúctil y frágil, asociado principalmente con un acortamiento de la corteza. Los episodios de compresión o acortamiento de la corteza, generando pliegues de escala regional y defectos, algunos de los cuales se encontraron durante construcción de los túneles. La mineralogía de la roca, textura, dureza y agresividad asociado, así como la estructura de la roca (tendencias de foliación) eran muy variables, tanto vertical como horizontalmente.</p> <p>El tipo de roca variable junto con las características geotécnicas de la formación de roca presenta retos para la construcción de los túneles.</p>	
TIPO DE ROCA	Esquistos, Cuarcitas, serpentinas, depósitos aluviales	
ORIGEN DE LA ROCA	Metamórfica /Sedimentaria / Ígnea	
ALTURA TUNEL (m)	7.3	
ANCHO TUNEL (m)	7.3	
ALTERACION DEL MACIZO	Roca de diferente condiciones, mediana muy alterada, cunas, rocas blandas y macizos continuos	
METODO DE EXCAVACION	Etapa I - Perforación y Voladura. Etapas II y III maquina Tunneladora TBM	
MEDIDAS DE SOPORTE	Canales de acero, malla, perfiles. Concreto armado, revestimiento en concreto impermeabilizado, fibras, dovelas, Perfiles Lattice Gird. Concreto Lanzado	

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

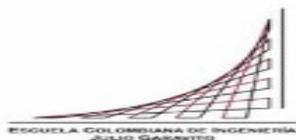
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Sistemas de fallas asociadas al diaclasamiento, con zonas de mineralización secundaria brechas y milonitas de falla, plegamiento de las formaciones rocosas, recarga superficial del rio Hudson, y del mar.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin información	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-07	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	3.61E-08	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Congelación parcial durante el avance, pernos e inyecciones de mejoramiento, preinyecciones y post inyecciones	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Perforaciones de descompresión	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto impermeable	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos y chorros	

### COMENTARIOS GENERALES

Es el mayor proyecto de construcción en la ciudad, comenzó en la década de los 70, con una longitud total cuando final de 60 millas, la etapa I se inauguró en 1998, la Etapa 2 del túnel consiste de dos secciones; una sección de Brooklyn y Queens y una sección de Manhattan, las cuales completaron en 2001 y 2009 respectivamente. La Etapa 3 de ET3 es una sección de 16 millas que va a conectar el embalse Kensico a la válvula de Bronx cámara. La Etapa final 4, permitirá que el agua fluya a la parte oriental del Bronx y a continuación, en la parte este de Queens. En la etapa 2 se presentaron inconvenientes y retrasos en el avance por condiciones geológicas, obligando a generar estudios detallados y anticipados de cartografía y geología antes de la excavación de los túneles, se reporto caudales entre (50 lt/min a 200 lts/min). Las características de la máquina perforadora tenía un diámetro de cabeza de corte de 3,84 metros (12,6 pies), con una velocidad de 12,6 rpm. La máquina estaba equipada con 432 mm (17 pulgadas) cortadoras de disco con 314 kN (70.590 lb) de capacidad de carga y el máximo total disponible empuje de 10.404 kN. El desempeño de la TBM vario según la orientación de la foliación, las características estructurales de la roca y alteración, con una La media tasa de penetración era de 4,23 m / h. Los trabajos fueron reforzados con canales de acero, mallas y pernos para soportes las cunas de roca y anillos de acero cuando las condiciones dela macizo requerían la fortificación completa de la sección.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. North American Tunneling, proocending 2012 / 2004. Society for Mining, Metallurgy, and Exploración, Inc. Consultas Web, <http://www.moretrench.com/projects/water-tunnel-no-3/> / <http://www.theverge.com/2013/10/19/4853636/underground-with-manhattans-new-water-tunnel-three-photo-essay>



Luis Alejandro Ruiz

## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

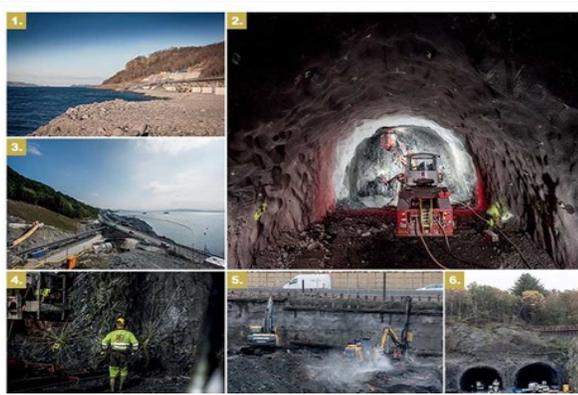
Int - Noruega - 0019

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Ryfast Túnel	LOCALIZACIÓN	Noruega
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel vial Subacuático	PENDIENTE	-
AÑO	2012 - 2019	COBERTURA (m)	290
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Curvas	LONGITUD (m)	14300

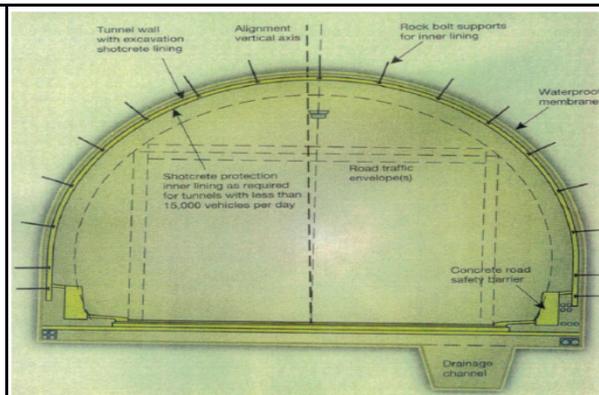
#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Se presentan dos tipos de roca, Gneis duros hacia el este del túnel, y roca arcillosa hacia el oeste. Se realizó investigación exploratoria previa con perforaciones y cartografía geológica, evaluando las características y propiedades litológicas y de los materiales. También se encuentra material de filita fisurada.		
TIPO DE ROCA	Gneis, arcillas		
ORIGEN DE LA ROCA	Ígneo / Sedimentario / Metamórfica		
ALTURA TUNEL (m)	8.5		
ANCHO TUNEL (m)	8.5		
ALTERACION DEL MACIZO	Buena calidad, en zonas puntuales alterado y fisurado		
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura		
MEDIDAS DE SOPORTE	Concreto lanzado, membranas en polietileno hacia los portales, capas de revestimiento en concreto lanzado 80 mm. Pernos para el soporte del sistema de revestimiento instalado.		



#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Macizo continuo en sector de Gneis, presentando zonas de fracturas localizadas en filitas y zonas de fallas, terreno blando, filtraciones en juntas		
NIVEL FREATICO (m)	Sin información		
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información		
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin información		
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Bulones y pernos de sostenimiento del sistema de impermeabilización y de la roca en una longitud promedio de 3 a 5 m, fibras sintéticas para el refuerzo del concreto		
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Canales y sistemas longitudinales de drenaje comunicados con las geomembranas		
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Impermeabilización parcial con geomembranas, conducción de agua de infiltración		
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Puntuales, goteos localizados en zonas de fisuras		

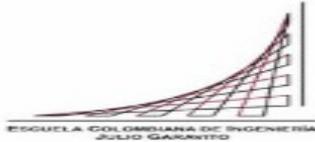


#### COMENTARIOS GENERALES

El proyecto consiste en la excavación de tres túneles: Solbakk túnel (14 km), Hundvaag túnel (5.5 km), Eiganestunnelen (3.7 km). En la excavación se cuenta con equipos para la perforación, voladura, cargue, trituración y transporte de la roca que es excavada en el interior del túnel, utilizando equipos Volvo en Oruga 772, perforadores Sandvik, el método de avance en general es perforación y voladura, sin embargo se presentan retrasos cuando se encuentran paquetes de roca fisurada, fracturada.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. <http://www.worldhighways.com/categories/road-highway-structures/> <http://www.tunneltalk.com/Norway-01July2014>



Luis Alejandro Ruiz

# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - Suiza - 0020

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel St. Gotardo	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Suiza
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Carretero	<b>PENDIENTE %</b>	1 a 3
<b>AÑO</b>	2012 - 2017	<b>COBERTURA (m)</b>	1000
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Circular	<b>LONGITUD (m)</b>	57000

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	La geología del túnel está compuesta por roca cristalina del macizo de San Gotardo, que se componen de macizos ígneos y metamórficos de alta resistencia, presentados riesgo de inestabilidad por cuñas de roca o estallidos (Rockburst).	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Gneis y Granito / Materiales cataclásticos	
<b>ORIGEN DE LA ROCA</b>	Ígnea - Metamórfico	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	8.8	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	9.5	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	La roca se presentaba descompuesta y alterada en tramos del túnel	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Buena a intermedia calidad, se presento tramos con cizallas rocas blandas y materiales descompuestos	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Tuneladora / Perforación y voladura	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Arcos de acero, pernos de anclaje, concreto armado.	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto lanzado	

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

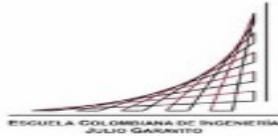
<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	En general el macizo se presenta como bloques continuos, sin embargo presenta filtración y un sistema acuífero localizado en una zona aledaña a sistema de fallas, los conductos de agua subterránea son localizados en la zona de contactos de la roca, juntas, diaclasas y otros sistemas de discontinuidades de la roca.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-10	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	1.61404E-06	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	En zonas de fallas perforación, lechadas de mortero	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Membranas internas, zanjas y cunetas laterales.	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Membranas, concreto lanzado	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	En zona de falla flujos continuos y a presión, en general se presentaba un macizo seco	

### COMENTARIOS GENERALES

El túnel de base San Gotardo, consta de dos tubos paralelos de vía única con un diámetro de excavación oscilaba entre 8,8 y 9,5 m, que están relacionados entre sí por medio de pasajes transversales cada 312 m. El sistema de impermeabilización de membrana se instala sobre andamios de concreto lanzado con productos que sellan juntas, dilatación y fisuras en el sistema de soporte instalado. En el túnel se instalaron medidas y materiales con resistencia al fuego. En el túnel se instalo un sistema de geomembranas que drena el agua desde la capas de geotextiles a las zanjas laterales y conduce el agua a un colector central, con esto liberando parte de la presión hidrostática generado por el agua subterránea. Se tuvieron filtraciones de agua y derrumbes parciales en una zona acuífera de un espesor de 80 m que intersectaba el túnel, las cuales en los trabajos de exploración se detectaron antes de la excavación de la obra, requiriendo el mejoramiento y revestimiento, medidas de manejo del agua de infiltración. Además, se tuvo inconvenientes por la alta temperatura de los túneles en el momento de su excavación, obligando la instalación del sistema de enfriamiento y refrigeración para los trabajos, se reporto presiones de agua de 200 Bar.

### Fuente y referencias Bibliográficas

SIKA, Waterproofing Membranas for Gotardo Base Túnel (Switzerland) and Viena-St. Pölten Railway Line (Austria). North American Tunneling, proocending 2012 / 2004. Society for Mining, Metallurgy, and Exploración, Inc.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles en Roca

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - España - 0021

## DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Somport	LOCALIZACIÓN	España / Francia
OBRA SUBTERRÁNEA	Vial / Carretero	PENDIENTE %	1.65
AÑO	1997 - 2003	COBERTURA (m)	850
TIPO DE SECCIÓN	Herradura paredes curvas	LONGITUD (m)	8608

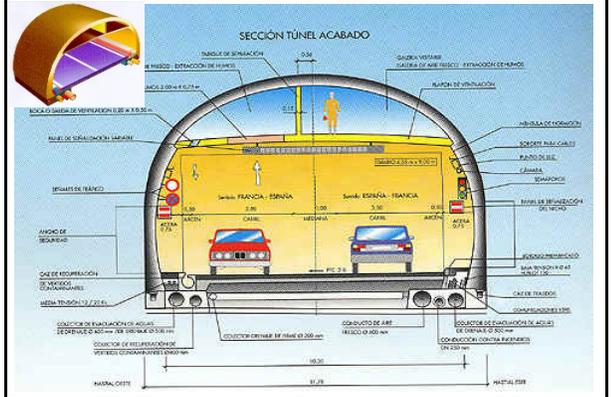
## DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El macizo es un roca Pirenaica, hace unos 35 millones de años, ligada a procesos deformativos y de la orogenia Alpina, que de techo a piso se encuentran: materiales de lutitas negras, areniscas grises ocasionalmente verdes, con fuertes plegamientos. Luego, calizas grises y niveles de margas grises a verdes, siguiendo, lutitas negras laminadas con intercalaciones de areniscas grises e infrayaciendo, calizas grisáceas con una buenas características mecánicas y para el sostenimiento, en la base se presentan areniscas Grauwuquicas y lutitas negras con cierta esquistosidad.	
EDAD DE LA ROCA	Devónico - Carbonífero - Sedimentos del Pérmico / Paleozoico y Mesozoico	
TIPO DE ROCA	Sedimentaria / Plegada	
ALTURA TUNEL (m)	8.4	
ANCHO TUNEL (m)	11.78	
ALTERACION DEL MACIZO	Poco alterado, roca sana	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras, fisuras y diaclasas visibles sin problemas para el sostenimiento.	
METODO DE EXCAVACION	Jumbo Tamrock Datamaxi, perforación y voladura en los frentes de avance. Maquina Tuneladora Wirth TBIII 470E en galerías de ventilación.	
MEDIDAS DE SOPORTE	Concreto armado de 16 - 25 Mpa, espesor de 50 a 250 mm. Fibras metálicas y mallas	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado	



## CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Las rocas del macizo excavado presentan condiciones de resistencia adecuada, no presentando problemas durante el avance, con filtraciones puntuales en algunas zonas del túnel. Los paquetes de caliza pueden presentar fenómenos de Karstificación por el agua si no hay manejo en el túnel del fluido	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin Información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No requirió	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Geo textil, canalización tubos colectores y longitudinal para el desagüe, en material de PVC de 1.4Kg/dm3	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Sistema tipo sándwich con hormigón proyectado, lamina de nódulos, geotextiles, lamina de impermeabilización y hormigón de revestimiento.	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteo e infiltraciones e infiltraciones puntuales.	

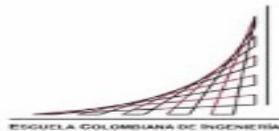


## COMENTARIOS GENERALES

El túnel es un proyecto carretero, circulación bidireccional, con portales en España y Francia, con una altura libre de 4.55m, ancho de circulación de 9 m, con una sección de excavación de 90 m<sup>2</sup>. Para determinar parámetros de geotecnia se excavaron tres galerías de 12 m de largo, 2 x 2.5 de sección perpendicular, evaluando las medidas de deformación y ensayos de placa de carga. Se empleo el sistema constructivo por el método austriaco del NATM. \*Medida por metro lineal de túnel evaluado. Las medidas de impermeabilización consistieron en la instalación de Lamina traslucida de PVC de 1.5 mm de espesor, separada por hormigón proyectado del sostenimiento por un geotextiles no tejido 600 g/m<sup>2</sup>, con capacidad de retención de finos de 60 micras. En la parte inferior de los hastiales se colocó laminas de nódulo para canalizar y direccionar el agua, las membranas se protegieron con laminas adicionales de 2 mm para protegerlas de punzonamiento, además se colocó aislante de polietileno reticulado de 33 Kg/m<sup>2</sup> y 30 mm de espesor.

## Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Asociación Técnica de Carreteras - Diseño y Aspectos Constructivos de Túneles. I Congreso Internacional sobre la Travesía Ferroviaria por el Pirineo Central. España - Zaragoza 2008. Ministerio de fomento de España. [http://www.mfom.es/mfom/lang\\_castellano/default.htm](http://www.mfom.es/mfom/lang_castellano/default.htm). ISRM, Simposium Eurorock 92.. INGEOTUNELES. López Jimeno. Madrid 1999 - Tomo I



Luis Alejandro Ruiz

# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

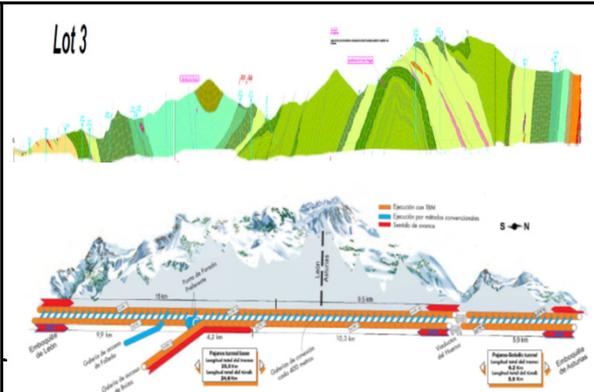
Int - España - 0022

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel Pajares	<b>LOCALIZACIÓN</b>	España
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Ferroviario	<b>PENDIENTE %</b>	16
<b>AÑO</b>	2004 - 2017	<b>COBERTURA (m)</b>	>1000
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Circular	<b>LONGITUD (m)</b>	10670

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Los trabajos subterráneos interceptan paquetes geológicos significativos, características heterogeneas de buena y mala calidad , pizarras y esquistos arcillosos de alta plasticidad, con una resistencia a la compresión Uniaxial $\leq 60$ Mpa. Se presentan paquetes de areniscas y cuarcitas con zonas de microfisuras y baja resistencia. Además de rocas calcáreas dolomíticas las cual tienen procesos de disolución y karts, entrada, conducción e infiltración de aguas subterráneas. Y con la presencia de macizos de rocas volcánicas y material de conglomerados.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Carbonífero y cuaternario	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Piedra arenisca y pizarra piedra arenisca y lutitas arenisca caliza	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	8.5	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	8.5	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Medianamente alterado con múltiples zonas descompuestas	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas duras y blandas, por tramos alteradas, terreno de mala calidad en la zona de portales, RMR 8 a 44%	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Tuneladora en los tubos principales, en galerías auxiliares perforación y voladura, excavación mecánica	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Segmentos preconstruidos de dovelas	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto convencional.	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Múltiples zonas de infiltración en contactos y zonas de cizallas activas, características de almacenamiento y conducción de aguas subterráneas en las zonas fracturadas y de falla, las areniscas presentan materiales ferruginosos que cambian la coloración del agua, se requieren tratamientos de decantación y cambios en la turbidez del líquido. Las zonas Karstificadas presentan conductos y pasos del agua.
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin Información
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	Sin Información
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	4.69E-05
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Sin Información
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Canalización y perforación de tubería para desagüe, balsas decantadoras y medidas de <b>tratamiento en superficie</b>
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Membranas de geotextil, concreto hidráulico convencional
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Chorros, humedad y flujos en múltiples zonas del túnel.



### COMENTARIOS GENERALES

La perforación del túnel finalizó en 2009, pero, durante los años que duró la maniobra, se produjo un daño irreversible a los 20 acuíferos que se encuentran en la superficie y que comenzaron a desaguar por los dos grandes túneles recién construidos. Diámetro de excavación de 9.9 y 10.4m, para sellar las dovelas instaladas Para sellar los túneles han diseñado un sistema de recubrimiento basada en paneles de poliéster reforzado de fibra de vidrio. Todas las aguas residuales se trata en una planta de gran capacidad incorporada como varias pequeñas unidades desplegadas en la ladera de la montaña. Los acontecimientos clave de la construcción de túneles eran de acuerdo con los accidentes geológicos planificadas. El equipo TBM tenía que manejar grandes flujos de agua subterránea, la corona se colapsa debido a la baja resistencia frente del túnel que requieren muy bajo empuje, el desbloqueo de la Tuneladora atrapado, múltiples zonas de gases y riesgos asociados a la geología, se reporto presiones de agua 0.1 a 60 Mpa.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016.  
[http://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-01-19/muchas-sombras-y-pocas-luces-en-la-recta-final-de-la-variente-de-pajares\\_1136213/](http://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-01-19/muchas-sombras-y-pocas-luces-en-la-recta-final-de-la-variente-de-pajares_1136213/).  
[http://www.adif.es/es\\_ES/infraestructuras/anchico\\_metrico/anchico\\_metrico.shtml](http://www.adif.es/es_ES/infraestructuras/anchico_metrico/anchico_metrico.shtml). Camus, Thomas. Single shield TBM performance in carboniferous rock the case study of Pajares-Sotiello. Publicado en; [www.researchgate.net/publication/216353506](http://www.researchgate.net/publication/216353506)

#### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

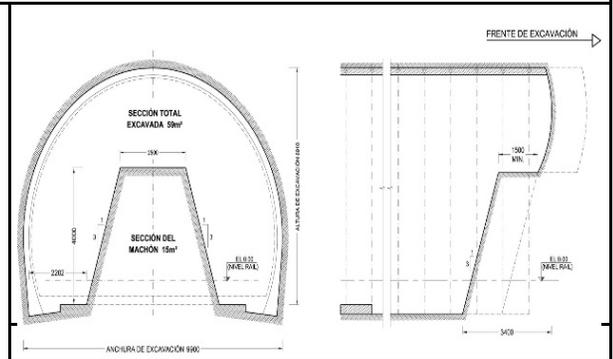
Int - Chile - 0023

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Interestación - Metro Chile	LOCALIZACIÓN	Chile
OBRA SUBTERRÁNEA	Vial	PENDIENTE %	1
AÑO	2013	COBERTURA (m)	200
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Curvas - Sección Completa	LONGITUD (m)	14200

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	La geología de la obra esta compuesta por deposito de carácter aluvial constituidos por los arrastres de los ríos Mapocho y Maipo, cuyo espesor supera los 200 m. Estos suelos están constituidos por conglomerados granulares; que, en general, tienen carácter auto filtrantes, pues el agua puede percolar a través de ellos. Aunque estos conglomerados no están cementados químicamente, poseen una cohesión comprendida entre 30 y 50 KPa; lo cual, unido a ángulos de fricción entre 45 y 50°, hace que presenten un comportamiento excelente.	
EDAD DE LA ROCA	Arena, arcillas, gravas	
TIPO DE ROCA	Sedimentaria Aluvial	
ALTURA TUNEL (m)	6.75	
ANCHO TUNEL (m)	7.1	
ALTERACION DEL MACIZO	Material compacto, con filtraciones localizadas, poco meteorizado.	
TIPO DE TERRENO	Rocas blandas, consolidadas, buena resistencia mecánica.	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica	
MEDIDAS DE SOPORTE	Malla electrosoldada, concreto hidráulico, arcos de acero, micro pilotes, concreto lanzado	
REVESTIMIENTO	Concreto Lanzado	



#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Los materiales componen sistemas acuíferos en condiciones aptas para el almacenamiento y transmisión del agua subterránea, para el proyecto estos sedimentos presentaban características de sobre consolidación, compactación y litificación.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin información	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Se realizó la excavación bajo paraguas de micro pilotes constituidos por bulones auto perforantes, tipo Diwidag 73/16 de 9 m de longitud solapados 4 m	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Tubos PVC, canales colectores longitudinales para el direccionamiento del agua, tubería y canales de drenaje, perforaciones drenantes	
CAUDAL (m3/hor/m) *	Sin información	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto impermeabilizante, perforaciones drenantes	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Humedad y goteos localizados	

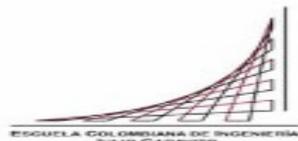


#### COMENTARIOS GENERALES

Las obras subterráneas fueron proyectadas para ser construidas según el 'New Austrian Tunnelling Método (NATM). Para el retiro de los materiales de extracción del terreno excavado se utilizó una cinta transportadora vertical. El Consorcio Zañartu-Geocontrol ha diseñado un nuevo método constructivo para el Túnel Interestación de la L-6 del Metro de Santiago de Chile, que se basa en los siguientes conceptos: - Frente de excavación a sección completa. Utilización de máquinas potentes para la excavación. - Proyección del shotcrete con un robot. - Extracción del terreno excavado mediante una cinta transportadora vertical. La aplicación de este método en los tramos del Túnel Interestación, excavados en Gravas de la 1ª Depositación, ha permitido obtener avances de 27 a 33 m/semana; que son más de tres veces superiores a los obtenidos con el Método Tradicional. La utilización de este método en el paso bajo la vía del Melitren ha sido también un éxito; pues la construcción del Túnel Interestación se ha completado con una subsidencia de 6,1 mm; inferior a los 7,5 mm previstos.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a Noviembre de 2016. <http://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/135939-Incremento-rendimientos-construccion-Tunel-Interestacion-L-6-Metro-Santiago-Chile.html>



Luis Alejandro Ruiz

## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización en túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

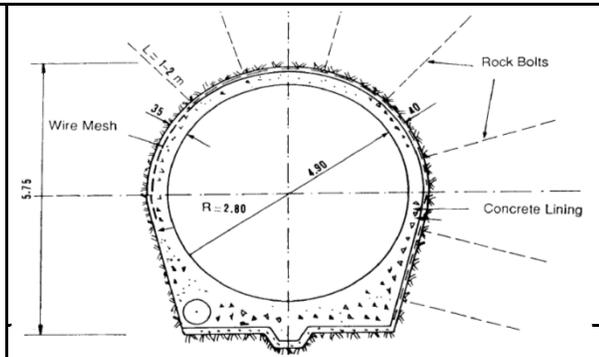
Int - NewZealand - 0024

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Tailrace Túnel	LOCALIZACIÓN	Manapouri, New Zealand
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidroeléctrico	PENDIENTE %	1
AÑO	1959	COBERTURA (m)	400
TIPO DE SECCIÓN	Herradura Paredes Curvas	LONGITUD (m)	2800

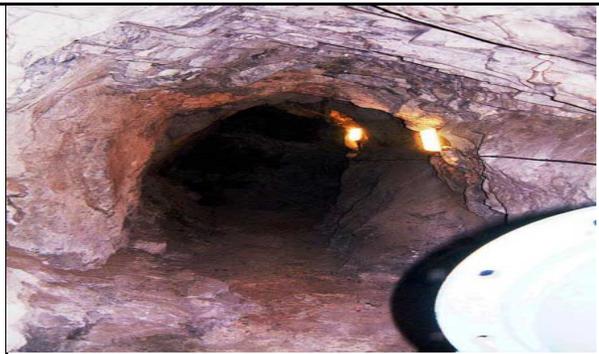
#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	La geología esta asociada a cuerpo sedimentarios de espesor variables, compuestos por cantos rodados, sedimentos finos de grava, arena, limo y arcilla, los cuales se encuentran suprayaciendo depósitos de caliza y margas calcáreas y margas arcillosas. La permeabilidad de la arena es del orden de 10 e-5 m/s, mientras que los depósitos mal sorteados de grava se presenta en un orden de 10 e-6 m/s, gravas y arenas son altamente permeables.	
EDAD DE LA ROCA	Depósitos recientes	
TIPO DE ROCA	Rocas sedimentarias	
ALTURA TUNEL (m)	5.75	
ANCHO TUNEL (m)	4.9	
ALTERACION DEL MACIZO	Rocas blandas, macizos poco consolidados.	
TIPO DE TERRENO	Rocas blandas, diferentes tipos de terrenos, algunas se presenta un macizo meteorizado	
METODO DE EXCAVACION	Excavación mecánica	
MEDIDAS DE SOPORTE	Anillo de roca, pernos de anclaje, malla electro soldada, concreto lanzado	
REVESTIMIENTO	Concreto Hidráulico	



#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Los 150 m iniciales del túnel se excavo en depósitos de roca, de espesor variable, en tramos con margas duras, arcillosas. Por tramos se encuentran margas -sistema acuífero libre, depósitos de anhidrita descompuesta. Y ambiente depósitos impermeables de margas - denominado como Sistemas Acuitardos. Materiales que intercalan con calizas y dolomitas de la alta permeabilidad.	
NIVEL FREATICO (m)	295	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-04	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.61E-04	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Reforzamiento del contorno de la excavación por pernos de 1 a 2 m de longitud, preinyecciones cementicias, bentonita, entre otras para la consolidación, sistema paraguas en el paso de terrenos difíciles	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Longitudinacion en el túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Consolidación y drenaje longitudinal del túnel	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Humedad y chorros	

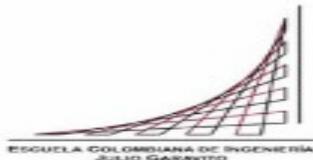


#### COMENTARIOS GENERALES

El proyecto de generación eléctrica en el río de TI, se encuentra en la parte superior de una colina, con una altura de 600 m, el cual consiste en cavernas donde se instalaron las turbinas, transformadores y bombas, además de los estabilizadores de la presión de agua. El proyecto consiste en un túnel de acceso para la inspección y supervisión de los túneles, con longitud de 1800 m. Otro túnel se utiliza para la transmisión de agua para la descarga, la longitud de este túnel de desvío es de 2800 m. La excavación se construyo con la metodología NATM. Durante la excavación de los túneles de desviación se produjo una irrupción de agua y filtraciones severas, por la falta de conocimiento del sistema hidrogeológico e inexistencia de equipos de bombeo.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. <http://www.corestore.org/CeanTail.htm>. International Journal of Mine Wáter, Ground Wáter Control by Grouting in Tunnels for a Pumped Storage Scheme. Terezopoulos N.G - 1987



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización en túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - Canadá - 0025

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Seymour-Capilano Twin Tunnels	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Vancouver/Canadá
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Túnel Hidráulico - Energía	<b>PENDIENTE %</b>	2
<b>AÑO</b>	2009	<b>COBERTURA (m)</b>	640
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Circular	<b>LONGITUD (m)</b>	7500

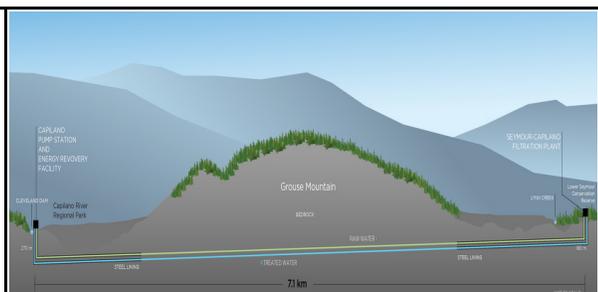
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Intrusiones graníticas con Fallas, alteraciones y metamorfismos, rocas volcánica, se encontró una superficie de roca de fondo paleo-degradada, inclinada hacia abajo hacia el este, diorita de cuarzo de calidad variable y roca meta volcánica. Las pruebas de resistencia a compresión no confinadas en muestras iniciales están en el intervalo de 80 a 250 MPa.		
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	-		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Sedimentarias / Metamórficas / Ígneas		
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	5.75		
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	5.75		
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Poco alterado		
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Hacia los pozos materiales poco consolidados, cuerpo de túnel, calidad de la roca como buena a muy buena, (RQD) > 75%.		
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Pozos con excavación mecánica, perforación y voladura, TBM, cámaras fueron excavados en túneles paralelos		
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Auto soporte, concreto lanzado, en zona de cámaras y maquinas pernos de anclaje, con arcos localizados en algunas zonas de la obra		
<b>REVESTIMIENTO</b>	Hormigón proyectado a base seca tipo MBT Meco S160 -5%, espesor 150 mm, malla electro soldada.		



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Rocas duras y moderadamente descompuestas, permeabilidad primaria asociado a fallas y sistema de diaclasamiento, el macizo actual como sistema acuífero y barrera impermeable, escasas propiedades de almacenamiento y transmisión de agua subterránea.		
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	70		
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	-		
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	6.67E-07		
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	En cámaras se instalaron pernos de 6 m de longitud y vigas de celosía		
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Tubería de PVC de 150 mm, con bombas sumergibles en los costados de las paredes.		
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Conducción del agua a tanques y zonas para su bombeo en superficie		
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Humedad y goteos ocasionales		

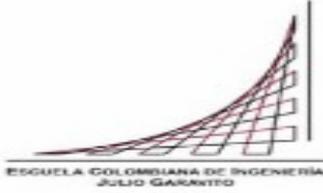


### COMENTARIOS GENERALES

El proyecto constan de pozos de 275 a 180 m de longitud, integrados por un túnel de 7,1 km, el agua tratada generará 9500 MWh por año de energía hidroeléctrica. El proyecto constituye de una planta de filtración de 1.800 megalitros por día, que puede filtrar y tratar un máximo de 1,8 mil millones de litros de agua por día de las fuentes Seymour y Capilano, el líquido se filtra a través de carbón antracita y arena fina para obtener calidades aceptables. Los pozos fueron excavados con equipo Caterpillar 308, con un soporte radial de hormigón armado, con anillos W 250 x 131, vigas a 1,2 m de separación vertical para los primeros 15 m de eje, espaciado de 0,9 m para los próximos 5 m y 0,6 m para el fijo 10 m excavado en capas de arcilla, arena y grava, se reportaron tasas de irrupción de agua de 2 a 5 lt / seg.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Genschel & Morrison (2006), Seymour-Capilano Twin Tunnels Project in Vancouver/Canadá. <http://www.belcarra.ca/reports/vob-report-may2011.htm>. <http://www.tunneltalk.com/Seymour-Capilano-Dec04-Two-Robbins-TBMs-for-Vancouver.php?ver=d>, <http://www.ecogrou.com/seymour-capilano-twin-tunnel-project-north-vancouver-bc/>



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización en túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

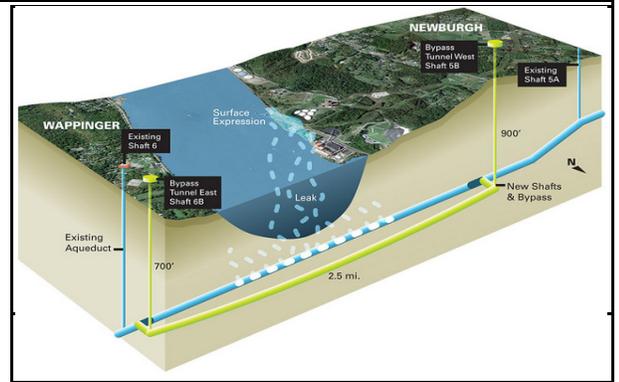
Int - usanewyork- 0026

<b>PROYECTO</b>	Delaware-Rondout Acueducto Bypass túnel
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Túnel Hidráulico
<b>AÑO</b>	1940 - 2022
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Circular

<b>LOCALIZACIÓN</b>	New York - USA
<b>PENDIENTE %</b>	0
<b>COBERTURA (m)</b>	100 a 85
<b>LONGITUD (m)</b>	4020

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	El macizo escavado comprende roca competente de esquistos densamente compactados, hacia los extremos del túnel, hacia la parte central del a excavación se presenta una formación de piedra caliza plegada y fallada, unidad litológica que resultó problemática durante la construcción del túnel original en 1939- 44.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Sin información	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Roca Esquistos y piedra Caliza	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	6.6	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	6.6	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Nivel de caliza con procesos de disolución.	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Piedra caliza fracturada	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Túnel antiguo excavado por técnicas de perforación y voladura. Bypass construido por equipo Tunneladora	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Arcos de acero, concreto lanzado.	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Túnel antiguo en Concreto lanzado, arcos. Nuevo proyecto con 2800 m de revestimiento en acero	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	El macizo de esquistos comprende una unidad impermeable de bajas filtraciones, la secciones excavada en piedra caliza muy porosa donde se ha presentado la mayoría de irrupciones de agua en el túnel, con caudales de infiltración hasta de 4 millones de galones por día.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	0	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-05	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	4.36E-05	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Preinyecciones de mejoramiento con soluciones cementicias	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Desnivel y control Longitudinal	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Blindaje total en acero de la sección del túnel, inyecciones de mejoramiento	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Chorros e infiltraciones de agua	

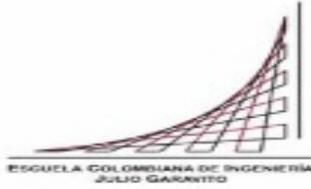


### COMENTARIOS GENERALES

Cruce del río Hudson de un túnel excavado para suministro de agua potable, construido en 1940, el túnel original será desmantelado y retirado de servicio después del riego del nuevo bypass. Con una longitud de 2.800m de largo, 70% de la longitud total del bypass será con revestimiento de acero anterior, para evitar irrupciones de agua que generaron problemas en el anterior túnel, con tasa de caudal hasta 4 millones de galones por día. El túnel transmite más de la mitad del agua potable de la ciudad de Nueva York, el túnel pasará 600 pies por debajo del nivel del mar, a unos 100 pies por debajo del río bajo una presión hidrostática máxima prevista de hasta 20 bar.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Abril de 2017. Tuneltank. Extreme challenge for Rondout bypass TBM. Consultado el 25 de marzo de 2017. <http://www.tunneltalk.com/Delaware-Aqueduct-Bypass-Tunnel-27Apr2016-Robbins-TBM-selected-for-critical-drive.php>



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización de túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

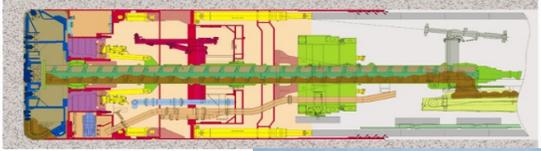
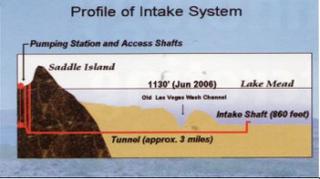
## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

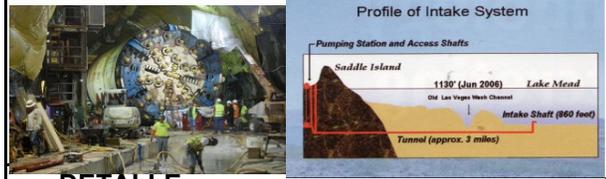
Int - usalangeles - 0027

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Tunnel Lake Mead	LOCALIZACIÓN	Los Ángeles - USA
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidráulico	PENDIENTE %	1
AÑO	2010	COBERTURA (m)	228
TIPO DE SECCIÓN	Circular	LONGITUD (m)	4500

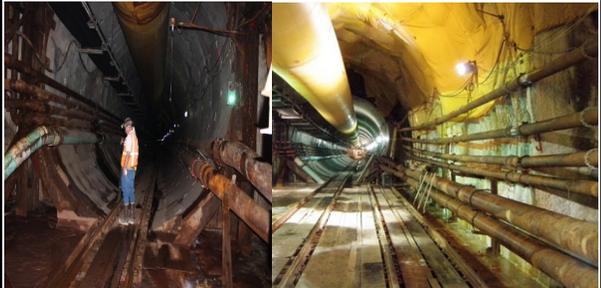
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	El túnel se excavo a través de un bloque de anfibolitos y gneis precámbricos duros en rocas más blandas y los sedimentos y arenas de Muddy Creek Formación	 
EDAD DE LA ROCA	Precámbricos	
TIPO DE ROCA	Gneis, anfíbol, Arena	
ALTURA TUNEL (m)	6	
ANCHO TUNEL (m)	6	
ALTERACION DEL MACIZO	Alterado y muy fracturado en zonas de falla.	
TIPO DE TERRENO	Zonas de cizalla, rocas blandas	
METODO DE EXCAVACION	Tuneladora, perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Dovelas, inyecciones de consolidación del terreno, acero y reforzado con fibra de acero de hormigón proyectado	
REVESTIMIENTO	Dovelas, concreto lanzado	



DETALLE

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

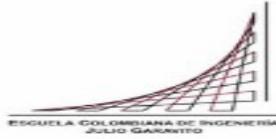
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Zonas de falla muy deterioradas, con depósitos de materiales blandos, en las cuales se altos índices de irrupción de agua en el túnel.	
NIVEL FREATICO (m)	0	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-05	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.23E-04	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Preinyecciones de consolidación en el terreno.	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Inyecciones de consolidación, revestimiento en concreto, presión interna del túnel	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Inyección de consolidación, revestimiento en concreto lanzado	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Chorros	

### COMENTARIOS GENERALES

Hasta la fecha se han excavado 1,830m, el proyecto ha tenido retrasos por las entradas de agua han registrado tasas hasta 3.000 gal / min (226 litros / s) a una presión aplicada de 10 bar, equivalente a aproximadamente 12-18.000 gal / min de entrada a presión atmosférica normal. Además de despresuración y danos en el sistema de rieles de la Tuneladora.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Abril de 2017. Tuneltank.Pushing TBM design limits under Lake Mead . Consultado el 25 de marzo de 2017. <http://www.tunneltalk.com/Lake-Mead-04Sep2014-Pushing-TBM-design-limits-in-Nevada-USA.php>



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Medidas de manejo de agua e impermeabilización de túneles en Roca

Luis Alejandro Ruiz

Anexo - Casos históricos

Febrero 2017

FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - tunegumara - 0028

### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel del Guadarrama	LOCALIZACIÓN	España
OBRA SUBTERRÁNEA	2002	PENDIENTE %	1.5
AÑO	Ferroviano	COBERTURA (m)	992
TIPO DE SECCIÓN	Circular	LONGITUD (m)	28377

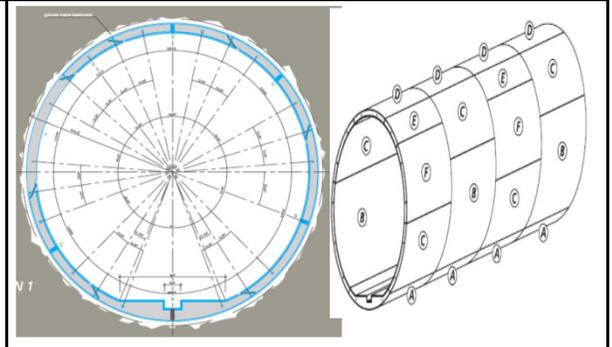
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Los materiales se componen por un macizo granítico de Gneis y complejo metamórfico.	
EDAD DE LA ROCA	Cretácico y Cuaternario	
TIPO DE ROCA	Sedimentaria	
ALTURA TUNEL (m)	9.45	
ANCHO TUNEL (m)	8.5	
ALTERACION DEL MACIZO	Cizallas esporádicas	
TIPO DE TERRENO	Rocas dura.	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura - Tuneladora	
MEDIDAS DE SOPORTE	Anillos prefabricados de hormigón armado	
REVESTIMIENTO	Hormigón 320 mm de espesor	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Se presento infiltraciones esporádicas durante la construcción del túnel, las irrupciones asociadas a los características de diaclasamiento y foliación del macizo ígneo - Metamórfico.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin Información	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-10	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	Sin Información	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	No se requerido	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Cunetas colectoras, desnivel longitudinal	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Estanqueidad de la excavación por medio de juntas y bandas de caucho instaladas entre las juntas, instaladas a presión y empleando materiales de resina.	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Procesos de disolución y erosión en el macizo	

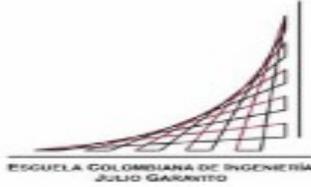


### COMENTARIOS GENERALES

El diámetro de excavación de estas Tuneladora es de 9,5 metros aproximadamente y, una vez recubierto por el anillo de dovelas de 32 centímetros de espesor, se queda reducido a 8,5 metros. Tras este proceso, el túnel queda listo para la instalación del resto de elementos ferroviarios. A nivel descriptivo, se trata de un túnel de doble tubo, con una separación de 30m entre ejes y 28,4 km de longitud. Ambos tubos se encuentran conectados entre sí por galerías de emergencia situadas cada 250 metros. Al comienzo de su construcción se presentaron algunos problemas que han podido solventarse, como filtraciones de agua, formación de nubes de polvo al paso de los trenes.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Noviembre de 2016. Asociación Técnica de Carreteras - Diseño y Aspectos Constructivos de Túneles. I Congreso Internacional sobre la Travesía Ferroviaria por el Pirineo Central. España - Zaragoza 2008. Ministerio de fomento de España. [http://www.adifaltavelocidad.es/va\\_ES/infraestructuras/lineas\\_de\\_alta\\_velocidad/madrid\\_valladolid/tunel\\_de\\_guadarrama.shtml](http://www.adifaltavelocidad.es/va_ES/infraestructuras/lineas_de_alta_velocidad/madrid_valladolid/tunel_de_guadarrama.shtml). INGEO-TUNELES. López Jimeno. Madrid 1999 - Tomo I



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización de túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - usavancouver - 0029

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel Ashlu Creek	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Vancouver, Columbia Británica - USA
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Hidroeléctrico	<b>PENDIENTE %</b>	1
<b>AÑO</b>	2010	<b>COBERTURA (m)</b>	120
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Circular	<b>LONGITUD (m)</b>	4400

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Macizo de granito con múltiples zonas de falla, resistencia hasta 250-300 Mpa, con un alto contenido de cuarzo y muy abrasivo.		
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Granito		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Granito		
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	4.08		
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	4.08		
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Múltiples zonas de falla		
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Roca dura, alterada, zonas de cizalla		
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Tuneladora		
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Roca Autosoportante, hacia las zonas de fallas se instalaron pernos, mallas y arcos de acero.		
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto lanzado esporádicamente.		



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Macizo continuo de buena calidad, presento filtraciones mínimas hacia las zonas de falla, las cuales fueron tratadas con las medidas de revestimiento instaladas en el túnel.		
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin información		
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-11		
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	1.14773E-06		
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Pernos sistemáticos en zonas de falla, revestimiento en acero		
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Desnivel		
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Revestimiento en concreto lanzado esporádicamente		
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Humedad y goteos puntuales		

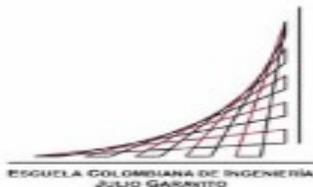


### COMENTARIOS GENERALES

El túnel es la cabeza de una hidroeléctrica de 50MW para la empresa Innergex Renewable Energy Inc. La Tuneladora tiene 30 x 17 in cortadores, Potencia de 1.200kW para atacar el granito de alta resistencia y su contenido de cuarzo altamente abrasivo, tasa de avance real fue de 6 a 10 m/ día.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Abril de 2017.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización de túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int - rephecEjpvovice - 0030

<b>PROYECTO</b>	Ferroviario	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Republica Checa
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Túnel ferroviario Ejpvovice	<b>PENDIENTE %</b>	8
<b>AÑO</b>	2016	<b>COBERTURA (m)</b>	-
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Circular	<b>LONGITUD (m)</b>	4150

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Condiciones geológicas mixtas de esquistos débiles y Pizarras y duras, rocas sedimentarias de lutitas.	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Spilite bajo Chlum Hill	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Metamórfica	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	7.84	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	7.84	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Zonas alteradas, cizallas, degradadas con irrupción de agua en varios puntos del túnel	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas blandas de mediana y baja calidad.	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura, equipo Tuneladora	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Concreto reforzado, arcos de acero, dovelas pre construidas	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Hormigón reforzado con fibra de 400 mm de espesor para toda la longitud del túnel	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Macizo altamente permeable en las capas superiores de la colina de Homolka por encima de la alineación dio como resultado altas entradas de agua subterránea tanto en la cara, como a lo largo de los 10 m de longitud del escudo TBM.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-06	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	6.74699E-06	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Medidas de preinyección fortalecimiento del frente del túnel, la mezcla de lechada cemento-bentonita	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Preinyecciones y bombeo	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Inyecciones de consolidación del terreno	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Irrupciones súbitas, goteos en zonas de falla.	

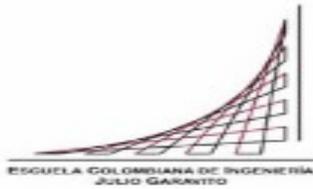


### COMENTARIOS GENERALES

Los trenes podrán atravesar esta sección del corredor ferroviario a velocidades de hasta 160 kilómetros por hora y el tiempo de viaje entre Praga Y Pilsen se reducirá el viaje a menos de una hora. La máquina Tuneladora modular / híbrida Herrenknecht, capaz de soportar presiones de trabajo de 4,5 bar, fue inicialmente configurada como un escudo EPB para los primeros 3.300 m. La tasa de avance fue influenciada por varios factores: inestabilidad de las rocas en las zonas de fractura, presión hidrostática y altas entradas de agua subterránea, y alta abrasividad. Entradas de agua subterránea con una presión hidrostática (hasta 3 bar). En las zonas de falla se encontraron las mayores entradas de agua subterránea de hasta 28 litros / s (101.000 litros / hora), la presión de la cara tuvo que ser aumentada para asegurar una estabilización adecuada. Las altas presiones requeridas para conseguir esto dieron como resultado que la mezcla de lechada de espuma / contacto se forzara a través de la roca porosa por encima y hasta la superficie, con las filtraciones y contacto con la roca se generaron lodos y material viscoso que implicó problemas en el túnel y hasta la superficie del proyecto. El revestimiento del túnel es un anillo hecho de hormigón con un diámetro exterior de 9,5 metros y un diámetro interno de 8,7 metros

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Abril de 2017. Water-inflow challenge for hybrid TBM. Consultado el 25 de marzo de 2017. <http://www.tunneltalk.com/Czech-Republic-06Jun-2016-Ejpvovice-tunnel-first-breakthrough.php>



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización de túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - tunVadlaheidisd - 0031

### DATOS GENERALES

PROYECTO	túnel de Vadlaheidi	LOCALIZACIÓN	Islandia
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel carretera	PENDIENTE %	1.5
AÑO	2015	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura solera Curva	LONGITUD (m)	7200

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Capas de basáltica con un espesor de escoria variable en las capas límite y algunas capas de toba de color naranja sedimentario.	
EDAD DE LA ROCA	-	
TIPO DE ROCA	Ígnea y sedimentaria	
ALTURA TUNEL (m)	9.5	
ANCHO TUNEL (m)	9	
ALTERACION DEL MACIZO	Rocas duras fracturadas, alteradas con múltiples zonas de falla	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras degradadas y fracturadas	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	forepoling, vigas de acero, vigas de celosía, malla y hormigón proyectado en zonas de cizalla y degradadas	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado	

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

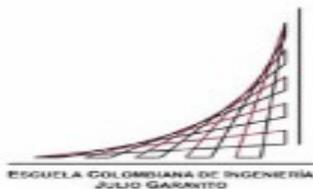
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	El macizo presenta múltiples zonas de debilidad, donde irrumpe el agua.	
NIVEL FREATICO (m)	Sin información	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-05	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.19E-04	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Lechada química de dos componentes así como lechada de cemento en la masa de roca fracturada para detener las entradas de agua caliente	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Perforaciones de inyección de 20-25m de largo, consolidación del terreno, revestimiento en concreto lanzado, bombeo y drenaje longitudinal. Perforaciones de alivio	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Inyecciones de consolidación del terreno	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Irrupción de agua en al contorno de la excavación, pilares, filtraciones de agua a presión y alta temperatura.	

### COMENTARIOS GENERALES

Después de alcanzar una distancia de aproximadamente 2.700m, se suspendió el proyecto debido a las dificultades crecientes con afluencias geothermal. Estos fueron progresivamente llegando a temperaturas de hasta 60 ° C. e inundación de agua en uno de los sectores de trabajo del túnel, velocidad de avance 15m/semana. En la actualidad, la expectativa es de grandes túneles en Nordfjordur podría ser completado en poco más de un año a partir de ahora, para una fecha de apertura prevista en el tercer trimestre de 2017.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Abril de 2017. Extensive grouting program in Iceland. <http://www.tunneltalk.com/Iceland-29Mar2016-Vadlaheidi-road-tunnel-grouting-program.php>. Consultado el 25 de marzo de 2017.



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización de túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - chintunQingdao - 0032

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel submarino Qingdao	<b>LOCALIZACIÓN</b>	China
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Ferroviario	<b>PENDIENTE %</b>	4
<b>AÑO</b>	2007 - 2010	<b>COBERTURA (m)</b>	70
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Circular	<b>LONGITUD (m)</b>	7800

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	La roca es principalmente granítica, lava brecha, toba, pórfido de sienita y riolítica. Se identificaron 18 fallas geológicas, 13 de ellos en la sección submarina de 4km de los 7.8 Km de túnel		
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Depósitos mesozoicos y cenozoicos		
<b>TIPO DE ROCA</b>	Rocas ígneas volcánicas		
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	7		
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	7		
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Rocas duras y blandas alteradas		
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Terreno de baja calidad, degradado		
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura		
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Inyecciones de consolidación, concreto armado y lanzado in situ. Arcos de acero		
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto lanzado		

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

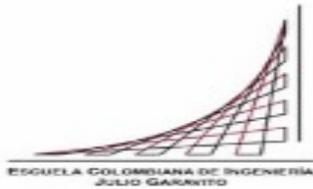
<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	El macizo se compone de rocas volcánicas, con múltiples diaclasas, fracturadas, las cuales son conductos del agua marina.		
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	0		
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-05		
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	3.33E-06		
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Inyecciones de consolidación para el mejoramiento del macizo excavado		
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Geomembranas de PVC, drenaje longitudinal y bombeo		
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Revestimiento en concreto impermeable, geomembranas, inyecciones de consolidación		
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Humedad y filtraciones parciales controladas.		

### COMENTARIOS GENERALES

La carretera de seis carriles de doble tubo, con túnel de servicio central, es el segundo túnel de carretera submarino de China. El túnel está diseñado para velocidades de carretera de 80km / hr y los dos tubos principales, a unos 55m paralelos, se conectan cada 750-1.000m con un pasaje cruzado de vehículo y cada 250-300m con pasajes transversales para peatones. La excavación fue complicada por un relativamente superficial 30m de Sobrecargas de roca con un máximo de 42m de agua para significar nivel del mar. La incorporación de aditivos de cenizas volantes y humos de sílice aumentó la resistencia del hormigón y la resistencia a la fisuración térmica, disminuyó su permeabilidad y evitó la reacción del álcali-agregado en mayor medida. Las materias primas y el hormigón se utilizaron en estricta conformidad con los requisitos propuestos por el equipo de investigación concreto, para cumplir con la estanqueidad y el rendimiento de protección contra corrosión del hormigón proyectado primario y el hormigón de revestimiento final in situ. Las especificaciones de vida de diseño de 100 años requerían el uso de concreto proyectado C35 de alto rendimiento y cemento estanco C50. La entrada de agua se controló hasta un límite estricto de 20 litros / min / 100m de túnel para minimizar los costos de bombeo. A través de pruebas de laboratorio y de control de calidad en el sitio de los materiales, la aplicación de nuevas membranas de impermeabilización de PVC de alto rendimiento y diseños y sistemas de drenaje y la disposición de los ejes de mantenimiento y procedimientos para evitar el taponamiento de los sistemas de drenaje.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Abril de 2017. Presentación. Diseño y Construcción de Túnel de Qingdao Jiaozhou Bay Subsea - 2do Congreso Latinoamericano de Túneles y Espacios Subterráneos – LAT 2015, pag 58



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización de túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - islandbreakthr - 0033

### DATOS GENERALES

<b>PROYECTO</b>	Túnel breakthrough	<b>LOCALIZACIÓN</b>	Islandia
<b>OBRA SUBTERRÁNEA</b>	Proyecto Hidroeléctrico	<b>PENDIENTE %</b>	1
<b>AÑO</b>	2003	<b>COBERTURA (m)</b>	200
<b>TIPO DE SECCIÓN</b>	Herradura solera Curva	<b>LONGITUD (m)</b>	58377

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

<b>DESCRIPCION GEOLOGICA</b>	Flujos de lava de poca profundidad (100-250MPa UCS), basalto abrasivo. Los flujos de lava son bandas de depositados en capas delgadas a muy gruesas de 2-80MPa en UCS	
<b>EDAD DE LA ROCA</b>	Recientes	
<b>TIPO DE ROCA</b>	Basaltos y lava volcánica	
<b>ALTURA TUNEL (m)</b>	7.2	
<b>ANCHO TUNEL (m)</b>	7.6	
<b>ALTERACION DEL MACIZO</b>	Macizos muy alterados que interceptan zonas de fallas y cizallamiento localizado	
<b>TIPO DE TERRENO</b>	Rocas duras alteradas	
<b>METODO DE EXCAVACION</b>	Perforación y voladura	
<b>MEDIDAS DE SOPORTE</b>	Hormigón armado reforzado con fibra de acero de 40kg / m3 y los pernos de roca.	
<b>REVESTIMIENTO</b>	Concreto lanzado como revestimiento primario	



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

<b>DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS</b>	Macizo de rocas duras, intercaladas por depósitos de rocas blandas y discontinuidades que constituyen canales de infiltración hacia el túnel.	
<b>NIVEL FREATICO (m)</b>	Sin información	
<b>PERMEABILIDAD (m/s)</b>	1.00E-05	
<b>TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)</b>	6.50E-04	
<b>MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO</b>	Inyecciones de consolidación en la cara del túnel.	
<b>MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA</b>	Inyecciones de consolidación, bombeo y revestimiento en concreto	
<b>MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION</b>	Aditivos materiales Sika / Putzmeister. Sika Viscocrete 3060 IS y Sika AER. y Sika libre de álcali Sigunit AF 53 fue el acelerador de elección para todas las operaciones de hormigón proyectado	
<b>CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION</b>	Concreto impermeabilizado, inyecciones de consolidación en el terreno	

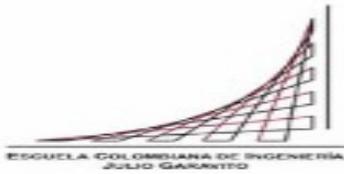


### COMENTARIOS GENERALES

El túnel interceptó una serie de fallas de hasta 8 m de ancho y que comprendía rocas de basalto muy cizalladas y sueltas. Tomó seis meses a través de esta zona de 55m utilizando una combinación de rejuntado, derrame, espaciado de cerca de conjuntos de acero y vertido hormigón relleno para avanzar. Los registros de infiltración alcanzaron hasta de 1.000 l / seg con presiones de hasta 8 bar. Debido a las difíciles condiciones climáticas de Islandia El agregado tenía que ser almacenado en recipientes calentados con vapor; Se utilizó agua caliente a 80 ° C en las mezclas; Y camiones mezcladores tuvo que ser deshielo antes de ser llenado en esfuerzos para mantener las temperaturas correctas para un curado eficaz. El proyecto es construido específicamente por Islandia para aprovechar la fuente de electricidad abundante, confiable y de precio fijo y apoyar una nueva planta de fundición de aluminio establecida por Alcoa a unos 100 km de la presa en la costa noreste de Islandia

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Abril de 2017. Impregilo completes +60km of tunnelling for Iceland's Kárahnjúkar power station. <http://www.tunneltalk.com/Tunnelling-complete-at-Karahnjukar-Iceland.php>



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización de túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int - usarrowhead - 0034

PROYECTO	Túneles de Arrowhead
OBRA SUBTERRÁNEA	Túnel Hidráulico
AÑO	2007
TIPO DE SECCIÓN	Circular

LOCALIZACIÓN	USA - Sur de California
PENDIENTE %	-
COBERTURA (m)	650
LONGITUD (m)	12800

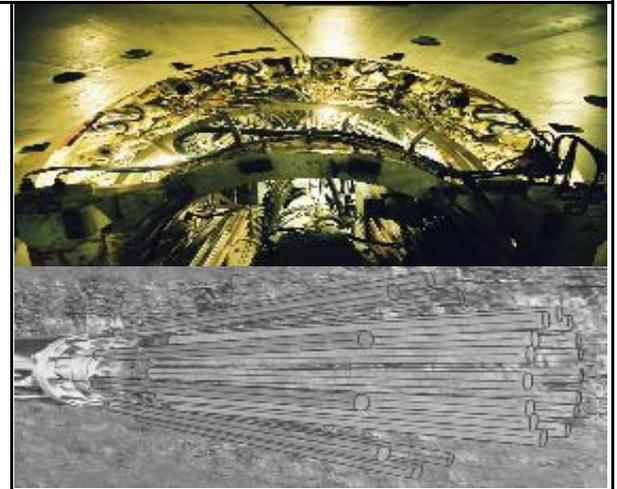
### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Roca de Granito de hasta 250 MPa y depósitos de materiales recientes.
EDAD DE LA ROCA	-
TIPO DE ROCA	Ígnea
ALTURA TUNEL (m)	5.8
ANCHO TUNEL (m)	5.8
ALTERACION DEL MACIZO	El túnel intercepta zonas de fallas y rocas altamente degradadas, trituradas o fracturadas con altos volúmenes de, al Aguas subterráneas de alta presión.
TIPO DE TERRENO	Rocas duras, blandas y altamente degradadas en la zona de falla
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura, maquinas Tuneladora Herrenknecht
MEDIDAS DE SOPORTE	Dovelas, consolidación en el terreno, blindaje en acero.
REVESTIMIENTO	Revestimiento primario segmentario de hormigón, blindaje en acero soldada e instalada como ultima capa de revestimiento.



### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Rocas impermeables intercaladas con terrenos alterados, disgregados y aptos para el almacenamiento y transmisión del agua subterránea.
NIVEL FREATICO (m)	335 - 630
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-06
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	1.85294E-06
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Inyecciones de consolidación y mejoramiento del macizo en la zona de avance del túnel. Cementos tipo II y III, rejuntados de poliuretano y químicos y lechada de sílice coloidal de BASF que ha tenido éxito en la reducción de las entradas de agua en condiciones que han resistido los lechadas de cemento micro-fino, en dilución.
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Bombeo, drenaje longitudinal, inyecciones de descompresión del macizo.
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto con características impermeables, inyecciones y blindaje en acero.
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Infiltraciones localizadas, con irrupciones en la cara del túnel.

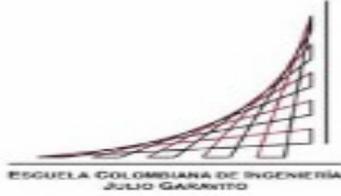


### COMENTARIOS GENERALES

La construcción de los tres túneles principales en el conducto alimentador interior de 44 millas (70km) para transferir el agua de los acueductos de Colorado y del norte de California al embalse Diamond Valley del Distrito Metropolitano. El túnel ha tenido graves irrupciones de agua, afectando equipos, maquinas y el avance del proyecto. La fuente del mayor problema es el gran volumen de agua subterránea que se aloja en las rocas fracturadas y sísmicamente perturbadas de las montañas de San Bernardino, a través de las cuales pasan los túneles. Con esto es el potencial de presiones de agua hidrostáticas sin precedentes de hasta cerca de 30 bar creado por los altos niveles freáticos en el máximo de 335m a 630m en los túneles. A esto se suman los requisitos del permiso de uso especial del proyecto del Servicio Forestal de los Estados Unidos que limitan el flujo de agua subterránea en los túneles de un máximo de 37litros por segundo en el túnel oeste de 6km y de 520gpm para los 6,8km Largo del túnel. Sin embargo, Se han registrado entradas de agua superiores a 12,6 l / s (200 gpm) desde un único agujero de sonda de 30 m (100 pies) y presiones de perforación de hasta 250 psi (17 bar). Si bien las TBM fueron diseñadas de acuerdo con las especificaciones del contrato, no fueron capaces de manejar adecuadamente las zonas de terreno "variable y altamente alterado" o las consecuencias de las altas entradas de agua o de los volúmenes excesivos de finos producidos. Los TBM y sus sistemas debían adaptarse a las condiciones reales. Fueron suministrados con cuatro equipos de perforación hidráulicos fijos y un quinto taladro rotatorio portátil para montar en el erector de segmento. Entre ellos, las plataformas podrían perforar un total de 26 agujeros; 15 a 1,5 ° a través del mamparo y la cabeza de corte directamente en la cara, y 11 a 8 ° en el frente del escudo. En superficie se instalaron estaciones de mezclado y bombeo HARTY junto con silos para la retención de materiales de lechada pre-excavación a granel.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Abril de 2017. Claving success from the extreme at Arrowhead. <http://www.tunneltalk.com/Arrowhead-Success-from-the-extreme.php>



# Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización de túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

## FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION DATOS GENERALES

Int - chilChacayes - 0035

PROYECTO	Túnel de Cipreses - Chacayes	LOCALIZACIÓN	Chile
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidroeléctrico	PENDIENTE %	1
AÑO	2009	COBERTURA (m)	-
TIPO DE SECCIÓN	Herradura	LONGITUD (m)	2450

### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	La geología del área corresponde principalmente a rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas que han sido asignadas a las formaciones Colimapu y Abanico.	
EDAD DE LA ROCA	Jurásico Superior, al Cretácico y al Terciario	
TIPO DE ROCA	Rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas.	
ALTURA TUNEL (m)	5.01	
ANCHO TUNEL (m)	5	
ALTERACION DEL MACIZO	Problemas de Hinchamiento de la roca en zonas de cizalla y combinación con el agua.	
TIPO DE TERRENO	Rocas alteradas y deterioradas en zonas de cizalla.	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura.	
MEDIDAS DE SOPORTE	Concreto lanzado	
REVESTIMIENTO	Concreto lanzado y geomembranas	

### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

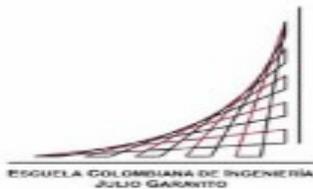
DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Rocas estratificadas volcánicas y sedimentarias, continentales y marinas, atravesadas por diques, filones, mantas y cuerpos irregulares mayores de rocas intrusivas, cubiertas parcialmente por depósitos sedimentarios cuaternarios no consolidados, con múltiples zonas de cizallamiento.	
NIVEL FREATICO (m)	0	
PERMEABILIDAD (m/s)	1.00E-07	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	8.00E-05	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Sin información	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Desniveles, bombeo, medidas de impermeabilización en el revestimiento	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Concreto hidráulico y geomembranas	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos localizados en zonas de fallas	

### COMENTARIOS GENERALES

El proyecto hace parte del sistema hidroeléctrico de Chacayes en el río Alto Cachapoal a unos 12 km al sur de Santiago. Tres de los túneles están siendo excavados usando la perforación convencional + explosión de la cara llena, usando el jumbo de Atlas Copco y de Tamrock de dos auges y los tranvías de la cucharada. Las condiciones de las rocas han sido generalmente buenas, pero una falla que sube paralelamente al túnel de Cipreses dio lugar a entradas de agua de hasta 160 l / s, que han disminuido desde entonces. Se utilizaron equipos como Atlas Copco y Tamrock jumbos. La mineralogía de la roca presentó problemas de hinchamiento con presiones de 1,2 MPa, lo que generó la instalación de revestimiento de hormigón fuertemente reforzado en las zonas afectadas.

### Fuente y referencias Bibliográficas

La información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante los meses de marzo a abril de 2017. HATCH. Chacayes Hydroelectric Generating Station. Mayo 8 de 2012.



## Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría Ingeniería Civil - Énfasis en Geotecnia

Control y manejo de agua e impermeabilización de túneles en Roca

Anexo - Casos históricos

Marzo de 2017

### FORMATO DE RECOLECCION DE INFORMACION

Int - tunplatanal - 0036

#### DATOS GENERALES

PROYECTO	Túnel Abducción Platanal	LOCALIZACIÓN	Perú
OBRA SUBTERRÁNEA	Hidroeléctrico	PENDIENTE %	-
AÑO	2010	COBERTURA (m)	700
TIPO DE SECCIÓN	Herradura sección plana	LONGITUD (m)	12200

#### DESCRIPCION GEOLOGICA Y DE LA EXCAVACION

DESCRIPCION GEOLOGICA	Rocas ígneas y metamórficas, roca ígnea masiva generalmente buena.	
EDAD DE LA ROCA	-	
TIPO DE ROCA	Ígneas y Metamórficas	
ALTURA TUNEL (m)	5	
ANCHO TUNEL (m)	5	
ALTERACION DEL MACIZO	Poco alterado	
TIPO DE TERRENO	Rocas duras de mediana y buena calidad.	
METODO DE EXCAVACION	Perforación y voladura	
MEDIDAS DE SOPORTE	Auto soporte	
REVESTIMIENTO	Para esta estructura se consideró la utilización de un revestimiento de concreto lanzado con espesor variado entre 7 cm a 15 cm	



#### CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS Y DE MANEJO DE AGUA

DESCRIPCION HIDROGEOLOGICA Y TIPO DE ACUIFEROS	Las filtraciones se encuentran asociadas a las discontinuidades y fracturas esporádicas del macizo.	
NIVEL FREATICO (m)	0	
PERMEABILIDAD (m/s)	Sin información	
TASA DE INFILTRACION (m3/seg/ml)	2.04918E-06	
MEDIDAS DE MEJORAMIENTO DEL TERRENO	Sin información	
MEDIDAS DE MANEJO DE AGUA	Drenaje longitudinal y revestimiento en algunos tramos del túnel.	
MEDIDAS DE IMPERMEABILIZACION	Revestimiento en concreto hidráulico.	
CARACTERISTICAS DE LA INFILTRACION	Goteos localizados	



#### COMENTARIOS GENERALES

La Central Hidroeléctrica se encuentra ubicada en la provincia de Cañete, Distrito de Zúñiga, localidad de San Juanito, aproximadamente en el kilómetro 66 de la vía de penetración San Vicente de Cañete - Yauyos, a una altitud aproximada de 900 msnm. El túnel se encuentra revestido el 5% del túnel. Se consideraron riesgos Geotécnicos por Squeezing considerable deformación en rocas sedimentarias más débiles con material de cubierta medio a alto.

#### Fuente y referencias Bibliográficas

La Información obtenida parte de información consultada en la Web, Journals y publicaciones, durante el los meses de marzo a Abril de 2017. Proyecto Hidroeléctrico Platanal - Perú. <http://www.celepsa.com/>. [www.fonamperu.org](http://www.fonamperu.org). El Platanal Hydropower Plant.