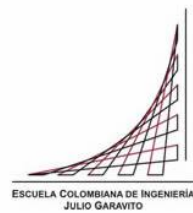


Maestría en Ingeniería Civil

**Metodologías de inyección para tratamiento de macizos rocosos
para obras geotécnicas**

Alfonso Gabriel Rico Rodríguez

Bogotá, D.C., 22 de Mayo de 2019

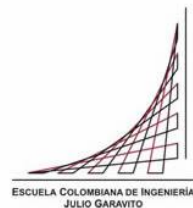


**Metodologías de inyección para tratamiento de macizos rocosos
para obras geotécnicas**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en geotecnia**

**Ing. Ramiro Gutiérrez Rodríguez
Director**

Bogotá, D.C., 22 de Mayo de 2019



La tesis de maestría titulada “Metodologías de inyección para tratamiento de macizos rocosos para obras geotécnicas”, presentada por Alfonso Gabriel Rico Rodríguez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ramiro Gutiérrez Rodríguez', enclosed within a large, hand-drawn oval.

Director de la tesis
Ing. Ramiro Gutiérrez Rodríguez

Jurado
Ing. Xavier Laloum

Jurado
Ing. José Vicente Amórtegui

Bogotá, D.C., 22 de mayo de 2019

Dedicatoria

Este documento se lo dedico a mis padres y hermanos, que siempre me han apoyado en todas las decisiones que he tomado y me han enseñado como ser una persona con buenos principios y a ser humilde ante toda situación.

A Patricia por ser una gran compañera que me ha estado a mi lado desde el principio de mis estudios de posgrado, apoyándome a seguir adelante cada día.

A mi familia por darme todo el apoyo en este mundo de la ingeniería.

Agradecimientos

Este documento es realizado gracias a los aportes que me han dado compañeros y colegas durante mis primeros años de experiencia laboral en ingeniería civil.

Le agradezco al ingeniero Ramiro Gutiérrez, por enseñarme y compartir en sus clases y en la firma INGETEC sus 40 años de experiencia de diseño y construcción de obras subterráneas en Colombia y en el mundo.

A los ingenieros Fabio Amaya, Camilo Marulanda, Juan Pablo García, Héctor Hernández, William Ruiz, Gerardo Checa, José Julián Hernández, Fredy Alfonso Camargo, Fabián Álvarez, geólogo Rafael Duarte, ingeniera geóloga Sonia Socha, jefes de Divisiones y Departamentos de la empresa INGETEC y compañeros, que me compartieron sus conocimientos sobre la ingeniería, la geología y la geotecnia, aplicándola en grandes obras civiles en el país y el mundo.

A la firma INGETEC que es la empresa de consultoría más grande y reconocida de Colombia, por darme la oportunidad de crecer profesionalmente, alcanzando mis metas y objetivos de aprender y afrontar nuevos retos.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, porque me dio las bases y conocimientos para formarme íntegramente como Ingeniero Civil, enseñándome los conocimientos científicos, tecnológicos y humanísticos con un sentido de la ética y comprensión de la ingeniería colombiana y del mundo.

A los profesores y compañeros de pregrado y posgrado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por compartir sus conocimientos y experiencias.

Resumen

Si no conoce sobre los tratamientos con inyecciones en macizos rocosos, este documento puede encontrar la información necesaria como guía básica, para diseñar, construir y supervisar este tipo de trabajos.

El documento está dirigido a ingenieros de diseño, geólogos, contratistas, ingenieros y personal relacionado con los trabajos de inyección, como una guía. Ofreciendo conceptos respecto a los trabajos de inyección para tratamientos de macizos rocosos. Para que, estos se ejecuten de forma segura, eficaz y económica.

Este documento reúne las metodologías y/o recomendaciones de tratamientos con inyecciones, aportando información y orientación, en el diseño, construcción y supervisión de proyectos donde se involucren tratamientos con inyecciones de macizos rocosos; para acoplarse a las necesidades y características de cada proyecto, de acuerdo a las condiciones geológicas y geotécnicas del proyecto y optimizando la ejecución del tratamiento en tiempos prudentes de ejecución.

En el glosario encontrará breves descripciones de varios términos utilizados en los tratamientos con inyecciones, que le facilitaran la interpretación de estos.

Encontrará las consideraciones geológicas y geotécnicas básicas, para tener en cuenta para realizar un diseño adecuado de los tratamientos. Así mismo, tendrá a la mano consideraciones de diseño de los tratamientos de diferentes entidades, sociedades y departamentos de ingeniería que han ejecutado tratamientos con inyecciones en el mundo.

Conocerá el tipo de materiales utilizados en las inyecciones y sus propiedades, los ensayos necesarios en estos materiales, para garantizar un adecuado tratamiento.

Se explica sobre las mezclas más utilizadas, a base de cemento, en el tratamiento con macizos rocoso, como es su uso y para que usan.

Se explican las presiones utilizadas para el procedimiento de inyección y con qué equipos se realizan. Igualmente, se explican los diferentes métodos para aplicar las inyecciones en el macizo y unos breves comentarios al respecto.

Encontrará consideraciones para la ejecución de los tratamientos, sugiriendo un programa de construcción del tratamiento, pautas básicas para la inspección y supervisión de los trabajos y criterios de cierre o terminación de los tratamientos.

De manera informativa, se muestran algunos casos históricos en Colombia de ejecución tratamientos con inyecciones.

Finalmente se dan las conclusiones y recomendaciones del documento, teniendo en cuenta que el análisis de información de los tratamientos con inyecciones, es un método observacional que requiere buen criterio ingenieril, con buenas bases de geología y geotecnia. Recordando nuevamente que este documento es una guía inicial para entender un poco sobre este tipo de trabajos.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	3
1. GLOSARIO.....	4
2. CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS	24
2.1 ASPECTOS GENERALES	24
2.2 Condiciones geológicas para el tratamiento del macizo rocoso.....	25
2.2.1 Rocas sedimentarias	26
2.2.2 Rocas ígneas	29
2.2.3 Rocas metamórficas	30
2.2.4 Estructuras geológicas.....	31
2.3 Investigaciones Geotécnicas	40
2.3.1 Perforaciones	41
2.3.2 Métodos geofísicos	44
2.3.3 Ensayos in situ.....	47
2.3.4 Ensayos de permeabilidad.....	50
2.4 Fotointerpretación	53
2.5 Celdas geotécnicas.....	55
2.6 Estudios hidrogeológicos	56
2.6.1 Métodos y etapas de investigación hidrogeológica	60
2.7 Permeabilidad del macizo.....	66
2.8 Historia del uso de inyecciones a nivel mundial	67
2.9 Conceptos sobre inyecciones para el tratamiento de macizos rocosos.....	71
2.10 Tratamiento con inyecciones relacionados con Mecanismos de falla.....	72
2.10.1 En rocas sedimentarias	72
2.10.2 Rocas ígneas extrusivas y piroclásticas	76
2.10.3 Rocas metamórficas	76
2.11 Tipo y propósitos de inyección	77
2.11.1 Impermeabilización del macizo rocoso	79
2.11.2 Reducción de gradientes hidráulicos	79
2.11.3 Mejoramiento de modulo elástico y propiedades de resistencia del macizo rocoso.....	79
2.11.4 Uso en obras subterráneas.....	79
2.11.5 Uso en presas.....	80
2.11.6 Otros tratamientos	81
3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO	82
3.1 Generalidades.....	82
3.2 Criterios de diseño	83
3.2.1 Cuerpo de ingenieros del ejército de los estados unidos (USACE)	87
3.2.2 Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE).....	94
3.2.3 U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation	104
3.3 Características del tratamiento	115

3.3.1	Orientación de las perforaciones para el tratamiento.....	115
3.3.2	Espaciamiento de perforaciones a espacio dividido o escalonadas (Primaria, Secundaria, Terciaria, etc.).....	125
3.3.3	Cortinas múltiples	128
3.3.4	Posición de una cortina de inyecciones en presas y túneles	130
3.3.5	Intersección de cortinas desde superficie y tratamientos desde túneles	142
3.4	Galerías de inyección	144
3.5	Inyecciones de consolidación	148
4.	MATERIALES PARA LA INYECCIÓN	152
4.1	Generalidades.....	152
4.2	Propiedades de los materiales para inyección	156
4.2.1	Reología.....	156
4.2.2	Exudación	159
4.2.3	Movilidad	160
4.2.4	Penetrabilidad	160
4.2.5	Cohesión (Bingham yield point)	161
4.2.6	Bombeabilidad	161
4.2.7	Tiempo de fraguado de la mezcla	162
4.2.8	Peso específico.....	163
4.2.9	Presión de filtración	164
4.2.10	Resistencia a la compresión.....	165
4.2.11	Contracción de la mezcla.....	167
4.2.12	Durabilidad de la mezcla.....	168
4.3	Agua.....	169
4.4	Cemento.....	171
4.4.1	Tipos de Cemento Portland	171
4.4.2	Otros cementos.....	174
4.4.3	Cementos ultrafinos	175
4.5	Puzolanas	176
4.5.1	Cenizas volantes.....	177
4.5.2	Material de escoria de horno	178
4.5.3	Humo de sílice	178
4.5.4	Puzolanas naturales	178
4.6	Arcillas.....	179
4.6.1	Montmorillonita y Bentonita.....	180
4.6.2	Otras arcillas	181
4.7	Materiales inertes.....	181
4.8	Aditivos químicos	183
4.8.1	Aditivos para modificar las propiedades de la mezcla.....	184
4.8.2	Agentes estabilizantes y anti-lavado	186
4.8.3	Látex	187
4.8.4	Agentes productores de gas y espuma	187
4.9	Mezclas no cementosas	188
4.9.1	Mezclas químicas	188
4.9.2	Inyecciones químicas.....	188
4.9.3	Resinas	192

4.10	Mezclas de inyección con otros materiales	194
4.10.1	Asfalto	194
5.	ENSAYOS	196
5.1	Ensayos en laboratorio	196
5.1.1	Cohesión de la mezcla.....	197
5.1.2	Presión de filtración	198
5.1.3	Resistencia al lavado de la mezcla.....	199
5.1.4	Prueba de aguja de Vicat.....	200
5.1.5	Resistencia a la compresión	200
5.2	ensayos en campo	202
5.2.1	Cono de Marsh	202
5.2.2	Exudación	204
5.2.3	Balanza de lodos	205
6.	MEZCLAS PARA INYECCIONES	206
6.1	Relación Agua: Cemento	206
6.2	Mezclas a base de cemento	206
6.3	Mezclas de inyección de bentonita – cemento	208
6.4	Mezclas de inyección a base de cemento con puzulanas.....	211
6.5	Mezclas de inyección para tratamientos especiales	212
6.5.1	Mezclas de inyección con aditivos para control de reología y fraguado	212
6.5.2	Mezclas de inyección de cemento – espuma	213
6.5.3	Mezclas de inyección con altas resistencias a la compresión.....	213
6.5.4	Mezclas de inyección con alta resistencia al lavado	213
6.5.5	Mezclas de inyección de alta durabilidad	213
6.5.6	Mezclas de inyección para relleno de oquedades.....	214
7.	PRESIONES DE INYECCIÓN	215
7.1	Criterios basicos de presión de inyección	215
7.2	criterios europeos de presión de inyección	215
7.3	Criterios contemporaneos europeos de presión de inyección.....	217
7.4	Criterio americano de presión de inyección.....	217
7.5	Presión máxima admisible	218
7.6	Unidades de la presión	219
7.7	Presiones de inyección por presión hidrostática de la mezcla	219
7.8	Conclusiones de presiones de inyección.....	220
7.8.1	Selección de presiones de inyección.....	220
7.8.2	Consideraciones especiales	220
8.	EQUIPOS	222
8.1	Perforadoras	222
8.1.1	Métodos de perforación	223

8.1.2	Perforación en rocas	223
8.2	Equipos de inyección	228
8.2.1	Mezcladoras	228
8.2.2	Agitadores	228
8.2.3	Bombas	229
8.2.4	Plantas de inyección	230
8.2.5	Cabezal de inyección	233
8.2.6	Manómetros	234
8.2.7	Empaques (<i>Packers</i>)	234
8.2.8	Sistemas de control y monitoreo de inyección	236
9.	MÉTODOS DE INYECCIÓN	237
9.1	Filosofía europea	237
9.2	Prácticas Americanas	238
9.3	Método GIN	239
9.4	Método de engrosamiento sucesivo	243
9.5	Comentarios a los métodos de inyección	250
9.5.1	Método GIN	250
9.5.2	Método de engrosamiento sucesivo	251
9.5.3	Comparaciones entre el método GIN y el método de engrosamiento sucesivo	252
10.	PROGRAMA DE CONSTRUCCIÓN DE CORTINA DE INYECCIONES	254
10.1	Preparación del terreno	254
10.2	Secuencia de inyección	255
10.2.1	Procedimientos de perforación	255
10.2.2	Perforaciones a espacio dividido	255
10.2.3	Inyecciones de consolidación	256
10.2.4	Cortina profunda	256
10.3	Tratamiento en zonas fracturada y zonas de falla	257
10.4	Tratamiento en zonas particulares	257
10.4.1	Inyección con presencia de agua o flujo de agua	258
10.4.2	Último recurso (relleno de oquedades)	258
10.5	Análisis de datos de inyección	259
10.6	Optimización de proceso constructivo	259
10.7	Recomendaciones durante construcción	259
11.	INSPECCIÓN Y SUPERVISIÓN DE TRABAJOS DE PERFORACIÓN E INYECCIÓN	262
11.1	Inspección	262
11.1.1	Inspección de los trabajos de perforación	263
11.1.2	Inspección de los trabajos de inyección	263
11.2	Supervisión	266
12.	CRITERIOS DE CIERRE O TERMINACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INYECCIÓN	270
12.1	Criterio de permeabilidad	270
12.2	Criterio por tomas de inyección	270

12.3	Criterio geológico	271
12.4	Criterio de datos de instrumentación existente.....	272
12.5	Criterio por evaluación detallada del procedimiento de inyección y de la cortina de inyección para cierre	272
12.5.1	Verificación por cada perforación	272
12.5.2	Verificación por cortina	272
12.5.3	Control de calidad de la mezcla de inyección	272
12.5.4	Verificación con inyecciones adicionales.....	274
12.6	Evaluación Estadística Para el cierre	275
12.6.1	Relación de reducción	275
12.6.2	Histogramas de distribución de frecuencia.....	276
12.6.3	Perfiles de permeabilidad	277
12.7	Evaluación detallada.....	278
12.8	Evaluación final.....	281
13.	CASOS HISTÓRICOS	282
13.1	Casos históricos del uso de tratamientos de inyección para presas.....	282
13.1.1	Central Hidroeléctrica El Quimbo	282
13.1.2	Central Hidroeléctrica Porce III.....	289
13.2	Casos históricos del uso de tratamientos con inyecciones para túneles	295
13.2.1	Central Hidroeléctrica el Guavio (Túnel de fuga)	295
14.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	308
15.	REFERENCIAS.....	315

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tiempo geológico.....	26
Tabla 2.2. Clasificación de rocas sedimentarias.....	27
Tabla 2.3. Clasificación de rocas sedimentarias según su fábrica.....	27
Tabla 2.4. Clasificación de rocas sedimentarias clásticas.....	28
Tabla 2.5. Clasificación de rocas sedimentarias según su origen químico.....	28
Tabla 2.6. Textura por tamaño de grano.....	32
Tabla 2.7. Dureza de las rocas.....	32
Tabla 2.8. Velocidad de ondas P a través de diferencias materiales.....	46
Tabla 2.9. Magnitudes de presiones usadas en cada etapa de la prueba.....	52
Tabla 2.10. Condición de las discontinuidades del macizo rocoso con diferentes valores de Lugeon.....	53
Tabla 2.11. Procedimiento de interpretación propuesto por Lugeon.....	54
Tabla 2.12. Escala de los mapas hidrogeológicos según la etapa de estudio.....	64
Tabla 3.1. Resultados esperados en la permeabilidad del macizo para el diseño de cortinas de inyección.....	85
Tabla 3.2. Elementos de la etapa de factibilidad.....	88
Tabla 3.3. Elementos de la etapa de diseño.....	90
Tabla 3.4. Ventajas, desventajas y otras consideraciones de los procedimientos de inyección ascendente y descendente.....	92
Tabla 4.1. Criterios de aceptación para fuentes de agua.....	170
Tabla 4.2. Límites químicos opcionales para el agua.....	170
Tabla 4.3. Valores típicos de los compuestos químicos principales en el cemento Portland.....	171
Tabla 4.4. Límites de gradación para arenas utilizadas para concreto según la norma ASTM C33.....	182
Tabla 4.5. Resultados de pruebas de mezclas de inyección con aditivos de anti-lavado.....	187
Tabla 4.6. Valores típicos de resistencia de las mezclas epóxicas.....	193
Tabla 5.1. Ensayos utilizados para mezclas de inyección, ubicación y frecuencia.....	197
Tabla 6.1. Propiedades típicas de mezclas de bentonita-cemento.....	209
Tabla 6.2. Efectos de la cantidad de bentonita en la mezcla ante la exudación.....	210
Tabla 6.3. Propiedades típicas de mezclas a base de cemento con puzolanas.....	211
Tabla 6.4. Relación entre las propiedades típicas de mezclas a base de cemento con puzolanas y la exudación de la mezcla.....	212
Tabla 12.1. Sistema de clasificación de tomas de inyección.....	271
Tabla 12.2. Ejemplo de cálculo de relación de reducción para tomas de inyección.....	276
Tabla 13.1. Tipos de mezclas utilizadas en el tratamiento con inyecciones en CHEQ.....	285
Tabla 13.2. Resultados promedio los ensayos ejecutados en campo.....	285
Tabla 13.3. Tipos de mezclas ensayadas para definir la mezcla única del tratamiento en Porce III.....	291
Tabla 13.4. Mezclas utilizadas en el tratamiento desde la galería piloto.....	300

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Pliegue sinclinal y anticlinal y grados agudeza del pliegue.	34
Figura 2.2. Discontinuidades por tensión en un pliegue.	34
Figura 2.3. Pliegue simétrico y asimétrico.	35
Figura 2.4. Tipos de falla.	36
Figura 2.5. Componentes de una falla.	36
Figura 2.6. Diaclasas en un estrato plegado.	37
Figura 2.7. Grupo de diaclasas en rocas intrusivas.	38
Figura 2.8. Diagrama ilustrativo de las propiedades del macizo rocoso.	39
Figura 2.9. Imagen de video de perforación con interpretación de buzamiento real y aparente.	44
Figura 2.10. Perfil obtenido mediante el registro de los georadares.	46
Figura 2.11. Distribución de perforaciones para inyección para una prueba en el sitio.	49
Figura 2.12. Configuración ensayo Lugeon.	51
Figura 2.13. Modelo digital de elevación comparado con modelo geológico, cordillera de los andes.	54
Figura 2.14. Perfil típico de meteorización para rocas metamórficas y rocas ígneas intrusivas.	55
Figura 2.15. Identificación de niveles de meteorización.	56
Figura 2.16. Diagrama esquemático del ciclo hidrológico.	57
Figura 2.17. Tipos de acuíferos.	59
Figura 2.18. Etapas de la exploración hidrogeológica.	61
Figura 2.19. Diagrama de flujo metodológico de la exploración hidrogeológica regional.	63
Figura 2.20. Histograma de presas construidas en los EE.UU (1600-2015).	70
Figura 2.21. Histograma de presas construidas en Colombia (1930-2018).	71
Figura 2.22. Tratamiento de inyecciones en presas.	78
Figura 2.23. Tratamiento de inyecciones en túneles.	78
Figura 3.1. Diagrama de flujo con algunas recomendaciones generales para diseño de cortinas de inyección.	84
Figura 3.2. Disposición típica de tratamiento de inyección.	91
Figura 3.3. Continuidad del tratamiento en estribos.	97
Figura 3.4. Continuidad del tratamiento en obras subterráneas.	98
Figura 3.5. Zona tratada con inyecciones.	99
Figura 3.6. Orientación de perforaciones para inyección según las condiciones de las discontinuidades.	100
Figura 3.7. Tratamiento cortina múltiple.	101
Figura 3.8. “Ventana” en la cortina de inyección por cambio de orientación de las perforaciones de inyección.	105
Figura 3.9. Estimación de presión efectiva en la etapa de inyección.	106
Figura 3.10. Etapa simple de inyección.	108
Figura 3.11. Método de inyección ascendente.	108
Figura 3.12. Método de inyección descendente.	109
Figura 3.13. Espaciamiento y profundidad de inyecciones.	110
Figura 3.14. Distribución de porcentaje del volumen de inyección en diferentes niveles.	111
Figura 3.15. Criterios de cierre para inyecciones a espacio dividido.	114
Figura 3.16. Perforación intersectando varias discontinuidades.	115
Figura 3.17. Perforación intersectando discontinuidades verticales y horizontales.	115
Figura 3.18. Perforación sin intersectar las discontinuidades.	115
Figura 3.19. Perforación intersectando las discontinuidades abiertas.	116
Figura 3.20. Perforación vertical utilizada en macizos rocosos muy fracturados atravesando gran parte de las discontinuidades abiertas.	116
Figura 3.21. Estereograma con familia de discontinuidades.	117
Figura 3.22. Perforación para inyección representada en un plano del estereograma atravesando una familia de discontinuidades.	118

Figura 3.23. Familia de discontinuidades en dirección a la cortina de inyecciones.	118
Figura 3.24. Familia de discontinuidades en dirección diferente a la cortina de inyecciones.	119
Figura 3.25. Orientación de perforaciones para inyección vista isométrica NE.	120
Figura 3.26. Orientación de perforaciones para inyección vista isométrica SE.	120
Figura 3.27. Perforaciones para inyección cruzadas para reforzar sectores específicos.	120
Figura 3.28. Cambios de nivel en la superficie.	122
Figura 3.29. Cambios de nivel en la superficie en perforaciones orientadas.	123
Figura 3.30. Ángulos de inclinación (α y β).	124
Figura 3.31. Separación y profundidad de las perforaciones para inyección requeridos en el diseño y durante el tratamiento de inyección.	125
Figura 3.32. Separación a espacio dividido de perforaciones en una cortina de inyección.	127
Figura 3.33. Perforaciones adicionales a lado y lado de la cortina de inyección.	128
Figura 3.34. Tratamiento con inyecciones con una sola cortina.	129
Figura 3.35. Tratamientos con inyecciones con varias cortinas.	129
Figura 3.36. Ubicación típica de una cortina profunda en una presa con núcleo de arcilla.	130
Figura 3.37. Inyecciones de consolidación en fundación de la presa con núcleo de arcilla.	131
Figura 3.38. Ubicación típica de una cortina profunda en una presa de enrocado con cara de concreto.	131
Figura 3.39. Cortinas de inyección en el plinto de una presa de enrocado con cara de concreto.	132
Figura 3.40. Cortinas de inyección desde galería de inyección desde el macizo rocoso.	133
Figura 3.41. Cortinas de inyección en presas de relleno homogéneo.	133
Figura 3.42. Ubicación típica de una cortina profunda en una presa de gravedad en concreto. ...	134
Figura 3.43. Ubicación típica de una cortina profunda en una presa de contrafuertes en concreto.	135
Figura 3.44. Configuración particular de cortina de inyecciones en sectores escarpados.	135
Figura 3.45. Inyecciones en abanico para tratar un sector específico desde una excavación subterránea.	137
Figura 3.46. Inyecciones hacia el frente en una excavación subterránea.	138
Figura 3.47. Inyecciones de consolidación en los frentes de excavación para túneles de gran diámetro.	139
Figura 3.48. Configuración de inyecciones hacia el frente de excavación desde nichos laterales.	140
Figura 3.49. Cortina radial de inyecciones.	141
Figura 3.50. Cortinas circulares alrededor de pozos.	141
Figura 3.51. Intersección de cortinas desde superficie y desde túneles.	143
Figura 3.52. Cortinas separadas en superficie y túnel.	143
Figura 3.53. Dimensiones típicas de las galerías de inyección.	144
Figura 3.54. Tratamientos de inyección desde las galerías de inyección.	145
Figura 3.55. Registro geológico de las galerías de inyección.	147
Figura 3.56. Galería de inyección en la fundación de una presa.	147
Figura 3.57. Inyecciones desde galería de inyección en túneles.	148
Figura 3.58. Inyecciones de consolidación en el frente de excavación de túneles.	148
Figura 3.59. Planta de inyecciones de consolidación en tratamientos de fundación para presas.	149
Figura 3.60. Sección A-A. Inyecciones de consolidación en tratamientos de fundación para presas.	150
Figura 4.1. Características reológicas de fluidos No Newtonianos y Newtonianos.	153
Figura 4.2. Tamaños relativos de diferentes partículas comparándolos con el cemento ultrafino.	154
Figura 4.3. Tamaños relativos del cemento ultrafino versus el cemento portland ordinario, en el contexto de penetrabilidad en discontinuidades.	155
Figura 4.4. Modelos de fluidos Newtonianos (1) y fluidos No Newtonianos (2).	157
Figura 4.5. Perfiles de velocidad de una lechada a través de una discontinuidad.	158
Figura 4.6. Comparación del comportamiento de lechadas de cemento.	159
Figura 4.7. Tasa media de sedimentación de lechadas de cemento.	160
Figura 4.8. Relación de Viscosidad de las mezclas con la relación de agua: cemento.	162
Figura 4.9. Balanza de lodos.	163

Figura 4.10. Coeficiente de presión de filtración.	164
Figura 4.11. Relación entre la resistencia a la compresión, la edad y el curado del concreto.	166
Figura 4.12. Contracción de las mezclas en función del agua.	167
Figura 4.13. Relación entre la relación A: C y permeabilidad de la mezcla de inyección a base de cemento.	169
Figura 4.14. Temperatura del concreto conforme fragua.	173
Figura 4.15. Efectos de la reacción exotérmica para diferentes tipos de cemento.	173
Figura 4.16. Curvas típicas de gradación comparando el cemento ultrafino con el cemento Portland Tipo I y III.	176
Figura 4.17. Aditivos minerales y composiciones de cemento.	177
Figura 4.18. Mineral de arcilla. Tetraedro de sílice.	179
Figura 4.19. Mineral de arcilla. Octaedro de aluminio o de magnesio.	180
Figura 4.20. Representación esquemática de los cristales que conforman la arcilla.	180
Figura 4.21. Propiedades de mezclas de espumas fenólicas.	194
Figura 4.22. Inyección coaxial asfalto y mezclas de cemento en la boca de la perforación.	195
Figura 5.1. Plato de Lombardi para medir la cohesión de la mezcla.	198
Figura 5.2. Vista lateral de una prensa de filtro de presión de placa empotrada.	199
Figura 5.3. Prueba de resistencia al lavado de una mezcla.	199
Figura 5.4. Aguja de Vicat.	200
Figura 5.5. Cono de Marsh y balanza de lodos.	204
Figura 5.6. Probeta graduada de 1000 ml para medir la exudación de la mezcla en porcentaje.	205
Figura 6.1. Efecto de las relaciones Agua: Cemento en las propiedades de la mezcla.	207
Figura 6.2. Viscosidad y velocidad de sedimentación en mezclas a base de cemento.	208
Figura 6.3. Evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo para diferentes combinaciones de mezclas a base de cemento y bentonita.	210
Figura 6.4. Relación de contenido de bentonita en la mezcla y la exudación.	211
Figura 6.5. Evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo para diferentes combinaciones de mezclas a base de cemento con puzolana.	212
Figura 7.1. Gráficas P vs Q y P vs T. Fracturamiento del macizo rocoso por efecto de las altas presiones de inyección.	216
Figura 7.2. Gráficas P vs Q y P vs T. Cambio de presión de inyección.	216
Figura 7.3. Gráficas de presión máxima permitida en diferentes condiciones de la roca y profundidad. En unidades de psi/pie y bar/m.	218
Figura 7.4. Presión hidrostática de la mezcla de inyección.	220
Figura 8.1. Comparación de rendimientos de perforación para diferentes métodos de perforación.	227
Figura 9.1. Procedimiento de inyección representado en una gráfica de presión versus volumen inyectado.	239
Figura 9.2. Curvas límites GIN, sirve de ayuda como guías iniciales de diseño.	242
Figura 9.3. Ejemplo típico de resultados de inyección con el método GIN.	242
Figura 9.4. Ejemplo típico de la presión de inyección conforme incrementa el caudal.	245
Figura 9.5. Ejemplo del adecuado manejo del caudal de inyección durante el procedimiento de inyección.	246
Figura 9.6. Situación donde se requiere engrosar la mezcla base.	247
Figura 9.7. Engrosamiento de la mezcla alcanzando la presión máxima establecida.	248
Figura 9.8. Cierre de procedimiento por volumen máximo.	248
Figura 9.9. Cierre de procedimiento por caudal de 3 l/s.	249
Figura 10.1. Representación esquemática de una conexión de mezcla entre perforaciones.	260
Figura 12.1. Ejemplo de histograma para diferentes tomas de inyección.	277
Figura 13.1. Vista isométrica de la distribución del tratamiento con inyecciones en CHEQ.	284
Figura 13.2. Proporción de inyecciones ejecutadas según el nivel de inyección.	286
Figura 13.3. Proporción de tomas de inyección del tratamiento.	287
Figura 13.4. Disminución de la presión hidrostática, observada en la instrumentación instalada.	288

Figura 13.5. Sección por el eje del plinto de la Presa CFRD Porce III, detallando los tratamientos con inyecciones.	290
Figura 13.6. Resultados de ensayos en campo de peso unitario.	292
Figura 13.7. Resultados de ensayos en campo de exudación.	292
Figura 13.8. Resultados de ensayos en campo de viscosidad de la mezcla.	292
Figura 13.9. Proporción de inyecciones ejecutadas en la cortina central de la presa con el método GIN según el nivel de inyección.	293
Figura 13.10. Proporción de inyecciones de consolidación ejecutadas en las cortinas aguas abajo y arriba de la presa con el método de engrosamiento sucesivo según el nivel de inyección.	294
Figura 13.11. Ubicación general de la Central Hidroeléctrica El Guavio y del túnel de fuga.	296
Figura 13.12. Perfil del túnel de fuga de la Central Hidroeléctrica El Guavio.	296
Figura 13.13. Planta túnel de fuga en sector donde se realizaron perforaciones de exploración y drenajes.	298
Figura 13.14. Sistema Antiavalancha utilizado en los drenajes.	298
Figura 13.15. Perfil túnel de fuga detallando la perforación inicial que no se alcanzó a identificar los estratos de arenisca friable.	299
Figura 13.16. Sección de galería piloto detallando las condiciones geológicas particulares.	300
Figura 13.17. Planta detallando las inyecciones hacia adelante para tratar el frente de excavación de la galería piloto.	301
Figura 13.18. Planta del inicio de excavación de la galería piloto.	301
Figura 13.19. Planta con el esquema de inyecciones desde el frente de excavación de la galería piloto.	302
Figura 13.20. Sección con esquema de inyecciones radiales ejecutadas desde la galería piloto.	302
Figura 13.21. Esquema de distribución de inyecciones hacia adelante en el frente de excavación de la galería.	303
Figura 13.22. Etapas de excavación de la sección total del túnel de fuga.	305
Figura 13.23. Tomas del tratamiento con inyecciones en la zona de la galería piloto.	307

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 2.1. Mapeo geológico en galería de exploración.....	43
Fotografía 2.2. Perforación exploratoria.....	43
Fotografía 2.3. Ubicación de perfil de la línea sísmica. ^(*)	45
Fotografía 2.4. Golpe con martillo. ^(*)	45
Fotografía 2.5. Toma de datos en el sitio. ^(*)	45
Fotografía 2.6. Línea sísmica en terrenos empinados ^(*)	45
Fotografía 2.7. Erosión en areniscas por efecto de las velocidades de filtración en el macizo.	73
Fotografía 3.1. Ejemplo de continuidad del tratamiento con inyecciones en galería de inyección. .	98
Fotografía 3.2. Excavación de galería de inyección y drenaje.	102
Fotografía 3.3. Manómetro de inyección utilizado en tratamiento de inyección.	107
Fotografía 3.4. Perforación direccionada para tratamiento con inyecciones en el plinto de una presa CFRD.....	124
Fotografía 3.5. Ubicación de pasantes de PVC en plinto para la posterior perforación e inyección de los tratamientos con inyecciones desde el plinto.	132
Fotografía 3.6. Trabajos de inyección en terrenos escarpados.	136
Fotografía 3.7. Perforación dirigida en túnel para perforación de huecos para inyecciones.	137
Fotografía 3.8. Excavación de pozo para compuertas de un túnel de conducción de agua.	142
Fotografía 3.9. Galería de inyección desde el portal de entrada y dentro de la excavación.	144
Fotografía 3.10. Equipos de inyección en Galería de inyección.	145
Fotografía 3.11. Equipos de perforación en la galería de inyección.	146
Fotografía 4.1. Inyecciones de contacto para rellenar espacios detrás de blindajes.	168
Fotografía 4.2. Inyecciones de contacto para rellenar espacios entre roca y revestimiento.	168
Fotografía 5.1. Formaleta utilizada para los cubos de mezcla.	201
Fotografía 5.2. Preparación de los cubos en el sitio de inyección.....	201
Fotografía 5.3. Cubos de 5 x 5 cm de mezcla utilizada, verificándolos para realizar el ensayo de resistencia a la compresión en laboratorio.....	201
Fotografía 5.4. Cono de Marsh preparado para iniciar el ensayo de viscosidad.....	203
Fotografía 5.5. Ejecución del ensayo vertiendo la mezcla utilizada para la inyección en el cono.	203
Fotografía 8.1. Perforadoras de rotación realizando procedimiento de perforación para inyecciones.	225
Fotografía 8.2. Perforadora de rotopercusión.	226
Fotografía 8.3. Planta estacionaria de inyecciones.	231
Fotografía 8.4. Planta modular de inyecciones.....	232
Fotografía 8.5. Preparación de la mezcla en el sitio con planta pequeña.	232
Fotografía 8.6. Adición de aditivos en la mezcladora.	232
Fotografía 8.7. Mezcla preparada en el sitio vertiéndose en la bomba.	233
Fotografía 8.8. Planta pequeña de inyección en galería de inyección.	233
Fotografía 8.9. Preparación de mezcla de inyección a base de cemento.	233
Fotografía 8.10. Mezcladora homogenizando la mezcla a base de cemento.	233
Fotografía 8.11. Cabezal de inyección durante procedimiento de inyección.	234
Fotografía 8.12. Manómetro durante procedimiento de inyección.....	234
Fotografía 8.13. Empaques mecánicos.	235
Fotografía 8.14. Empaques neumáticos.	235
Fotografía 8.15. Colocación del empaque dentro de la perforación donde se realizará el procedimiento de inyección.....	235
Fotografía 8.16. Centro de monitoreo del procedimiento de inyección.	236
Fotografía 8.17. Equipo automatizado para visualizar las gráficas en tiempo real.	236
Fotografía 9.1. Resurgencias de mezcla de inyección en superficie.....	252
Fotografía 10.1. Preparación del terreno para ubicar las perforaciones del tratamiento.....	254
Fotografía 10.2. Cizallas abiertas por tratar con inyecciones desde superficie.....	257

Fotografía 10.3. Cizallas rellenas con mezcla de inyección.	257
Fotografía 10.4. Resurgencias de agua en la perforación por efectos de la presión artesiana	261
Fotografía 11.1. Inspector revisando los procedimientos de inyección.	264
Fotografía 11.2. Inspector anotando en el libro de obra las novedades encontradas durante los procedimientos de inyección.	264
Fotografía 13.1. Presa CFRD El Quimbo.	282
Fotografía 13.2. Presa y obras en el estribo derecho de la presa El Quimbo.	283
Fotografía 13.3. Presa CFRD Porce III.	289
Fotografía 13.4. Flujos y avalanchas de material hacia la excavación en el túnel de fuga.	297
Fotografía 13.5. Excavación de galería piloto en el frente de excavación.	303
Fotografía 13.6. Avalanchas de material en el frente de excavación de la galería piloto.	304
Fotografía 13.7. Uso del sistema Antiavalancha en el frente de excavación de la galería piloto. ...	304
Fotografía 13.8. Excavación de galería piloto a través de estratos de arenisca friable.	305
Fotografía 13.9. Excavación por medio de road header de la sección del túnel de fuga en sector tratado con inyecciones.	306
Fotografía 13.10. Excavación de la sección superior del túnel de fuga.	306
Fotografía 13.11. Excavación de la sección completa del túnel de fuga.	306

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Presiones de inyección sugeridas por Houlby

ANEXO 2. Registros de inspección de perforación e inyección

ANEXO 3. Perfil de permeabilidad

INTRODUCCIÓN

Este documento reúne las metodologías y/o recomendaciones de tratamientos con inyecciones, aportando información y orientación, en el diseño, construcción y supervisión de proyectos donde se involucren tratamientos con inyecciones de macizos rocosos; para acoplarse a las necesidades y características de cada proyecto, de acuerdo a las condiciones geológicas y geotécnicas del proyecto y optimizando la ejecución del tratamiento de manera efectiva, económica y en tiempos prudentes de ejecución.

Las inyecciones son un proceso de inyectar materiales o fluidos en el macizo rocoso, que se acumulan en las discontinuidades existentes o en oquedades, llenándolas en su totalidad o parcialmente. Estos materiales inyectados pueden penetrar dentro de la matriz de material, rellenando los poros o vacíos intrínsecos mejorando sus propiedades mecánicas e hidráulicas.

En este documento encontrará la guía básica de cómo diseñar las inyecciones, que materiales utilizar, que ensayos realizar, cómo diseñar la mezcla a utilizar, a qué presión se inyectan estos materiales, los equipos que se utilizan en estos tratamientos, sugerencias de construcción, sugerencias de inspección y supervisión de los tratamientos y pautas para realizar un adecuado cierre de los tratamientos. De forma informativa, se explican algunos casos históricos donde se aplicaron exitosamente este tipo de trabajos.

El documento está estructurado de la siguiente manera:

- Capítulo 1 – Glosario
- Capítulo 2 – Consideraciones geológicas y geotécnicas:
- Capítulo 3 – Consideraciones de diseño
- Capítulo 4 – Materiales para la inyección
- Capítulo 5 – Ensayos
- Capítulo 6 – Mezclas para inyecciones
- Capítulo 7 – Presiones de inyección
- Capítulo 8 – Equipos

- Capítulo 9 – Métodos de inyección
- Capítulo 10 – Programas de construcción de cortinas de inyecciones
- Capítulo 11 – Inspección y supervisión de los trabajos de perforación e inyección
- Capítulo 12 – Criterios de cierre o terminación de los trabajos de inyección
- Capítulo 13 – Casos históricos
- Capítulo 14 – Conclusiones y recomendaciones

Al final del documento se indica una lista de referencias usadas para la elaboración del documento y los anexos del mismo.

OBJETIVOS

Objetivo general

Explicar metodologías y/o recomendaciones de tratamientos de macizos rocosos por medio de inyecciones, para utilizarse como guía en etapas de diseño y construcción para ingenieros de diseño, geólogos, contratistas, ingenieros y personal relacionado con los trabajos de inyección.

Objetivos específicos

- Tener en cuenta la geología del sitio del proyecto para acoplar la mejor metodología de inyección para el tratamiento del macizo rocoso.
- Capacitar a equipos de trabajo (Personal de obra) que no tienen suficiente experiencia en la utilización de metodologías de inyección.
- Optimizar los trabajos de inyección de forma segura, eficaz y económica dependiendo de las condiciones particulares de cada proyecto.

1. GLOSARIO

Este glosario se basa en el documento publicado en diciembre de 2005 en la revista “*Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*” por el comité del Grouting de la ASCE, Bruce, D.A. (2005). Donde resumen varios términos para facilitar la interpretación de estos. Se debe tener en cuenta que varios términos en inglés son usados, debido a no tener una apropiada traducción al español, los cuales se usan en el diseño y en obra durante los tratamientos con inyecciones.

A

Adherencia: Es la unión de la lechada con la roca a través de las discontinuidades de la roca.

Admixture: Es un material diferente al agua, utilizado en la mezcla de la lechada de cemento.

Absorción: Es la asimilación de fluidos dentro de los poros de la roca o el movimiento de inyecciones químicas dentro de las arenas.

Absorción de la lechada (impregnación): Relleno de los vacíos en un suelo o roca con un fluido de lechada a baja presión para mejorar las propiedades mecánicas y/o reducir la permeabilidad, sin destruir la estructura original del macizo rocoso y/o suelo.

Acelerante: Un material que incrementa la tasas de reacciones químicas dentro de la lechada.

Activador: Un material que causa una reacción química al inicio de la inyección.

Aditivo: En forma general es un material que puede usarse como una adición al cemento o una mezcla en concreto.

Agente de suspensión: Un aditivo que disminuye la tasa de sedimentación de partículas en un líquido.

Agente dispersivo: Una mezcla, como un agente reductor de agua también conocido como superplastificante que promueve la dispersión de los componentes de la lechada

mediante la reducción de la atracción entre partículas, al colocar temporalmente una carga repelente sobre las partículas de lechada.

Agente humectante: una sustancia capaz de reducir la tensión superficial de los líquidos, lo que facilita la humectación de las superficies sólidas y facilita la penetración de líquidos en los poros de la roca.

Aglutinante: Un material que causa la cohesión de sustancias ensambladas de manera suelta.

Agregado: Material granular que es relativamente inerte, como lo es la arena, gravas, piedras trituradas y otros, utilizado como componente estructural en la lechada de cemento.

Agregado reactivo: Un agregado que contiene material silíceo (usualmente en estado amorfo o criptocristalino) que reaccionará químicamente con álcali libre en cemento portland.

Análisis granulométrico: Determinación de las proporciones de partículas que se encuentran dentro de ciertos intervalos de tamaño en un material granular por separación en tamices de diferentes tamaños de aberturas.

Arena: partículas de suelo con un tamaño de grano que varía de 0.053 a 2.0 mm.

Arena equivalente: un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz de 4,75 mm (ASTM 2419).

Asentamiento o slump: Una medida de la consistencia del concreto recién mezclado, inyección de compactación o lechada de baja viscosidad.

B

Backfill Grouting: Relleno de grandes vacíos, tales como aquellos que pueden permanecer detrás de los soportes o el revestimiento de un túnel después de la construcción del revestimiento del túnel.

Backpack Grouting: Término antiguo que hace referencia al relleno con lechada del espacio anular entre un revestimiento del túnel y el macizo rocoso. Véase inyección de contacto.

Base: componente principal en un sistema de lechada. Además, cuando se refiere al pH, un álcali.

Batch: Cantidad de lechada mezclada a la vez.

Batch Mixer: una máquina que mezcla *batch*.

Batch System: Sistema de inyección en el que una cantidad seleccionada de lechada se mezcla y/o cataliza de una vez antes de la inyección.

Bentonita: Una arcilla compuesta principalmente de minerales del grupo montmorillonita, que se caracteriza por su alta absorción y un gran cambio de volumen al humedecerla. Comúnmente utilizada como un aditivo en lechadas.

Blaine Fineness: Medida de la finura de los materiales como el cemento y las puzolanas.

Blanket Grouting: procedimiento en el que se perforan huecos poco espaciados entre sí y poco profundos, con el fin de reducir la permeabilidad de las partes superiores del lecho de roca debajo del sitio de una presa de tierra. Generalmente, pero no necesariamente, ya sea en un patrón de cuadrícula o en filas paralelas a la cortina de lechada. Comúnmente incluye agujeros "fuera del patrón" para tratar defectos geológicos seleccionados como fracturas o zonas de cizalla. A veces se confunde o se considera incorrectamente como sinónimo de inyección de consolidación.

Bleending: Exudación de agua de la lechada, especialmente después de la inyección.

Bomba de cavidad progresiva: bomba rotativa en donde un rotor helicoidal de acero gira dentro de un estator más blando. Los espacios que contienen la lechada avanzan a lo largo del rotor en un movimiento de atornillado positivo como resultado de la forma de hélice simple del rotor.

Bomba dosificadora: Una bomba que, junto con una o más bombas, que permite bombear los diversos componentes de un sistema de lechada en cualquier proporción deseada o en proporciones fijas.

Bombeabilidad: medida relativa de las propiedades de una mezcla particular de lechada a bombear, donde debe pasar, incluyendo la bomba, las tuberías, válvulas y mangueras.

Boudinage: son estructuras producidas por extensión de capas o niveles competentes que se han separado total o parcialmente en fragmentos. La palabra, es de origen francés, significa literalmente salchicha o embutido y describe perfectamente las formas que a menudo exhiben en perfil estas estructuras.

C

Catalizador: Un material que provoca reacciones químicas tales como el fraguado de mezclas químicas o el endurecimiento de las mezclas de resina para comenzar.

Cavidad por solución: Apertura en la roca, desarrollado a lo largo de planos de las discontinuidades o la estratificación, abiertos o la intersección de dichos planos, mediante la disolución y eliminación de rocas solubles tales como piedra caliza, yeso y roca de fosfato mediante el flujo de agua.

Cemento expansivo: Cemento que tiende a aumentar de volumen después de mezclarse con agua.

Cierre: en la inyección de cortinas, el cierre se refiere a lograr la reducción deseada en la toma de lechada y la permeabilidad mediante la división progresiva del espaciado de la perforación. Si se logra el cierre, habrá una disminución progresiva en la toma de lechada y la permeabilidad, ya que las perforaciones primarias, secundarias, terciarias y de mayor orden se rellenarán con lechada.

Cobertura: El espesor de la roca y/o el material del suelo que recubre la etapa de la perforación que se está inyectando.

Cohesión: Una propiedad física de la lechada que teóricamente controla su capacidad de fluir a través de discontinuidades finas en el macizo rocoso. Es equivalente al límite elástico de una lechada medida en un viscosímetro.

Cal: Específicamente, óxido de calcio (CaO) también, un término general de las diversas formas químicas y físicas de la cal viva y la cal hidratada. Actúa como un agente

estabilizador cuando entra en contacto con las arcillas debido a un intercambio de cationes. Forma un material cementoso cuando se mezcla con una puzolana.

Calor de hidratación: Calor producido por reacciones químicas con el agua, como la que se desarrolla durante el fraguado y endurecimiento del concreto.

Coloide: Una sustancia compuesta de partículas finas, después de una mezcla potente, no se sedimentan en una suspensión acuosa. Por ejemplo, silicato de sodio.

Compensación por contracción: lechada con cemento expansivo o una mezcla que causa un aumento de volumen. Si está restringido, induce tensiones expansivas que están destinadas a compensar la tendencia de la contracción por secado para inducir tensiones de tracción.

Comunicación: Cuando la lechada viaja a través del macizo rocoso desde la ubicación de la inyección hasta otra perforación.

Cono de Abrams: El procedimiento para medir el asentamiento o slump del concreto, su uso se explica en la norma ASTM C143.

Cono Marsh: Un dispositivo para medir la viscosidad de la lechada en el que se permite que un volumen predeterminado de lechada fluya a través de un orificio de tamaño preciso, el tiempo del factor de flujo de eflujo se usa como indicación de viscosidad. El método utilizado se describe en la norma ASTM C 939.

Consistencia: La capacidad del mortero o lechada recién mezclada para fluir.

Cortina de drenaje: Una hilera de huecos abiertos perforados paralelamente a la cortina de inyección de una presa de concreto y aguas abajo de la misma, con el fin de reducir las presiones de agua. Además, a veces se construye para interceptar las filtraciones excesivas aguas abajo de una presa durante o después del primer llenado de un embalse. Estas también se construyen en galerías de drenaje.

Cortina de inyección: Inyección de lechada en una formación de tal manera que se cree una zona de material inyectado transversal a la dirección del flujo de agua.

Ciclo de mezclado: Es el ciclo de la lechada donde inicia cargando el mezclador, mezclar y descargar la lechada al sitio del tratamiento.

Creep: Deformación a largo plazo dependiente del tiempo debido a una carga constante.

D

Deformabilidad: Una medida de la elasticidad de la lechada para deformar los espacios intersticiales en respuesta al movimiento del macizo rocoso.

Desmoronamiento o *slaking*: Deterioro de la roca al exponerse al aire o al agua.

Drill Mud: Una lechada utilizada en la perforación rotativa para evitar el derrumbe de las paredes de la perforación.

Discontinuidad: En geología: es una fractura o separación que interrumpe la continuidad física de una masa rocosa.

Dry Pack: Cemento seco o una mezcla de cemento y arena con un contenido de agua mínimo utilizado para reparar imperfecciones en concreto o para llenar pequeñas discontinuidades en cimientos de roca para controlar la fuga de la superficie durante la inyección de la cortina, o consolidación.

Dry Tracer (trazador): Un colorante inyectado en una ubicación superficial, como la base de una presa, o colocado en una ubicación de origen de filtración aparente, como un punto de entrada aparente en la cara superior de una presa, con el fin de localizar las vías de fuga preparatorias para diseñar un programa de inyección remediador.

E

Emulsionante: sustancia que modifica la tensión superficial de las partículas coloidales, evitando que se fusionen y manteniéndolas suspendidas.

Emulsión: Un fluido que contiene partículas coloidales dispersas.

Endotérmico: Reacción que absorbe calor.

Endurecedor: En una lechada epóxica o de resina de dos componentes, el componente químico que hace que se cure el componente base.

Ensayo de permeabilidad: Un ensayo de campo utilizado para determinar la permeabilidad in situ, la capacidad de un macizo rocoso para producir o aceptar agua, o la capacidad de un macizo rocoso para aceptar lechada a una presión dada.

Epóxicos: Una lechada de resina con varios componentes que generalmente proporciona resistencias muy altas.

Estabilización con lodos: Una zanja o perforación que se mantiene llena con una suspensión de bentonita u otro agente estabilizante durante el proceso de excavación para estabilizar las paredes de la zanja o perforación.

Etapas: Un segmento de perforación inyectado al mismo tiempo.

Etapas de inyección: Inyección secuencial de una perforación en etapas separadas en lugar de inyectar toda la longitud de la perforación a la vez. Se pueden inyectar en etapas ascendentes utilizando empaques, o se pueden perforar gradualmente en etapas descendentes y se pueden aplicar lechada desde la boca de la perforación o con los empaques colocados en una etapa previamente inyectada.

Exotérmico: Reacción que ocurre durante la hidratación del cemento portland en la lechada, que produce calor.

Expansor: Un aditivo cuyo objetivo principal es aumentar el volumen total de lechada.

Exudación: Separación del exceso de agua en una lechada como resultado del asentamiento de las partículas de cemento en la lechada. Comúnmente expresado como un porcentaje del volumen inicial de la lechada.

F

Factor de cemento: es la cantidad de cemento, que permanece en el suelo después de la mezcla.

Filtración: El flujo de pequeñas cantidades de agua a través del suelo, la roca o el concreto.

Finos: En terminología del suelo, material que pasa un tamiz N° 200.

Finura: Una medida de la distribución del tamaño de partícula.

Fisura: Una grieta, discontinuidad o fractura extensa en la roca o la masa del suelo.

Fluido newtoniano: Un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante.

Fluidificador: empleado en la lechada para aumentar la fluidez sin cambiar el contenido de agua.

Fly Ash: Ceniza volante es una puzolana artificial producida cuando el carbón pulverizado se quema en las plantas de energía eléctrica.

Fractura: Es una discontinuidad o una grieta en una masa rocosa. Pueden ser relativamente lisas y planas a irregulares y rugosas y generalmente ocurren en conjuntos paralelos, y tienen superficies y orientación generalmente aleatoria.

Fractura hidráulica: Fractura de una masa de suelo o roca por la presión de agua o una lechada fluida.

Fracturamiento hidráulico con lechada: Inyección deliberada de lechada a presiones altas para producir fracturas en una formación débil para promover la intrusión y distribución de la lechada.

G

Galería de drenaje: Una excavación subterránea desde el cual se perforan agujeros para instalar drenajes o construir una cortina de inyección, o ambos. También se construye dentro de la base de presas de concreto.

Galería de inyección: Es una excavación subterránea o un pasaje dentro y debajo de una presa, y/o en los estribos de una presa, utilizada para los trabajos de inyección. Dependiendo del tipo y configuración de la presa y de las condiciones geológicas del macizo rocoso, esta también puede servir como una galería de drenaje e inspección.

Grout: Véase lechada

Grout Cap: Es una capa de concreto en la superficie de la base a lo largo de la parte superior de una cortina de lechada, esta capa funciona para proteger las rocas débiles y/o meteorizadas en superficie durante el movimiento de los equipos de perforación e

inyección. En cualquier caso, esta capa de lechada asegura los orificios para la cortina de inyección.

Grout header: un ensamblaje que se monta en una carcasa o tubería vertical y sirve como medio de conexión de la línea de suministro de lechada. Comúnmente contendrá los manómetros, válvulas y otros accesorios de control requeridos.

Grouting: Véase inyección de lechada

Grupo de discontinuidades: Un grupo de fracturas más o menos paralelas en una masa rocosa.

H

Herramienta de pesca: Un dispositivo utilizado para recuperar equipos perdidos o caídos en una perforación.

Hidratación: Una reacción química entre el agua y el cemento hidráulico que comienza tan pronto entran en contacto entre sí.

Hidrofilico: La tendencia de un material para atraer agua.

Hidrofóbico: La tendencia de un material para repeler el agua.

Hidrómetro: Un dispositivo utilizado para medir la gravedad específica de los fluidos newtonianos.

Humectabilidad: la facilidad de un flujo a través de una superficie o en un sistema de poros debido a la tensión superficial medida por el ángulo de contacto de una gota de fluido en un plano de la superficie particular.

Hydraulic Jacking: En el contexto de las inyecciones en la base de presas, es la inyección de lechada en aberturas preexistentes, tales como discontinuidades y cizallas, a una presión suficiente para causar elasticidad, es decir, ensanchamiento temporal de esas aberturas para facilitar la entrada de la lechada.

I

Inyección ascendente: método de inyección que avanza desde el fondo del hueco hacia la superficie.

Inyección coloidal: Una lechada en la que las partículas sólidas dispersas permanecen en suspensión. Sin embargo, ninguna lechada de cemento es realmente coloidal.

Inyección de compactación: Lechada inyectada con un *slump* de menos de 1", lo cual genera que la lechada actúe como una masa en crecimiento a medida que la inyección continúa bajo presión, que proporciona un desplazamiento controlado para compactar suelos sueltos no plásticos.

Inyección de compensación: La introducción de una lechada fluida o semifluida en el suelo, aumentando el volumen local en el punto de inyección. Esto a su vez causa movimiento por la expansión de tierra lejos del área de inyección, ya sea compensando el movimiento en un sentido opuesto o causando que el movimiento se acumule en la dirección de expansión.

Inyección de consolidación: La lechada de consolidación consiste en la inyección de lechada a base de cemento con el fin de fortalecer la masa rocosa al rellenar las fracturas abiertas. De forma que sirve para reducir el gradiente hidráulico debajo de las presas de concreto al reducir la permeabilidad. Generalmente se hace perforando e inyectando agujeros poco profundos en un patrón de rejilla en el área de cimentación de presas de concreto, pero puede incluir perforaciones "fuera de patrón" para tratar fallas, discontinuidades o zonas de cizalla.

Inyección de contacto: El relleno de vacíos menores entre un revestimiento de túnel y el macizo rocoso, generalmente en la parte superior del túnel.

Inyección de desplazamiento: inyección en un sector de tal manera que desplaza o mueve el sector de manera controlada.

Inyección de resina: Una lechada compuesta de materiales esencialmente resinosos como epóxicos, poliéster y uretanos.

Inyección de lodo: Una suspensión fluida en agua de materiales arcillosos.

Inyección descendente: método de inyección desde la boca del hueco o de la etapa en la cual se presentó una inestabilidad, hacia abajo.

Inyección particular: lechada que se caracteriza por tener partículas insolubles suspendidas en la mezcla.

Inyección radial: Inyección de roca que rodea un túnel hidráulico con flujo a presión con el propósito de consolidar el macizo rocoso, y principalmente, reducir la permeabilidad del macizo.

Inyectable: La capacidad de una roca o masa de suelo para aceptar la lechada.

J

Jumbo: Equipo móvil que se utiliza para proporcionar una plataforma de trabajo para una o más operaciones en excavación de túneles, como taladrar y cargar orificios de voladura, fijar soportes de túneles, instalar pernos de roca, ejecutar inyecciones, etc.

L

Leaching o disolución: Es el fenómeno de disolución de la mezcla de lechada inyectada en el macizo rocoso debido a gradientes hidráulicos, tubificación o ataques químicos de aguas agresivas. Este parámetro es indicativo de la durabilidad a largo plazo de un tratamiento en un macizo rocoso.

Lechada: material fluido de cemento, soluciones químicas u otros que es inyectado en un suelo o formación rocosa para cambiar las características físicas.

Lechada con arena: Lechada donde se incorpora arena a la mezcla.

Lechada de alta movilidad: Inyección de lechadas con baja viscosidad aparente.

Lechada de baja movilidad (*Low Mobility Grout*): Lechada de bajo *slump*, se utiliza como lechada compactante, que no viaja libremente y no viaja cuando no hay presión de inyección.

Lechada de cemento: La inyección de lechadas basadas en cemento hidráulico con el propósito de alterar las propiedades de un suelo o masa rocosa.

Lechada de espuma: Lechada que se ha mezclado con un agente espumante durante o después de la mezcla inicial para reducir su peso unitario y/o para ayudar a reducir el costo de llenar los vacíos.

Lechada espumosa: Una lechada ligera compuesta principalmente de cemento y una espuma natural o sintética.

Lechada estable: Una lechada que presenta poca o ninguna solución, exudación o contracción. Se define como una mezcla de lechada estable cuando se obtiene una exudación inferior al 5% en 2 horas.

Lechada química: Cualquier material de inyección caracterizado por ser una solución pura o, como en el caso de las lechadas a base de silicato de sodio, una lechada que contiene tales partículas finas en suspensión que se comporta esencialmente como un fluido newtoniano o casi newtoniano durante la inyección.

Lechada sin aditivos: Una mezcla de cemento y agua que no contiene aditivos.

Levantamiento: Desplazamiento vertical de un macizo rocoso debido a la inyección de lechada en tal volumen y a una velocidad y presión tal que ocurra un *Hydraulic Jacking*.

Levantamiento de losas (*slabjacking*): Inyección de lechada debajo de una losa de concreto para nivelar y/o elevarla a un nivel específico.

Limo: partícula de suelo con tamaño de grano entre 5-53 micrones.

Lubricidad: La característica fisicoquímica de un material de lechada que fluye a través de un suelo o roca que es el inverso de la fricción inherente de ese material con el suelo o la roca.

Lugeon: Es una unidad de medida de la permeabilidad de un macizo rocoso. Una unidad Lugeon = 1 L (de agua)/metro de la perforación de prueba/minuto a una presión de inyección de 10 bar (aproximadamente 150 psi). La unidad más común en la que se calcula la permeabilidad mediante pruebas de permeabilidad junto con el diseño o la construcción de las cortinas de inyección.

M

Matriz: Material que llena parcialmente las grietas de un depósito natural o artificial o una masa compuesta de partículas más gruesas.

Medición de volumen líquido: Medición de lechada sobre la base del volumen total de componentes sólidos y líquidos.

Mezcla de lechada: Es un término descriptivo que se refiere a los tipos y proporciones relativas de los componentes que constituyen una lechada determinada.

Mezclador Coloidal: Mezclador de alto cizallamiento.

Mezclador continuo: Es un mezclador en el que los componentes de la mezcla se alimentan sin parar, y de los cuales el producto mezclado se descarga en una corriente continua.

Mezclador de mortero: Mezclador de lechada compuesto por un tambor horizontal en el que la mezcla se realiza por medio de una bandeja giratoria, paletas giratorias o ambas.

Mezclador de paletas: Un mezclador de lechada en el que la mezcla se realiza mediante paletas que giran alrededor de un eje.

Mezcladora: Una máquina empleada para mezclar los componentes de la lechada, mortero u otras mezclas.

Modificador: Un aditivo utilizado para cambiar la reacción química normal o las propiedades físicas finales de una lechada.

Módulo granulométrico: Un factor empírico obtenido al dividir el porcentaje total de una muestra.

Mud balance (Balanza de lodos): Dispositivo utilizado para la medición en campo de la densidad de lodos de perforación y lechadas. Comúnmente utilizado junto con las mediciones del cono Marsh para la verificación de la calidad de la lechada de la dosificación adecuada.

Mudjacking: es un término utilizado en épocas anteriores cuando solo se podía bombear un lodo arcilloso. Ahora es más común el uso de lechadas con cemento.

N

Nipple de inyección: Un tramo corto de tubería, instalado en un orificio, a través del cual se realiza la perforación y al que se puede unir el grout header con el fin de inyectar lechada.

Núcleo: Una muestra cilíndrica de lechada endurecida, roca o depósitos de lechada generalmente obtenidos por medio de una perforación con recobro.

O

Orificio de ventilación: Un agujero perforado para permitir el escape de aire, agua, lechada y/o gas. Se usa para controlar el flujo de lechada.

P

Packer (empaque): Un dispositivo que, cuando se inserta en una perforación de inyección de lechada, se expande (accionado mecánicamente, hidráulicamente o neumáticamente) para evitar el retorno de la lechada durante la inyección.

Penetrabilidad: Una propiedad de la lechada por su capacidad para llenar una masa porosa.

Penetración de la lechada: Relleno de discontinuidades o fracturas entre los espacios de rocas o poros en el suelo con una lechada sin perturbar el macizo rocoso.

Perforación rotatoria: Un proceso de perforación en el que se hace un agujero mediante la rotación de una broca a presión constante sin impacto.

Perforación con percusión: Un proceso de perforación en el que se hace un agujero mediante el uso de una serie de impactos con la broca; la broca normalmente gira durante la perforación.

Perforadora: Una máquina o equipo diseñado para penetrar en formaciones de tierra o roca, o ambos, utilizando técnicas de rotación, percusión rotatoria o sónica.

Piezómetro: Un dispositivo que está incrustado en un agujero de una perforación para medir los niveles freáticos o la presión de agua, existen dos uno que se deja abierto

(Casagrande) y el otro que mide la presión, por medio de un hilo vibrátil, este puede medir diferentes niveles de presión a lo largo de la perforación.

Plastificante: Un material que incrementa la plasticidad de una lechada, mortero o masa de cemento.

Presión de inyección: Es la presión medida a la entrada de un hueco de inyección, mientras se está inyectando la mezcla.

Presión efectiva de inyección: Es la presión calculada en el punto medio de una etapa en un hueco o el punto medio de una perforación, mientras se está inyectado la mezcla.

Porosidad: Es la relación entre el volumen de vacíos en un material y el volumen total del material, incluidos los vacíos, generalmente expresado en porcentaje.

Puzolana: Es un material silíceo y/o aluminoso, que en sí mismo no posee ningún valor cementoso, pero en presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido cálcico a temperaturas ambiente para formar compuestos que poseen propiedades cementosas. Las puzolanas usadas comúnmente en las lechadas son la ceniza volante y el humo de sílice

R

Reacción álcali cemento: Una reacción química entre Na_2O y K_2O en el cemento y ciertos minerales de silicato en el agregado, que causa la expansión que resulta en un debilitamiento y agrietamiento de la mezcla de lechada de cemento Portland.

Reactivo: material que reacciona químicamente con un componente a base de lechada.

Rechazo: Es una toma de inyección, baja o nula a una máxima presión de inyección permitida para la perforación de inyección o la etapa de inyección de lechada. (La presión de inyección máxima permisible comúnmente se basa en una "regla empírica" que toma en cuenta la profundidad de la parte superior de la etapa de inyección debajo de la superficie o la distancia más corta desde esa etapa hasta una cara libre, basándose en los resultados de extensas pruebas de presión durante un programa inyecciones de prueba, o en la resistencia de la masa rocosa según se determine, ya que una presión alta puede causar fracturamiento hidráulico o un desplazamiento en la superficie).

Recuperación del núcleo (RQD): Relación entre la longitud del núcleo recuperado y la longitud del agujero perforado, generalmente expresado como un porcentaje.

Relación agua: cemento (A:C): La relación entre la cantidad de agua y la cantidad de cemento o materiales cementosos en una mezcla de lechada. Dado que tanto las proporciones ponderales como las proporciones volumétricas son de uso común, se debe indicar cuál es el significado cuando se menciona la relación agua: cemento.

Relación de vacíos: La relación del volumen de vacíos dividido por el volumen de sólidos en un volumen dado de suelo o roca.

Retardante: Material que detiene o disminuye el inicio de la hidratación o que ralentiza la velocidad de hidratación.

Resina: Un material base que constituye una inyección química.

Resistencia de ligadura: Resistencia a la separación de la lechada fraguada de superficies tales como discontinuidades de roca, grietas en el concreto o material de revestimiento del túnel con el que está en contacto.

Retardante: Material que reduce la velocidad de las reacciones químicas en la lechada.

Retorno de lechada: método de inyección mediante el cual se hace circular lechada a través de un tubo que se extiende por el fondo de la perforación y hace retroceder el agujero a través de los espacios anulares fuera del tubo, pasando a través de un sistema en la parte superior del agujero, que devuelve la lechada al tanque agitador.

S

Segregación: Es la separación o asentamiento de los componentes de la lechada mezclada, ya sea en el agitador o en las discontinuidades tratadas, lo que da como resultado una distribución no uniforme de la lechada en el macizo rocoso.

Separación de perforaciones para inyección: Una secuencia de inyección en la que las perforaciones de inyección están relativamente espaciadas y las perforaciones de inyección subsiguientes se colocan a mitad de distancia entre las perforaciones de inyección previas para “dividir el espaciado”. Este proceso continúa hasta uno o más criterios especificados, como una menor toma de la inyección, se logran la máxima

presión de inyección permitida, mayor resistencia, o una reducción en la toma de lechada a un valor específico.

Silicato de sodio: Un material fabricado mediante la unión de Na_2CO_3 y arenas de sílice especialmente seleccionadas a altas temperaturas. El producto resultante es un vidrio amorfo que puede disolverse mediante un proceso especial para producir silicato de sodio hidratado en una variedad de formas. Se utiliza como base para ciertas lechadas químicas y como acelerador para lechadas de cemento.

Sinéresis: La exudación de agua a partir de una lechada de gel de sílice pura u otra lechada de gel.

Sistema catalizador: Un grupo de materiales que, en combinación, provocan que comiencen las reacciones químicas.

Sistema de lechadas químicas: Una lechada compuesta principalmente de cemento y una espuma natural o sintética.

Sistema de discontinuidades: Dos o más conjuntos de discontinuidades (comúnmente tres) o cualquier grupo de discontinuidades relacionadas con un patrón característico. Por ejemplo la orientación y/o rumbo.

Sleeve Port Grout Pipe (SPGP): Tubo de plástico o acero (generalmente de 2.5 - 5 cm de diámetro interno) con orificios pequeños (3,2-9,5 mm) perforados a través de la pared a intervalos determinados (0,3-1,2 m) con una cubierta de manguito exterior expansible, formando una válvula unidireccional para inyectar la lechada de cemento y/o químicos una o más veces mediante el uso de un empacador interno. Instalado previamente en una perforación inyectada con una lechada quebradiza de baja resistencia o mediante mangas expansibles externas colocadas e infladas a los intervalos deseados. (Es el término francés de Tubo A *Manchette*).

Slickenside: es una superficie suavemente pulida causada por un movimiento de fricción entre las rocas a lo largo de los dos lados de una falla.

Slush Grouting: aplicación de lechada de cemento en la superficie de la roca para rellenar grietas e irregularidades en la superficie.

Soil Mixing: técnica de mejoramiento de suelos utilizada para construir columnas de carga, muros de contención o muros de contención y para tratar los suelos in situ.

Straddle packer: Un dispositivo compuesto por un tubo de inyección combinado con dos packers de sello expandibles o de copa, lo que permite que la lechada inyectada pase a la zona entre los dos packers y fluya hacia el suelo o roca circundante (también llamado packer doble).

Suelo-cemento: Mezcla in situ casi homogénea de cemento o una lechada de cemento con tierra.

Surfactante: Son agentes químicos capaces de reducir la tensión superficial de los líquidos, facilitando el humedecimiento de las superficies sólidas y facilitando la penetración de líquidos en los capilares.

Suspensión: Mezcla de partículas sólidas suspendidas en un líquido.

T

Tanque agitador: Es un tanque abierto o tolva que está equipado con elementos de mezcla giratorios, utilizados para mantener el estado mixto de la lechada antes de su inyección.

Tasa de exudación: La velocidad a la que el agua se libera de la lechada por exudación.

Terreno que rueda o corre: el fenómeno se origina al momento en que el avance de una excavación subterránea se encuentra con material granular y por ende todo el material, allí contenido, va a rodar por dentro de la excavación.

Tiempo de curado: El período de tiempo entre la inyección de una lechada y su fraguado hasta un nivel de resistencia requerido.

Tiempo de flujo: Tiempo requerido para un volumen medido comúnmente 1 litro de lechada para fluir desde un cono Marsh.

Toma de inyección: Volumen de lechada inyectado. Puede referirse al volumen total inyectado una etapa de inyección dentro del agujero y/o a la lechada inyectada en toda la perforación, en una unidad de longitud inyectada en el macizo rocoso. Además, puede

expresarse en términos de la cantidad de lechada inyectada por unidad de longitud de la perforación inyección.

El volumen de cemento o sólidos en lugar del volumen de fluido se ha utilizado la toma de sacos o unidades comerciales utilizadas como son los bultos, baldes u otros recipientes que se almacenan y transportan al sitio de inyección, expresando la toma en unidades.

Toxico: En el contexto de inyección: materiales químicos y/o cementosos que son dañinos durante el manejo y la mezcla o al medio ambiente cuando se dosifican y/o mezclan incorrectamente antes de la inyección en el suelo o la roca.

Tremie: Un procedimiento de colocación de cemento, mortero o lechada en el que se inyecta el material a través de una tubería que se extiende hasta el fondo de un agujero de perforación, una abertura llena de agua o una cavidad, levantando gradualmente la tubería según sea apropiado para evitar taponamientos o mezclas con agua el proceso de inyección.

Tubo A Manchette: Una tubería de plástico o acero perforada con anillos de pequeños orificios, por lo general a intervalos de aproximadamente 12 pulgadas. (305 mm) a 40 pulgadas. (1,000 mm). Cada anillo de perforaciones está encerrado por una manga de goma corta que se ajusta herméticamente alrededor de la tubería para actuar como una válvula de una vía cuando se utiliza con una tubería interna que contiene dos elementos de empaquetadura que aíslan una etapa para la inyección de lechada. También se llama *Sleeve Port Grout Pipe*.

Lechada inestable: Lechada de cemento que tiene una exudación excesiva de agua, separación de las partículas o segregación de los componentes de la mezcla.

Tubo de ventilación: Un tubo de pequeño diámetro, como el que se puede insertar en una perforación del revestimiento de un túnel, se usa para permitir la salida de aire, agua o lechada.

V

Velocidad de mezclado: La velocidad de rotación de la mezcladora de las paletas del mezclador, expresada en revoluciones por minuto.

Vida útil: intervalo de tiempo máximo durante el cual un material puede almacenarse y permanecer en condiciones de uso. Usualmente relacionado a condiciones de almacenaje. Por ejemplo almacenaje de sacos de cemento, superplastificante, aditivos y otros.

Viscosidad: La resistencia interna a los fluidos de una sustancia, como la lechada, la hace resistir a fluir.

Y

Yield: volumen de lechada recién mezclada producida a partir de una conocida cantidad de ingredientes.

2. CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS

2.1 ASPECTOS GENERALES

El objetivo del tratamiento de macizos rocosos con inyecciones, es generalmente, utilizado para reducir las filtraciones que se presenten en el macizo rocoso donde se apoyan o se construyen las obras civiles, mediante el sellado o taponamiento de las discontinuidades y los pasos preferenciales de flujo de agua.

Por esta condición es necesario conocer las condiciones geológicas e hidrogeológicas del sitio para diseñar un adecuado programa de inyección, buscando identificar y tratar, de manera apropiada y efectiva, los pasos preferenciales de flujo de agua.

Para el diseño y el tratamiento del macizo rocoso, es necesario un conocimiento completo de los tipos de roca en el sitio y su historia geológica. Las características geológicas que afectan en el proceso de inyección se agrupan en dos categorías, características primarias y secundarias. Las características principales incluyen aquellos parámetros físicos o características que están relacionadas con el mecanismo de formación. Algunos ejemplos de características primarias que contribuyen a la permeabilidad y una posible necesidad de inyección, son los depósitos aluviales y formaciones de areniscas pobremente cementadas, tubos de lava, grietas de enfriamiento en lava y rocas intrusivas superficiales (por ejemplo, diques) y zonas de contacto. Las características secundarias son el resultado de esfuerzos geológicos que han actuado en la masa rocosa posterior a su deposición o formación. Los ejemplos de características secundarias que contribuyen a la permeabilidad de la masa rocosa incluyen cavidades de solución (cársticidad), fallas, cizallas, pliegues y discontinuidades creadas por liberación de esfuerzos.

Las diferentes propiedades de varios tipos de roca, por naturaleza de su origen, litología y estructura, influirán en las condiciones de inyección.

El conocimiento de las condiciones geológicas del sitio y las condiciones físicas y geométricas de los pasos preferenciales de agua se debe considerar una parte esencial del diseño de un programa de inyección, para identificar e interceptar discontinuidades potencialmente abiertas las cuales deben ser tratadas de manera efectiva.

Durante la ejecución de los tratamientos con inyecciones, los estudios geológicos iniciales deben actualizarse conforme avanzan los tratamientos y el programa de inyección, para revisar condiciones geológicas que no se consideraron durante el diseño inicial, para justificar tratamientos adicionales a los iniciales. Teniendo en cuenta, que las perforaciones para inyecciones que se ejecuten, proporcionan información de las condiciones del macizo rocoso. Por esta razón, este tipo de tratamientos debe ser dirigido por un especialista con experiencia y criterio en conjunto de un geólogo.

2.2 CONDICIONES GEOLÓGICAS PARA EL TRATAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO

La roca intacta es el material que no cuenta con discontinuidades o los bloques que quedan entre ellas. Presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo dado por su fábrica y microestructura mineral. La roca intacta o matriz, se puede clasificar desde el punto de vista geológico o mecánico. La clasificación geológica de la roca intacta aporta información sobre su composición mineralógica, textura, fábrica, isotropía, anisotropía, tamaño de grano y relación de la litología con diferentes procesos geológicos.

Los procesos geológicos ocurren durante períodos muy largos, y millones de años son solo un momento corto en el tiempo geológico. La historia geológica se ha dividido en períodos primarios, el más antiguo de los cuales es de aproximadamente 4500 millones de años. Cada período primario se divide en épocas, que generalmente están en línea con la aparición de diferentes especies de vida. Desde el punto de vista de las inyecciones, implicará solo períodos de tiempo geológicos recientes de menos de 300 millones de años, y obviamente se limitará a la mecánica de la formación de ese período. Comprender los detalles de esa formación se puede mejorar mediante el conocimiento de las formas de vida, los patrones climáticos y similares, que estuvieron presentes en su aparición. En la Tabla 2.1, se muestran los períodos de la edad geológica que se necesita estudiar durante el diseño del proceso de inyección.

Tabla 2.1. Tiempo geológico.

Era	Período	Época	Edad (millones de años)	Porcentaje total de tiempo geológico
Cenozoico	Actualidad		-	0.04%
	Cuaternario	Holoceno		
		Pleistoceno	1.6	
	Terciario	Plioceno	5.0	1.37%
		Mioceno	24.0	
		Oligoceno	38.0	
		Eoceno	55.0	
Paleoceno		66.0		
Mesozoico	Cretácico	Edad de los reptiles	138	3.98%
	Jurásico		205	
	Triásico		240	
Paleozoico	Pérmico	Edad de los anfibios	290	7.44%
Origen de la tierra			4600	

Adaptado de "A Geology for Engineers", F.G.H. Blyth y M. H. de Freitas (1984).

Las rocas se dividen en tres grupos según su origen: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

2.2.1 Rocas sedimentarias

La meteorización y erosión de las rocas existentes producen partículas de diversos tamaños que son transportados por el agua, hielo o viento, hasta ser depositado en diferentes lugares. Una vez se acumulan y están en reposo sufren procesos que los transforman en rocas sedimentarias. En resumen los procesos que determinan la creación de una roca sedimentaria son: meteorización, erosión, transporte, sedimentación y diagénesis.

La meteorización es el proceso físico químico que sucede en las rocas al estar en contacto con agentes externos principales, es decir, la atmósfera y la hidrósfera. La erosión es el proceso responsable de desplazar los materiales de suelo por la acción del agua, viento y hielo. Ya estos materiales meteorizados y erosionados son transportados hasta llegar al lugar de sedimentación. El transporte de los materiales se puede dar por la acción de la tracción, la saltación, la suspensión, la flotación y la disolución. La sedimentación es la acumulación del material meteorizado, erosionado y transportado desde los lugares de mayor energía del medio de transporte (aire, agua y hielo), hasta lugares donde la energía es menor. Y finalmente sucede la diagénesis, que es el proceso

en el cual el sedimento experimenta un cambio físico químico tras su deposición hasta convertir los sedimentos en roca. Normalmente los sedimentos se convierten en roca o se litifican por medio de los siguientes procesos: la compactación y la cementación.

La compactación se da cuando el peso del sedimento que se va colocando por encima comprime los sedimentos en masas densas y la cementación se produce conforme el agua que contiene sustancias disueltas se filtra a través de los espacios intergranulares del sedimento, luego con el tiempo el agua sale o se seca y entre las partículas queda el material cementante y con la ayuda de la compactación se unen las partículas en una masa sólida.

Las rocas sedimentarias se clasifican según la textura, resistencia y aglutinante.

Tabla 2.2. Clasificación de rocas sedimentarias.

Según Textura			Según la estratificación	
	Tamaño de grano (mm)			Espesor (cm)
Conglomerática	Gravas	> 2,0	Bancos	≥100
Arenosa	Arenas	2,0 – 0,006		30-100
Limosa	Limo	0,006 – 0,002		10-30
Arcillosa	Arcilla	<		1-3
En estas texturas lo más importante es el cementante			Laminados	0.3 – 1.0
			Finamente laminados	0.1 – 0.3

Adaptado Curso Mecánica de Rocas. Gutiérrez, Ramiro. (2016)

Tabla 2.3. Clasificación de rocas sedimentarias según su fábrica.

Según	Descripción	Ejemplos
Clásticas	Su formación es a partir de sus granos y por formación de residuos de roca	Conglomerado, arenisca, limolita, lutita
Consolidación	Su formación es a partir de su consolidación	Arcillolitas, argilitas
Precipitación química y orgánica	Su formación a partir de precipitación química y/o orgánica	Calizas, liditas, chert

Adaptado Curso Mecánica de Rocas. Gutiérrez, Ramiro. (2016)

Tabla 2.4. Clasificación de rocas sedimentarias clásticas.

Roca sedimentarias	Descripción
Clásticas gruesas	<p>Se caracterizan por su alta porosidad y su alta conductividad hidráulica.</p> <p>Las discontinuidades y fracturamiento incrementa su conductividad.</p> <p>La inyección con lechada de cemento es difícil por su poca impregnación al material, se sugiere la utilización de cemento ultrafino o puzolanas.</p>
Clásticas finas	<p>Las rocas sedimentarias clásticas finas son por ejemplo lutitas que se distinguen por ser fisibles.</p> <p>La fisibilidad es la tendencia a romperse en planos muy poco espaciados y paralelos, es decir se rompe en láminas.</p> <p>Cuando la roca no ha desarrollado fisibilidad se tiende a romperse en "terrones" por ejemplo la arcillolita, limolita, lodolitas.</p>

Adaptado Curso Mecánica de Rocas, Gutiérrez, Ramiro. (2016).

Tabla 2.5. Clasificación de rocas sedimentarias según su origen químico.

Según origen químico	Descripción	Ejemplos
Carbonatadas	Compuestas por cristales, fragmentos o restos de conchas fundamentalmente de calcita (CaCO_3).	Calizas, Dolomitas
Sílices	Aparece como módulos y bandas en limolitas y calcarenitas	Chert
Evaporitas	Formadas por precipitación de minerales durante la evaporación de mares o lagos.	Sal, yeso, Anhidrita, Halita
Ferruginosas	Numerosos sedimentos y rocas sedimentarias contienen hierro, algunos en concentraciones que hacen que los depósitos sean valiosos minerales de hierro. El hierro puede precipitarse como un mineral primario o bloquearse en redes cristalinas durante la diagénesis.	Siderita
Fosfatadas	Los cristales grandes se encuentran en las vetas de grano grueso de las rocas ígneas, se meteorizan, se sedimentan y litifican.	Fosforita

Adaptado de "A Geology for Engineers", F.G.H. Blyth y M. H. de Freitas. (1984).

Las rocas sedimentarias de origen químico como las carbonatadas y evaporitas, pueden generar ambientes cársticos, estas pueden ser de gran complejidad para la construcción de obras de ingeniería, debido al paso del tiempo se forman cavernas, depresiones y otras formas, por disolución parcial de la roca.

Las rocas solubles se dividen en dos categorías: aquellas que son ligeramente solubles, pero que se disuelven durante el tiempo geológico, y aquellas que tienen el potencial de disolverse rápidamente si se exponen, incluido flujos de filtración.

Los procedimientos de inyección en ambientes cársticos pueden ser considerablemente desafiantes debido a la gran variedad de condiciones que se pueden encontrar, desde discontinuidades continuas y cerradas hasta encontrar cavidades, que varían en tamaño desde pequeñas hasta grandes cuevas. Las cavidades pueden estar secas o húmedas y abiertas o llenas.

2.2.2 Rocas ígneas

Las rocas ígneas son formadas por el enfriamiento del magma o roca fundida. Se entiende por magma a un fluido natural a elevada temperatura, constituido por material de roca que goza de cierta movilidad. Al enfriarse el magma, se van formando y creciendo los cristales de varios minerales.

Las rocas ígneas de grano grueso que se forman a gran profundidad desde la superficie se denominan plutónicas (intrusivas). Un ejemplo de este tipo de rocas es el granito. Esta roca es rica en minerales de silicatos de color claro, el cuarzo y feldespatos.

Las rocas ígneas de menor grano son aquellas donde el magma se enfría rápidamente y sus cristales no se desarrollan completamente, por ende sus cristales son de menor tamaño. Esto sucede cuando hay una erupción de un volcán y el magma al estar en contacto con el ambiente se solidifica rápidamente y se forman cristales muy pequeños. Este tipo de rocas se denominan volcánicas (extrusivas) y suelen ser de grano fino. Un ejemplo de este tipo de rocas es el basalto. Esta roca de color verde oscuro a negro es rica en minerales silicato que contienen buena cantidad de hierro y magnesio. Debido a su gran contenido de hierro el basalto es más denso que el granito.

En las rocas ígneas la textura revela el ambiente en el cual se formó la roca, las cuales se dividen en:

Fanerítica (grano grueso): aquellas en que los cristales de sus minerales se pueden reconocer a simple vista. El magma se enfría lentamente durante miles de años desarrollando cristales grandes antes de que toda la masa se solidifique por completo.

Afanítica (grano fino): cuando los cristales de sus minerales tan solo se reconocen al microscopio. La roca fundida se solidifica muy deprisa y no hay tiempo suficiente para que crezcan cristales grandes, antes bien, se produce la formación simultánea de muchos cristales pequeños.

Vítrea: se origina durante las erupciones volcánicas en donde la lava es expulsada hacia la atmósfera y se enfría rápidamente que no se alcanzan a formar cristales, presentando estructuras amorfas sin cristales definidos, llamado también como vidrio

Porfírica: textura que se forma principalmente por los cambios bruscos en la velocidad de enfriamiento y, por consiguiente, diferencia en la temperatura de cristalización de los minerales, en donde es posible que algunos cristales sean bastante grandes mientras que otros estén empezando a formarse, generando rocas con cristales grandes, llamados fenocristales, y que se encuentran incrustados en una matriz de cristales más pequeños.

Piroclástica: se forman por la consolidación de fragmentos de roca individuales (cenizas muy finas, gotas fundidas o grandes bloques arrancados de las chimeneas volcánicas) emitidos durante erupciones volcánicas explosivas.

Vesicular: rocas de textura afanítica pueden llegar a presentar muchos poros dentro de su estructura, producidas por el escape de los gases conforme se va solidificando el magma.

2.2.3 Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son el producto de la recrystalización de otras rocas de naturaleza ígnea, sedimentaria o metamórfica, bajo la acción de cambio de presión y temperatura. Estas acciones de metamorfismo pueden ocurrir en los siguientes ambientes: térmico o de contacto, dinámico y regional.

Metamorfismo de contacto, ocurre cuando la intrusión de una masa ígnea caliente como el granito o el gabro produce un aumento de la temperatura en las rocas circundantes. Este aumento promueve la recristalización de algunos o todos los componentes de las rocas afectadas, los cambios más marcados que ocurren cerca del contacto con el cuerpo ígneo. Cuando la recristalización puede desarrollarse sin inhibiciones por un esfuerzo externo que actúa sobre las rocas, los nuevos minerales crecen al azar en todas las direcciones.

Metamorfismo dinámico, ocurre cuando el esfuerzo es el principal componente para modificar la roca, con la producción de texturas cataclásticas; estos son el resultado de la descomposición mecánica de las rocas sometidas al esfuerzo.

Metamorfismo regional, los esfuerzos y el aumento de la temperatura dan como resultado la recristalización, con la formación de nuevos minerales, muchos de los cuales crecen con su longitud o superficies planas en ángulo recto con la dirección del máximo esfuerzo de compresión. La textura orientada producida por minerales laminados o columnares se conoce como esquistosidad y una alteración de capas de esquisto con otras menos esquistosas da la textura en bandas conocida como foliación.

La roca metamórfica es típicamente muy densa y dura. Por su rigidez tan alta hace que se fracture fácilmente cuando se deforma o levanta en superficie, lo que genera discontinuidades limpias y abiertas que se pueden inyectar fácilmente y probablemente con tomas altas de inyección.

2.2.4 Estructuras geológicas

El conocimiento de las estructuras geológicas son indicativos del origen tectónico y formacional y deposicional de la roca. Mediante la observación de estas estructuras geológicas junto con la historia geológica, un geólogo puede obtener una buena idea de los detalles del macizo rocoso de un sitio determinado. Tal conocimiento es un requisito para la planificación óptima de un programa de inyección.

En los estudios geológicos de esta naturaleza se realiza la identificación y análisis de las principales estructuras geológicas, y su reconocimiento, para luego realizar el mapeo de las estructuras tectónicas de un determinado sector.

2.2.4.1 Características primarias

Aunque ciertas características son comunes a un tipo de roca dado, hay varios criterios que son comunes a toda la roca y, por lo tanto, se usan para clasificar muestras individuales. De estos, la historia de formación/deposición es primordial. Otras características que son significativas para todos los tipos de rocas incluyen la textura y la dureza.

Textura

La textura de la roca se define por el tamaño y la disposición de las partículas de las que está compuesta. En la Tabla 2.6, se define la textura por tamaño de grano.

Cuando todos los granos son casi del mismo tamaño, la textura se define y clasifica.

Tabla 2.6. Textura por tamaño de grano

Tamaño	Tamaño grano (mm)
Muy grueso	> 2.0
Grueso	0.6 – 2.0
Medio	0.2 – 0.6
Fino	0.06 – 0.2

Adaptado “*Dam Foundation Grouting*”, Weave, Kenneth y Bruce. (2007).

Para la roca de granos menores a 0.06 mm en la que los granos individuales son pequeños para ser visibles, la textura se describe por la sensación y el brillo.

Dureza

La dureza de una muestra se determina rallándola con un cuchillo y/o golpeando una muestra de mano con un martillo de un geólogo. En la Tabla 2.7, se muestran las definiciones estándar.

Tabla 2.7. Dureza de las rocas.

Dureza	Descripción
Muy suave	Se deja rallar con la uña, al golpearla con el martillo se desmorona
Suave	Ralla suavemente con un cuchillo, se rompe fácilmente con el martillo
Medianamente dura	Resiste a la ralladura de un cuchillo, se rompe con varios golpes del martillo
Dura	Para romperse requiere varios golpes firmes del martillo
Muy dura	Resiste a la rotura con los golpes firmes del martillo

Adaptado de “*A Geology for Engineers*”, F.G.H. Blyth y M. H. de Freitas. (1984).

2.2.4.2 Características secundarias

Son aquellas que se han formado después de la consolidación de la masa rocosa por las fuerzas de los movimientos epirogénicos y orogénicos. Esto da como resultado que en la superficie de la corteza terrestre ocurre continuamente la deformación, inclinación, levantamiento y depresión de la roca.

Tal movimiento generalmente se desarrolla muy lentamente durante los largos períodos de tiempo de la historia geológica, de modo que los cambios no son perceptibles. Sin embargo, los movimientos pueden ocurrir repentinamente, durante terremotos y deslizamientos de tierra.

Estos incluyen pliegues, uniones y fallas, pueden abrirse o rellenarse con otros materiales. Tanto la fuerza como la permeabilidad de un macizo rocoso en particular están directamente relacionadas con el carácter de estas características geológicas secundarias. La comprensión de tales características es, por lo tanto, fundamental para los criterios de diseño de un programa de inyección óptimo.

Pliegues

Son ondulaciones que presentan capas horizontales de roca sedimentaria cuando son modificadas de su posición natural por agentes orogénicos, que se presentan dentro del proceso del diastrofismo, que generan deformaciones plásticas y continuas, son producidos bajo esfuerzos tectónicos compresivos en condiciones de alta temperatura y alta presión y durante largos periodos de tiempo geológico, provocando de cierta manera el acortamiento y engrosamiento de la corteza terrestre.

Las rocas dobladas muestran fracturas considerables a lo largo del eje del pliegue.

Las fracturas asociadas con los ejes de pliegue se desarrollan en las rocas más frágiles (sedimentarias), pero es posible que no se extiendan a través de las capas intermedias y menos competentes. Las aberturas en estas fracturas, que son el resultado de fuerzas de tensión en las crestas y valles de los pliegues, pueden incluso no penetrar totalmente en las capas frágiles, ya que las fuerzas de compresión serán dominantes en la parte interna de los pliegues. Por lo tanto, las posibles vías de filtración son, en efecto, más lineales que planas, por lo que requieren un patrón denso de perforaciones de inyección de lechada para un tratamiento eficaz.

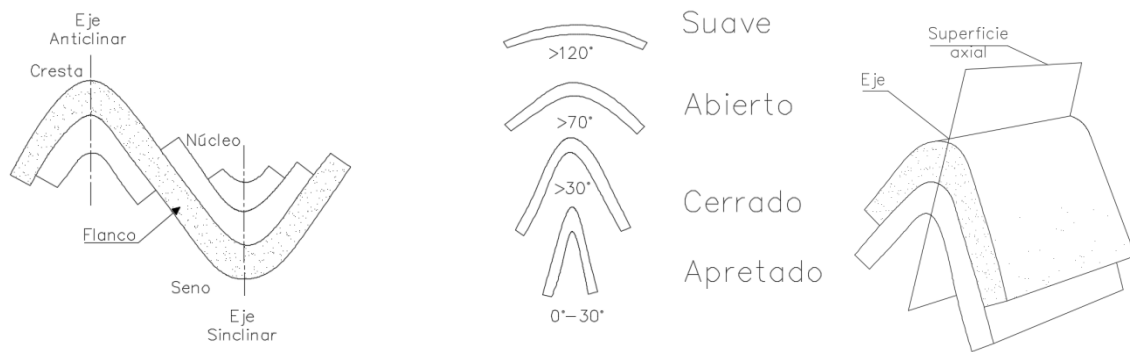


Figura 2.1. Pliegue sinclinal y anticlinal y grados agudeza del pliegue.
Adaptado de "A Geology for Engineers", F.G.H. Blyth y M. H. de Freitas. (1984)

Las discontinuidades creadas por tensión, estas se forman durante la deformación del material frágil y pueden estar relacionados con la tensión de corte entre los estratos. Las discontinuidades generadas se llenan con minerales, generalmente cuarzo o calcita.

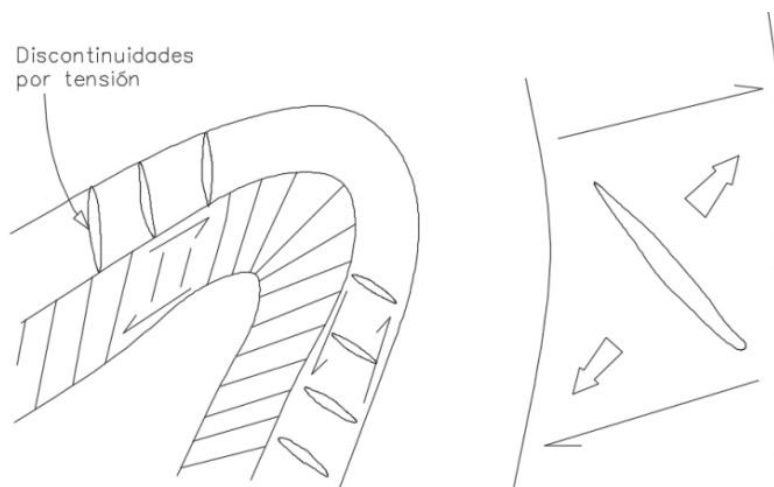


Figura 2.2. Discontinuidades por tensión en un pliegue.
Adaptado de "A Geology for Engineers", F.G.H. Blyth y M. H. de Freitas. (1984).

Existen pliegues por la intensidad de la compresión y de acuerdo a su orientación, estos pliegues se describen como simétricos (simples) y asimétricos (complejos), tomando como referencia el plano axial, si los flancos son imágenes especulares el uno del otro se habla de simétricos, y se habla de asimétricos como volcados o acostados si uno de los flancos está inclinado más allá de la vertical.

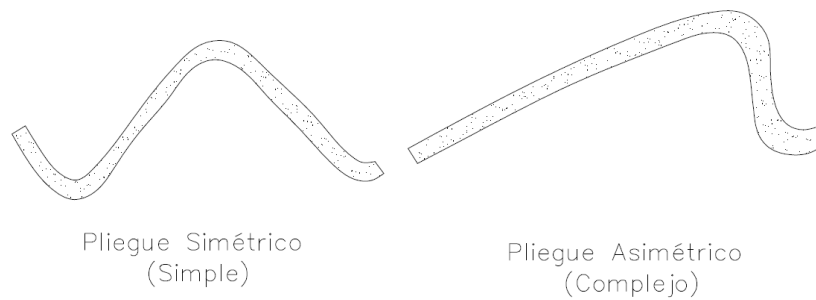


Figura 2.3. Pliegue simétrico y asimétrico.
Adaptado de "A Geology for Engineers", F.G.H. Blyth y M. H. de Freitas. (1984).

Fallas

Las fallas son fracturas a lo largo de las cuales se han movido masas de roca en una dirección paralela o perpendicular a la superficie de la falla. El movimiento puede variar de menos de un centímetro a muchos kilómetros. Las fallas fueron creadas por las fuerzas tectónicas de compresión, están rodeadas por rocas fuertemente fracturadas que pueden ser permeables. Las rocas normalmente presentan plegamiento, fracturamiento, aplastamiento y trituración.

A veces las paredes exhiben superficies pulidas y suavemente estriadas llamadas *slickensides*. Las rocas en los lados opuestos de la superficie de falla pueden romperse ocasionalmente en fragmentos angulares denominados "brechas de falla". Además de estos efectos mecánicos, las fallas pueden resultar en canales para transmitir agua o pueden ser impermeables y formar barreras de agua subterránea. El reconocimiento de fallas es de gran importancia porque las fallas representan zonas de debilidad en la corteza de la Tierra, y la presencia de estas zonas afecta las propiedades de ingenieriles del macizo rocoso de un sitio, incluidas las consideraciones sismológicas, la excavación, el soporte del túnel, la estabilidad de la presa y los problemas de fugas. Se debe tener en cuenta en el diseño del programa de inyección que en las zonas de fallas, las cortinas de inyección entrecrucen a varias profundidades las zonas fracturadas.

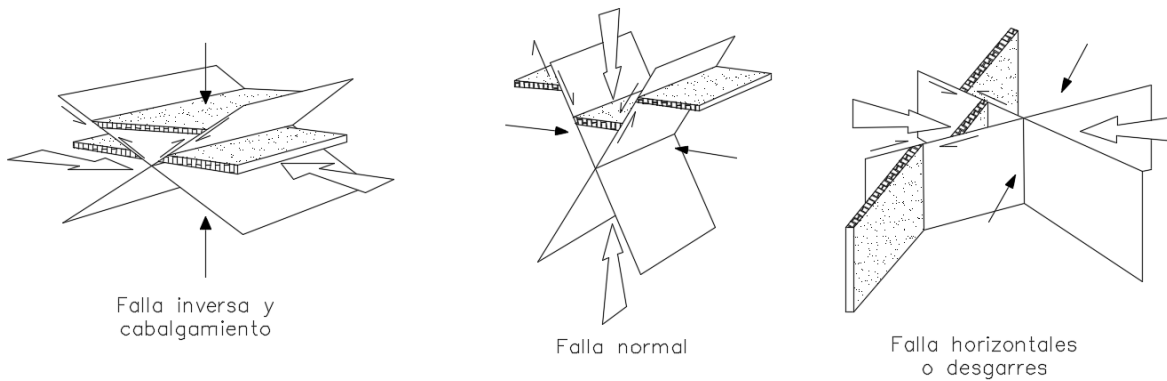


Figura 2.4. Tipos de falla.

Adaptado de "A Geology for Engineers", F.G.H. Blyth y M. H. de Freitas. (1984).

Componentes de las fallas

En una superficie de falla el movimiento puede ser de cualquier dirección y cantidad. El desplazamiento completo a lo largo de un plano de falla entre dos puntos originalmente adyacentes puede describirse por medio de tres componentes medidos en direcciones perpendiculares entre sí. El buzamiento, la orientación de la falla y la dirección del buzamiento.

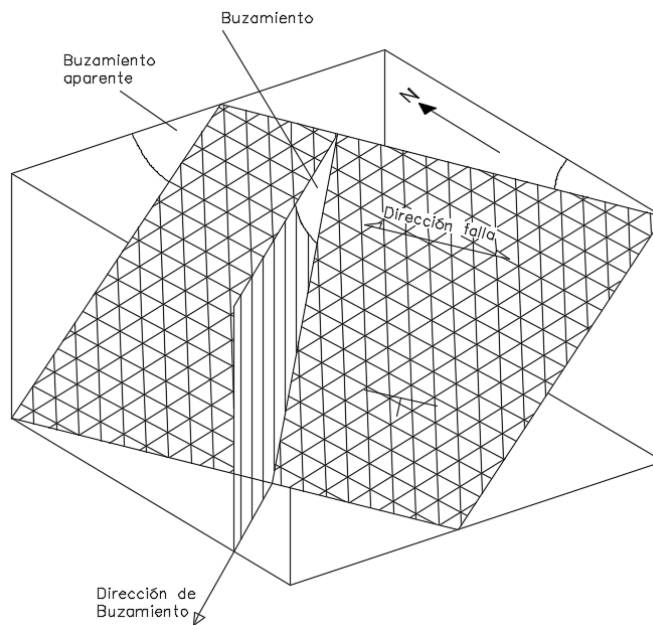


Figura 2.5. Componentes de una falla.

Adaptado de "Engineering Geology", F. G. Bell. (2007).

Diaclasas

Los planos de discontinuidades conocidos como diaclasas están presentes en casi todos los tipos de rocas, son la estructura más común para afectar el comportamiento de la roca en trabajos de ingeniería. Muchas diaclasas en un macizo rocoso se desarrollaron por el alivio de tensiones o de cizalla que actúan sobre la masa rocosa. La causa de las tensiones se ha atribuido diversamente a retracción, por tensión o compresión, por descompresión y otros fenómenos; todos son un alivio de los esfuerzos in situ.

Diaclasas en rocas sedimentarias

En muchas rocas sedimentarias se encuentran dos conjuntos de diaclasas que se intersectan en ángulos rectos o casi iguales, y suelen ser perpendiculares a los planos de estratificación.

La extensión y el patrón regular de las diaclasas en los estratos plegados demuestran su relación con la compresión que creó los pliegues y se cree que tales diaclasas son una expresión visible del alivio del esfuerzo que permaneció en las rocas después de la deformación.

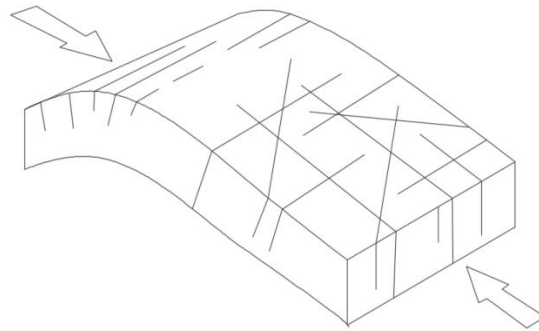


Figura 2.6. Diaclasas en un estrato plegado.
Adaptado de "A Geology for Engineers", F.G.H. Blyth y M. H. de Freitas. (1984).

Diaclasas en rocas ígneas

En las rocas ígneas, las diaclasas se forman cuando una masa caliente se enfría y se contrae. Así mismo, en flujo de lava se desarrolla un patrón de diaclasas hexagonales por contracción alrededor de muchos centros e igualmente espaciados el uno del otro, esto da lugar a una estructura columnar hexagonal que van de arriba a abajo de la masa; llamados basaltos columnares

En un cuerpo ígneo intrusivo, los sistemas de diaclasas se desarrollan durante el enfriamiento de la masa después de su emplazamiento. El enfriamiento tiene efecto primero cerca de la parte superior y paredes; el movimiento del magma aún líquido o plástico a un nivel inferior puede dar lugar a la fractura en la parte exterior, más solidificada, de la intrusión. Las líneas de inclusiones orientadas, como los cristales alargados, en la roca ígnea, se denominan líneas de flujo; se han formado por un flujo viscoso cerca ya menudo paralelo al techo de la masa intrusiva.

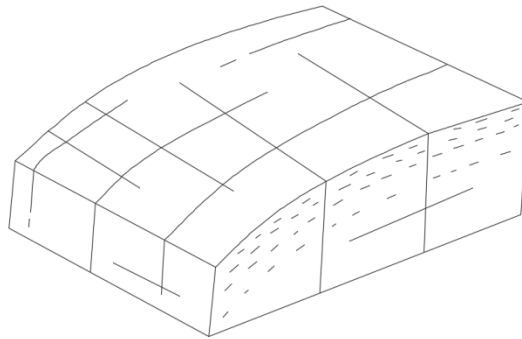


Figura 2.7. Grupo de diaclasas en rocas intrusivas.
Adaptado de “A Geology for Engineers”, F.G.H. Blyth y M. H. de Freitas. (1984).

Diaclasas cerca a zonas de falla

Cerca de una falla visible, las rocas están atravesadas por diaclasas paralelas a la superficie de la falla. Esto explica que se formaron en respuesta al mismo sistema de esfuerzo que las provocó; su frecuencia se disminuye al aumentar la distancia desde la falla.

Descripción de las discontinuidades en el macizo rocoso

La penetración de la lechada a través del macizo rocoso depende de las características de las discontinuidades que existan en el macizo rocoso, por lo que se debe conocer el tipo de discontinuidad, el espaciamiento, la rugosidad, apertura, continuidad, alteración en las paredes, la presencia de agua en la discontinuidad, la forma, relleno y consistencia del relleno, si lo tiene. Estas características se deben identificar para diseñar un programa de inyección, con presiones de inyección y mezclas de lechada adecuadas.

La descripción de las discontinuidades de un macizo rocoso se puede registrar mediante la observación de un afloramiento, de la observación de los núcleos de rocas extraídos durante la exploración geotécnica y por métodos de fotointerpretación.

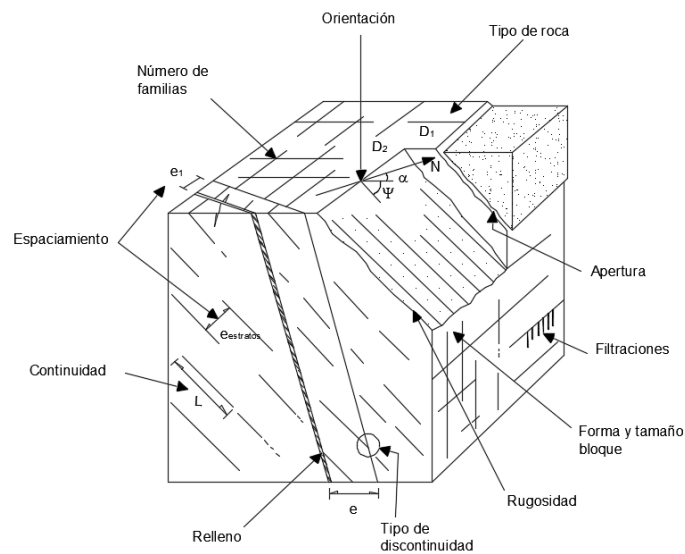


Figura 2.8. Diagrama ilustrativo de las propiedades del macizo rocoso. Adaptado de "Foundations on Rock",. Wyllie, Duncan C. (2005).

Orientación

La orientación de una discontinuidad en el espacio se describe por la inclinación de la línea de inclinación más inclinada medida desde la horizontal, y por la dirección de inclinación medida en sentido horario desde el norte.

Tipo

Se describen definiciones asociadas a los términos de diaclasas, diaclasa maestra, zona de cizalla, falla, grietas, fisuras, estratificación, foliación o esquistosidad y pizarrosidad.

Espaciamento

El espaciamento de las discontinuidades controla en gran medida el tamaño de los bloques individuales de roca intacta.

El espaciamento de las discontinuidades tiene una gran influencia en la permeabilidad del macizo rocoso y las características de filtración. En general, la conductividad hidráulica de cualquier macizo dado será inversamente proporcional al espaciamento, solo si, la apertura entre las discontinuidades son parecidas.

Rugosidad

La rugosidad de la pared de una discontinuidad es un componente potencialmente importante de su resistencia al corte. En términos generales, la rugosidad de las paredes

de las discontinuidades se puede caracterizarse por ondulaciones y asperezas. Las ondulaciones a gran escala, causan dilatación durante el desplazamiento ya que son demasiado grandes para ser cizalladas. Las asperezas son rugosidades de pequeña escala que tienden a cizallarse durante el desplazamiento a menos que las paredes de la discontinuidad sean de resistencia alta, de modo que la dilatación también puede ocurrir a pequeña escala.

Apertura

Es la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de una discontinuidad abierta.

Continuidad

La continuidad describe la extensión o el tamaño de las discontinuidades dentro de un plano. Puede ser cuantificada observando las longitudes de las discontinuidades en el plano expuesto.

Alteración de las paredes

Se observa el nivel de alteración de las paredes de la discontinuidad.

Presencia de agua

Se observa si a lo largo de la discontinuidad, hay presencia de agua, en forma de humedad, goteo o flujo.

Forma de las discontinuidades

Se observa la forma de la discontinuidad: plana, ondulada y muy ondulada.

Relleno

El relleno es el término para el material que separa las paredes rocosas adyacentes de las discontinuidades, por ejemplo, arcilla, limo, arena, roca triturada, óxidos de hierro, cuarzo, etc.

2.3 INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS

Las inyecciones deben programarse como cualquier actividad de construcción de una obra civil. Sin embargo, su programación es única, ya que las inyecciones se realizarán

en espacios no visibles y de configuración y/o estructura desconocida. Estas condiciones deben investigarse lo suficiente para obtener una buena comprensión de las propiedades finales existentes, así como de las posibles. La inspección a través de perforaciones o excavaciones subterráneas (galerías), se requieren normalmente, aunque existen métodos no invasivos, los cuales solo se limitan a desarrollarse como información complementaria y generalmente requieren perforaciones para la calibración del sistema en particular.

Con la información obtenida de las investigaciones geotécnicas del sitio es la base para el diseño y para establecer los requisitos específicos para la orientación de las perforaciones, profundidad de la(s) inyección(es), selección de los métodos de inyección, longitud de la etapa, número de cortinas de inyección, espaciamiento inicial para las perforaciones primarias, número mínimo de perforaciones para inyección, y espaciamiento final propuesto de las inyecciones. Estos elementos solo se pueden establecer racionalmente en función de la comprensión de la geología del sitio, las características físicas de la roca y su sistema de discontinuidades, y los objetivos y requisitos del proyecto.

Si las investigaciones geotécnicas no tienen una evaluación precisa de las condiciones del sitio, los elementos básicos del diseño de perforación e inyección pueden resultar ineficaces y pueden dar lugar a cambios importantes durante la construcción.

2.3.1 Perforaciones

Las perforaciones exploratorias pueden ser una de las características más importante para el diseño de un programa de inyección en un macizo rocoso. La profundidad de los agujeros de exploración no debe basarse en ninguna relación anticipada con las obras civiles planificadas, sino que debe estar dirigida a alcanzar una zona relativamente impermeable.

Las perforaciones exploratorias para el diseño de presas y obras subterráneas se enfocan en identificar el tipo y la condición física de la roca intacta, esto normalmente se pueden lograr por medio de una perforación por ubicación. Sin embargo, para el diseño de un programa de inyección, según Weave (2007), sugiere que se requieren por lo menos tres (3) perforaciones orientadas de forma diferente en cada ubicación seleccionada. Las

orientaciones de esas perforaciones deben basarse en las orientaciones de las discontinuidades registradas durante el mapeo geológico del sector.

Con la información obtenida de perforaciones se evalúa la idoneidad del tratamiento con inyecciones, se preparan modelos de flujo y de diseño, se determinan los procedimientos técnicos y los requisitos para la perforación y la inyección, y se estiman los costos.

De las perforaciones se obtiene los niveles de meteorización del macizo rocoso; la estratigrafía y las propiedades mecánicas de los tipos de roca; la orientación, buzamiento y el espaciamiento de los sistemas de discontinuidades; las características de las discontinuidades, incluyendo la existencia o ausencia de relleno; el tipo de material de relleno de las discontinuidades; los límites de las zonas con diferente permeabilidad; las ubicaciones de características especiales como zonas de fallas, zonas cizalladas y características de la solución; y la posición del nivel freático.

Las investigaciones con perforaciones deben tener en cuenta perforaciones inclinadas, por ejemplo el lecho de un río, para encontrar posibles zonas de debilidades geológicas, para conocer la permeabilidad y la naturaleza general de esa zona.

Para la investigación del macizo rocoso también existen exploraciones directas por medio de la excavación de galerías de exploración, donde se conoce el estado del macizo rocoso en la profundidad requerida, se conoce el estado de las discontinuidades y se pueden medir filtraciones directamente. Por ejemplo una investigación directa con una galería de exploración, se realizó con la construcción del túnel piloto del Túnel de La Línea en Colombia. La construcción de este túnel piloto determinó las condiciones reales para la construcción del Túnel Principal.



Fotografía 2.1. Mapeo geológico en galería de exploración.
Fuente del autor.

Las investigaciones directas con perforaciones, se complementaran con investigaciones indirectas por medio de métodos geofísicos que se explican en el numeral 2.3.2.



Fotografía 2.2. Perforación exploratoria.
Fuente del autor.

En algunos casos si es necesario, se utiliza registro por video dentro de la perforación exploratoria, que brinda la oportunidad de ver las paredes de la perforación para

determinar, la apertura real de las discontinuidades, la pérdida de agua de perforación, la pérdida de núcleo en cierta profundidad y otros.

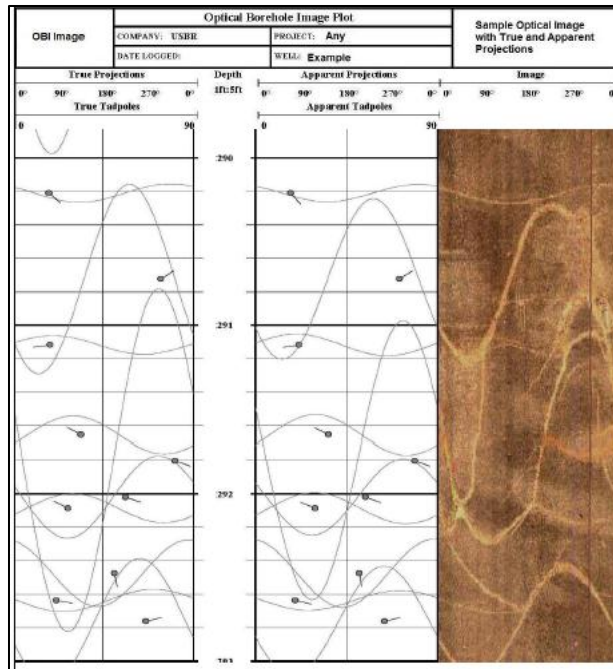


Figura 2.9. Imagen de video de perforación con interpretación de buzamiento real y aparente.

Adaptado de “*Design Standards No. 13 Embankment Dams*”, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

En caso de encontrar zonas permeables formadas por muchas fracturas finas, se debe diseñar una inyección de lechada con microcemento o puzolanas.

2.3.2 Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos son técnicas no destructivas y de investigación con gran cobertura, complementarias de los ensayos in situ y técnicas de investigación directa, como las perforaciones. Se emplean habitualmente para determinar espesores de los niveles de meteorización, posición del nivel freático, localización de cavidades, propiedades geomecánicas de materiales, localización de fallas o superficies de deslizamiento, localización de conductos preferenciales de agua y evolución de fenómenos dinámicos.

Dentro métodos sísmicos se encuentra la refracción y reflexión sísmica. Estos métodos miden el tiempo de propagación de las ondas elásticas, a través de un medio (en este

caso el macizo rocoso), entre el sitio donde se generaron las ondas y la llegada de las ondas en diferentes puntos de observación. La reflexión de las ondas es cuando estas golpean un material rígido y estas se devuelven con el mismo ángulo, mientras que la refracción es cuando las ondas golpean un material rígido y las ondas también viajan a través del mismo con un ángulo diferente o a diferente velocidad.

2.3.2.1 Líneas sísmicas

Estudian la propagación de ondas sísmicas en el terreno producidas artificialmente, realizando perfiles longitudinales instrumentados con sensores (geófonos), espaciados entre sí una distancia establecida y generalmente regular.

Las ondas se producen mediante el golpe de un martillo de 8 kg, liberando energía con el golpe, esta energía liberada a través del terreno llega a los sensores provocando una perturbación que se registra en un sismógrafo. La longitud de los perfiles suele ser de entre 25 y 100 m, la separación entre geófonos no puede exceder los 5 m, para obtener mayor detalle de la investigación. Los puntos de golpeo suelen ser, como mínimo, tres en cada perfil, situados al inicio, mitad y final de cada perfil. La medida de los tiempos de llegada de las ondas elásticas a los geófonos proporciona el valor de la velocidad de propagación y espesor de los distintos materiales atravesados.



Fotografía 2.3. Ubicación de perfil de la línea sísmica. (1)



Fotografía 2.4. Golpe con martillo. (1)



Fotografía 2.5. Toma de datos en el sitio. (1)



Fotografía 2.6. Línea sísmica en terrenos empinados (1)

(1)Fuente del autor.

Como se observa en la Fotografía 2.6, las líneas sísmicas permiten realizarse en condiciones difíciles del terreno, en zonas con alta vegetación, en zonas empinadas y en zonas de difícil acceso. Para trasladar un equipo de perforación a estas zonas, requeriría una gran logística de traslado de equipos, por medio de vías temporales construidas para llegar a los sitios o el traslado de equipos en helicóptero.

La interpretación de los registros de los georadares, se basa en la caracterización de la textura, amplitud, continuidad y terminación de las reflexiones. En la Figura 2.10, se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos.

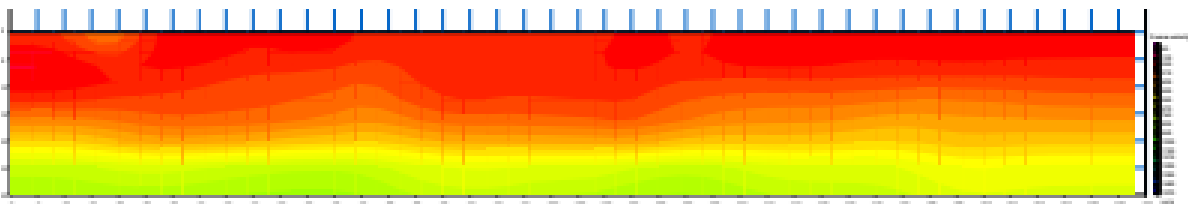


Figura 2.10. Perfil obtenido mediante el registro de los georadares.

Fuente del Autor.

Los valores de las velocidades de onda obtenidas del perfil de las líneas sísmicas se comparan con las velocidades sugeridas en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Velocidad de ondas P a través de diferencias materiales.

Material	Velocidad de ondas P (km/s)						
	0	1	2	3	4	5	6
Aire	■						
Agua		■					
Hielo			■				
Suelo		■					
Arenas			■				
Arcillas			■				
Esquistos			■				
Areniscas			■				
Calizas			■				
Dolomitas			■				
Sal				■			
Yeso				■			
Anhidrita				■			
Granito				■			
Gneiss				■			
Basalto				■			

Adaptado de "Ingeniería Geológica", Gonzales de Vallejo, L.I. (2004).

Lo ideal verificar la información resultante de la línea sísmica (refracción y/o reflexión), con la información de una perforación y correlacionar la información para caracterizar el macizo rocoso.

Dentro de los métodos indirectos de exploración existen los métodos geoelectrónicos, los cuales funcionan con la inducción de corriente eléctrica en el macizo rocoso, el flujo de la corriente eléctrica a través del macizo, establece una caída de potencial, descrita por la Ley de Ohm, entre dos puntos por donde circula la corriente eléctrica con una intensidad, cada estrato o material tiene una resistividad que se expresa en ohm por metro ($\Omega \cdot m$). La resistividad tiene valores comunes que se pueden clasificar según el tipo de mineral, rocas y sedimentos.

2.3.3 Ensayos in situ

Los ensayos in situ o pruebas en el sitio, sirven para resolver dudas de diseño del programa de inyección, se realizan pruebas de inyección en el macizo en un sector seleccionado previamente para determinar si el proceso de inyección es adecuado. Evaluando el mejor método de perforación en el macizo rocoso, verificando las mezclas o proporciones de las lechadas propuestas, probar varias técnicas de inyección, encontrar presiones seguras y adecuadas y comparar el rendimiento de los equipos.

Luego de realizar las pruebas de inyección en el sector seleccionado, se verifica por medio de pruebas de agua a presión, verificando la permeabilidad; se verifica con perforaciones con recobro, para observar la efectividad del tratamiento; se observa las perforaciones en el sector por medio de video, detallando si se sellaron o no de las discontinuidades.

Además de proporcionar información técnica, las pruebas en el sitio también pueden ayudar a obtener los datos reales del sitio, para preparar ofertas para licitar la ejecución del tratamiento.

Las pruebas en el sitio deben ser extensivas para ser útiles. Se deben hacer suficientes perforaciones para proporcionar un muestreo confiable. Esto normalmente requiere al menos un par de docenas de perforaciones, estas deben ser ubicadas cuidadosamente para ser representativas. El diseño de las perforaciones de las pruebas en el sitio debe ser similar a los diseños previstos para el tratamiento real en general.

Estas pruebas en el sitio son poco comunes y solo algunos clientes y diseñadores lo solicitan, los datos obtenidos de las pruebas en el sitio ayudan a mejorar los diseños y los procesos de inyección antes de la ejecución de los trabajos. En el caso contrario cuando no se realizan dichas pruebas por falta de presupuesto o no se contempla en el diseño, se utilizan los servicios de un especialista en inyecciones o una empresa consultora competente y con amplia experiencia para recomendar las características de la inyección y los procesos de inyección adecuados, según las condiciones geológicas del sitio.

Las pruebas en el sitio, requieren un criterio técnico para evaluar los resultados obtenidos, los cuales deben complementarse con los resultados durante ejecución del tratamiento con inyecciones para producir un buen trabajo de inyección. Teniendo en cuenta que las pruebas en el sitio solo es el comienzo de la optimización del diseño.

Un ejemplo de prueba en el sitio de un tratamiento previo con inyecciones, fue en la fundación de la Presa Cerrillos ubicada aproximadamente 4,0 km al norte del municipio de Ponce en Puerto Rico, sobre el Río Cerrillos, USACE (1983).

Esta presa fue construida por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos en el año de 1983, construida con un núcleo de arcilla y espaldares de enrocado, con una altura de 98,0 m y un ancho de 474,0 m.

Al no conocer de las condiciones de la fundación de la presa se realizó una prueba en el sitio con inyecciones, para obtener datos necesarios para el diseño, esta prueba consistió en una prueba a escala real con una configuración circular rodeando un pozo de prueba.

En este pozo se realizaron pruebas de permeabilidad antes, durante y después del tratamiento con inyecciones, para que obtuvieran información del proceso de inyección y verificar las presiones, mezclas, longitudes, separación de perforaciones, entre otros factores, proporcionando información de la permeabilidad y evaluando la eficacia del tratamiento después de terminarlo.

En esta misma prueba se instalaron una serie de piezómetros que median los niveles piezométricos existentes, antes, durante y después del tratamiento, para registrar los efectos del tratamiento en el macizo rocoso. En la Figura 2.11, se muestra la sección de prueba en el sitio a escala completa de configuración circular que rodea a un pozo de prueba. La secuencia del tratamiento inicia con la perforación e inyección de la línea 1

iniciando en la perforación 1 y termina en la perforación 30, luego se perfora e inyecta la línea 2 en el mismo orden que la anterior desde la perforación 1 hasta la perforación 18. Al terminar el tratamiento de las líneas 1 y 2, se inicia la perforación e inyección de la línea 3 desde la perforación 1 hasta la perforación 24.

Los resultados de esta prueba, ayudaron en el diseño del tratamiento requerido en sector de la presa Cerrillos.

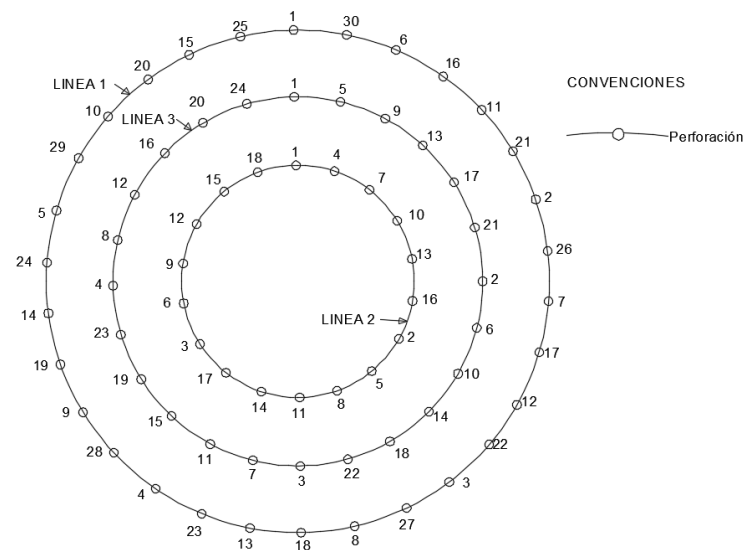


Figura 2.11. Distribución de perforaciones para inyección para una prueba en el sitio. Adoptado de “*Design Memorandum No. 4, Cerrillos Site Geology*”, USACE Jacksonville District. (1983).

Según el *U.S. Army Corps of Engineers* (2017), sugiere las siguientes pautas para la ejecución de pruebas en el sitio de sección circular:

- (1) Se debe realizar una prueba con un radio de aproximadamente 7,6 m (25 pies), dependiendo de las propiedades de la roca. Las perforaciones alrededor de la circunferencia deben separarse según lo planeado para la cortina de inyección final. Las perforaciones deben ser perforadas e inyectadas de acuerdo con los procedimientos de espaciado dividido normalmente seguidos en la inyección.
- (2) Se deben instalar al menos dos líneas de piezómetros a lo largo de las líneas que se irradian desde el pozo de prueba, que deben taladrarse en el centro del círculo. Las mejores ubicaciones para los piezómetros son, una dentro del círculo, una en la

cortina de inyección y dos fuera del círculo en cada línea. Se pueden requerir varias estaciones de medición por piezómetro.

- (3) La profundidad del pozo debe ser algo menor que la profundidad de las perforaciones de inyección. Las pruebas de bombeo deben hacerse antes y después del tratamiento. Los resultados obtenidos antes y después del tratamiento, expresan la eficacia del tratamiento.

Las pruebas en el sitio de sección circular a pesar de sus ventajas, son relativamente raras en la práctica por las siguientes razones:

- Se incorporan sitios de prueba en la alineación del programa de inyección del proyecto, para que el gasto de la sección de prueba contribuya directamente al trabajo terminado.
- Cuando el espacio de trabajo requerido para una sección circular no está disponible en el sitio.
- El pozo de bombeo y los piezómetros instalados cerca al sector de prueba, pueden dañarse por la inyección y pueden necesitar ser reemplazados para completar la evaluación.

2.3.4 Ensayos de permeabilidad

Según Houlsby A.C. (1976), existen dos tipos de pruebas de agua: las primeras son las para medir la permeabilidad del macizo rocoso para el diseño de las inyecciones y segundas para hacer pruebas antes de las inyecciones. Los propósitos de estas pruebas de agua son: (1) Para indicar la permeabilidad del macizo rocoso. Esta información inicial sirve para definir a una apropiada mezcla inicial de inyección, dar una idea aproximada de la toma de inyección durante el proceso de inyección, mostrar el efecto de la penetración de la lechada en el macizo rocoso y poder evaluar el cierre del proceso de inyección, verificar la eficiencia de las inyecciones primarias y las posteriores (secundarias, terciarias, etc.), si se encuentran grandes cambios entre ellas se puede requerir revisar el diseño del proceso de inyección. (2) Para mostrar la existencia de fugas superficiales, conexiones entre agujeros y otros posibles eventos. (3) Permitir que el personal de obra sin experiencia ensaye el proceso de inyección.

Los ensayos de permeabilidad en los macizos se evalúan in situ mediante ensayos de permeabilidad, siendo el ensayo Lugeon el más característico.

El ensayo Lugeon es ampliamente utilizado para estimar la conductividad hidráulica promedio del macizo rocoso. Se trata de un ensayo de inyección de agua a presión en perforaciones en macizos rocosos cuya permeabilidad proviene, generalmente, de la fracturación del macizo o de fisuración por disolución. La prueba, que deriva su nombre de Maurice Lugeon (1933), es una prueba de tipo de cabeza constante que tiene lugar en una parte aislada de una perforación. El agua a presión constante se inyecta en el macizo a través de un tubo ranurado delimitado por obturadores neumáticos (Figura 2.12).

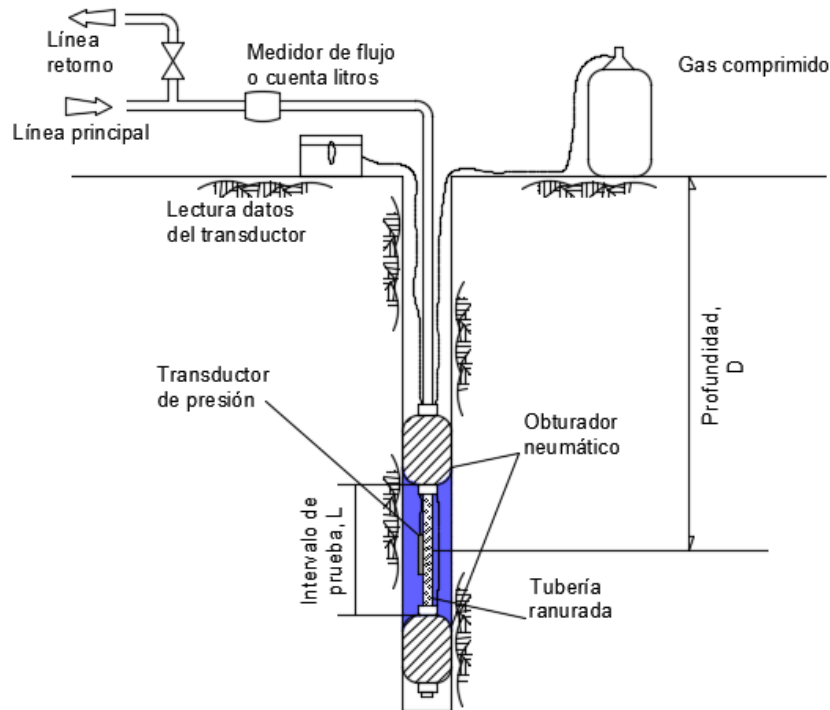


Figura 2.12. Configuración ensayo Lugeon.

Tomado de “*Lugeon test interpretation, revisited*”, Quiñones, Camilo. (2010).

Antes del comienzo de la prueba, se define una presión de prueba máxima (P_{MAX}). El P_{MAX} se elige de tal manera que no exceda el esfuerzo de confinamiento (σ_3), en la profundidad donde se realiza la prueba, evitando así el fracturamiento hidráulico. El valor de P_{MAX} , generalmente se establece utilizando la expresión $P_{m\acute{a}x} = D * \frac{1\text{ psi}}{pie}$, donde D es igual a la cobertura mínima del terreno a la etapa de la prueba.

La prueba se realiza en cinco etapas o tiempos, con una magnitud de presión de agua particular asociada a cada etapa. Una sola etapa consiste en mantener una presión de agua constante en el intervalo de prueba durante 10 minutos bombeando tanta agua como se requiera. La primera etapa se mantiene a baja presión de agua, aumentando la presión en cada etapa posterior hasta llegar a P_{MAX} .

Una vez que se alcanza el P_{MAX} , las presiones disminuyen siguiendo las mismas etapas de presión utilizadas en el ascenso, describiendo así un circuito de presión. La Tabla 2.9, se muestra las magnitudes de presión utilizadas habitualmente durante las cinco etapas de prueba.

Tabla 2.9. Magnitudes de presiones usadas en cada etapa de la prueba.

Etapas de prueba	Descripción	Presión
Primera etapa	Baja presión	0.50 P_{MAX}
Segunda etapa	Media presión	0.75 P_{MAX}
Tercera etapa	Máxima presión	P_{MAX}
Cuarta etapa	Media presión	0.75 P_{MAX}
Quinta etapa	Baja presión	0.50 P_{MAX}

Tomado de “*Lugeon test interpretation, revisited*”, Quiñones, Camilo. (2010).

Durante la ejecución de cada etapa, se registran los valores de presión de agua (P) y caudal (q) cada minuto. Posteriormente, los valores promedios para P y q se usan luego para calcular la conductividad hidráulica para cada etapa. La conductividad hidráulica se expresa en términos del valor de Lugeon, 1 Lugeon equivale a $1,3 \times 10^{-5}$ cm/s, que se define empíricamente como la conductividad hidráulica necesaria para lograr un caudal de 1 l/min o por metro de intervalo de prueba bajo una presión de agua de referencia igual a 1 MPa

$$Lugeon = \alpha * \frac{q}{L} * \frac{P_0}{P} \quad (2.1)$$

Como el valor de Lugeon se define en unidades de sistema internacional, se requiere introducir un factor adimensional α en la Ecuación (2.1), para adecuar el uso de diferentes sistemas de unidades. Este factor toma un valor de 1 cuando se usa el sistema de unidades Sistema Internacional (q [l/min], L [m] y P [MPa]) y un valor de 12.42 cuando se usa el sistema de unidades en inglés (q [gal/min], L [ft] y P [psi]). El término P_0 corresponde a una presión de referencia igual a 1MPa o 145 psi.

En la Tabla 2.10, se describe las condiciones asociadas con diferentes valores de Lugeon.

Tabla 2.10. Condición de las discontinuidades del macizo rocoso con diferentes valores de Lugeon.

Rango valores Lugeon	Clasificación	Conductividad hidráulica (cm/s)	Condición de las discontinuidades	Rango de precisión Lugeon
<1	Muy bajo	$< 1 \times 10^{-5}$	Muy cerradas	<1
1-5	Bajo	$1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	Cerradas	± 0
5-15	Moderado	$1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-4}$	Parcialmente abiertas	± 1
15-50	Medio	$1 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$	Abiertas	± 5
50-100	Alto	$1 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-3}$	Muy abiertas	± 10
>100	Muy alto	$> 1 \times 10^{-3}$	Espacios con vacíos	>100







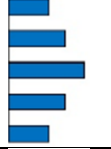
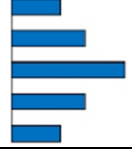
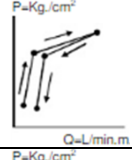

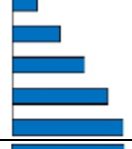



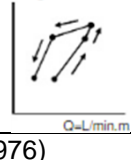
Tomado de "Lugeon test interpretation, revisited", Quiñones, Camilo. (2010).

Una vez que se ha calculado el valor de Lugeon para cada una de las cinco etapas de prueba, se selecciona un valor representativo de conductividad hidráulica en función de la tendencia observada a lo largo de la prueba.

2.4 FOTOINTERPRETACIÓN

Los estudios de fotografías aéreas, pueden revelar evidencia de patrones regionales de fracturas que podrían controlar el movimiento del agua subterránea en condiciones naturales y que podrían proporcionar vías preferenciales para el paso del agua en el macizo rocoso después de la construcción de las obras civiles, por ejemplo una presa. Esos estudios también pueden revelar tendencias geológicas estructurales o estratigráficas que pueden contribuir a la pérdida de agua del yacimiento a través del borde del yacimiento y debajo de la obra. Los estudios de fotointerpretación pueden ser particularmente útiles para revelar evidencia topográfica de la presencia de fallas o deslizamientos de tierra antiguos que deberían considerarse, no solo en el diseño del programa de inyección sino también de las obras civiles.

Tabla 2.11. Procedimiento de interpretación propuesto por Lugeon.

Tipo de flujo	Etapas	Presiones P_{MAX}	Patrón de Lugeon (Unidades calculadas cada 10 min)	Interpretación	Valor seleccionado	Curva de interpretación P vs. Q
Laminar	1 $0.5P_{MAX}$ 2 $0.75P_{MAX}$ 3 P_{MAX} 4 $0.75P_{MAX}$ 5 $0.5P_{MAX}$			Los 5 valores son aproximadamente iguales.	Se promedian los 5 valores.	
Turbulento	1 $0.5P_{MAX}$ 2 $0.75P_{MAX}$ 3 P_{MAX} 4 $0.75P_{MAX}$ 5 $0.5P_{MAX}$			El valor más bajo ocurre en la P_{MAX} .	Se usa el valor de la P_{MAX} .	
Dilatación	1 $0.5P_{MAX}$ 2 $0.75P_{MAX}$ 3 P_{MAX} 4 $0.75P_{MAX}$ 5 $0.5P_{MAX}$			El valor más alto ocurre en la P_{MAX} .	Se utilizan el valor mínimo y/o $0.5P_{MAX}$.	
Lavado	1 $0.5P_{MAX}$ 2 $0.75P_{MAX}$ 3 P_{MAX} 4 $0.75P_{MAX}$ 5 $0.5P_{MAX}$			Los valores aumentan, por cambios en el macizo rocoso.	Se utiliza el valor más alto.	
Llenado de vacíos o relleno	1 $0.5P_{MAX}$ 2 $0.75P_{MAX}$ 3 P_{MAX} 4 $0.75P_{MAX}$ 5 $0.5P_{MAX}$			Los valores disminuyen, por llenado gradual de vacíos.	Se utiliza el valor más bajo.	

Adaptado de "Routine interpretation of the Lugeon water-test", Houlby, A. C. (1976)

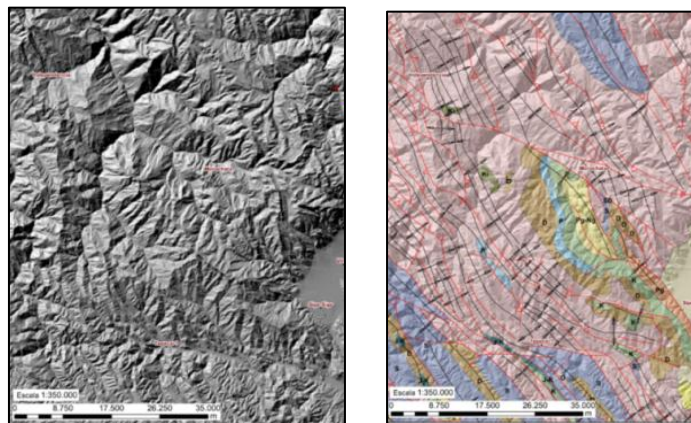


Figura 2.13. Modelo digital de elevación comparado con modelo geológico, cordillera de los andes.

Tomado de "Conceptos Básicos Geológicos" Duarte, Rafael, Diplomado Túneles en Suelo y Roca. (2015).

2.5 CELDAS GEOTÉCNICAS

Según Deere, D.U. y Patton, F.D (1971), véase Figura 2.14, las celdas geotécnicas sirven para identificar los niveles de meteorización en macizos rocosos, reconociendo las variaciones locales significativas para el análisis del programa de inyección.

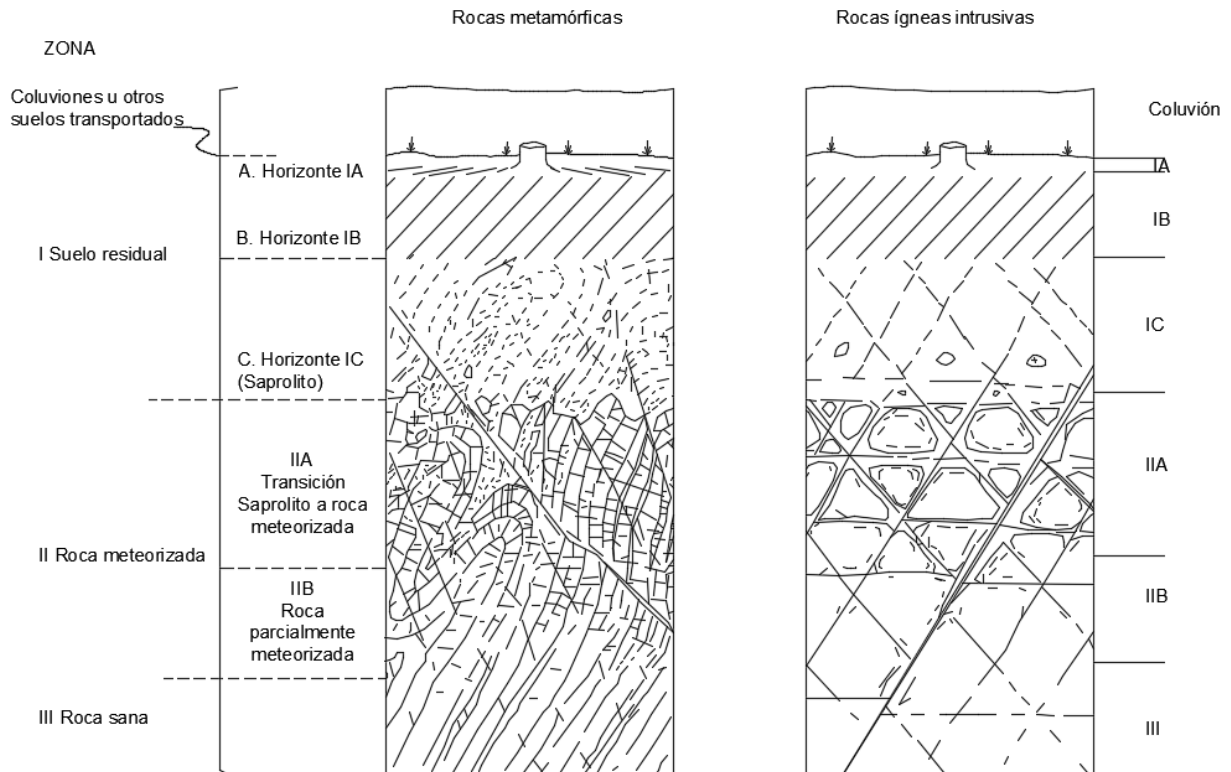


Figura 2.14. Perfil típico de meteorización para rocas metamórficas y rocas ígneas intrusivas.

Adaptado de Deere, D.U. y Patton, F.D. "Slope stability in residual soils". (1971).

Las celdas geotécnicas junto con las pruebas de agua a presión y la extracción de muestras de perforación, han demostrado, según *U.S. Army Corps of Engineers* (2017), ser útiles para comprender las condiciones de los macizos rocosos y guiar a un mejor programa de inyección.

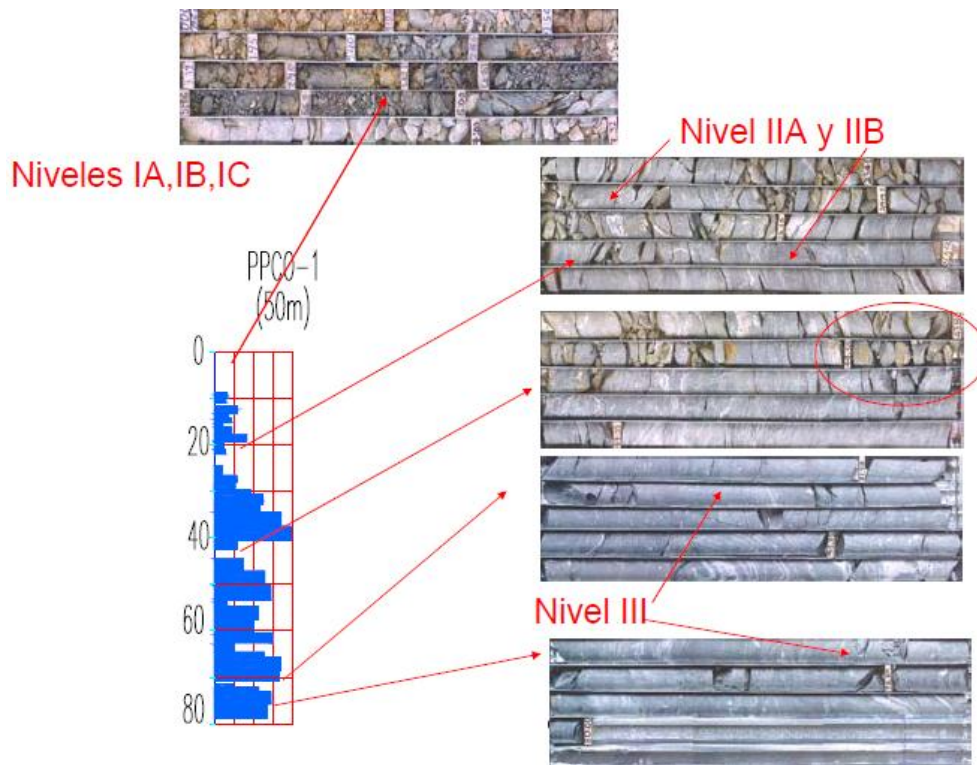


Figura 2.15. Identificación de niveles de meteorización.
Tomado Curso Mecánica de Rocas, Gutiérrez, Ramiro. (2016).

2.6 ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS

El conocimiento de la hidrogeología del macizo rocoso, tanto cualitativa como cuantitativamente, es fundamental y esencial para el proceso de inyección. Con los estudios hidrogeológicos se puede conocer los caudales de filtración, los caminos preferenciales de flujo y los gradientes hidráulicos, con el propósito de modificarlos con las inyecciones. Los modelos hidrogeológicos, proporcionan una herramienta para evaluar alternativas de diseño, optimizar las características de la lechada, predecir la efectividad de las inyecciones y diseñar programas de verificación.

Para realizar un estudio hidrogeológico hay que conocer el ciclo hidrológico del agua, ya que es el proceso físico que regula y determina la distribución del agua en la tierra. En este ciclo hidrológico el agua pasa por tres estados: líquido, gaseoso y sólido, en un ciclo permanente a través de tres medios o sistemas, la atmósfera, la superficie terrestre y por debajo de la superficie terrestre. Este último, se enfatiza el estudio de la hidrogeología, donde se revisa el almacenamiento y el movimiento del agua subterránea. El ciclo

hidrológico se define como el ciclo del agua entre los océanos, la atmosfera y la tierra (Véase Figura 2.16). El ciclo inicia en los océanos, ya que representa el 97.2% del agua sobre la superficie (según Fetter, 1988), donde el agua se evapora de la superficie del océano por la radiación solar, este vapor de agua sube a la atmosfera, que circula dependiendo de la temperatura y la velocidad del viento. Dependiendo de las condiciones atmosféricas, el vapor de agua se condensa y precipita a la superficie de la tierra en forma de lluvia, nieve, granizo o rocío.

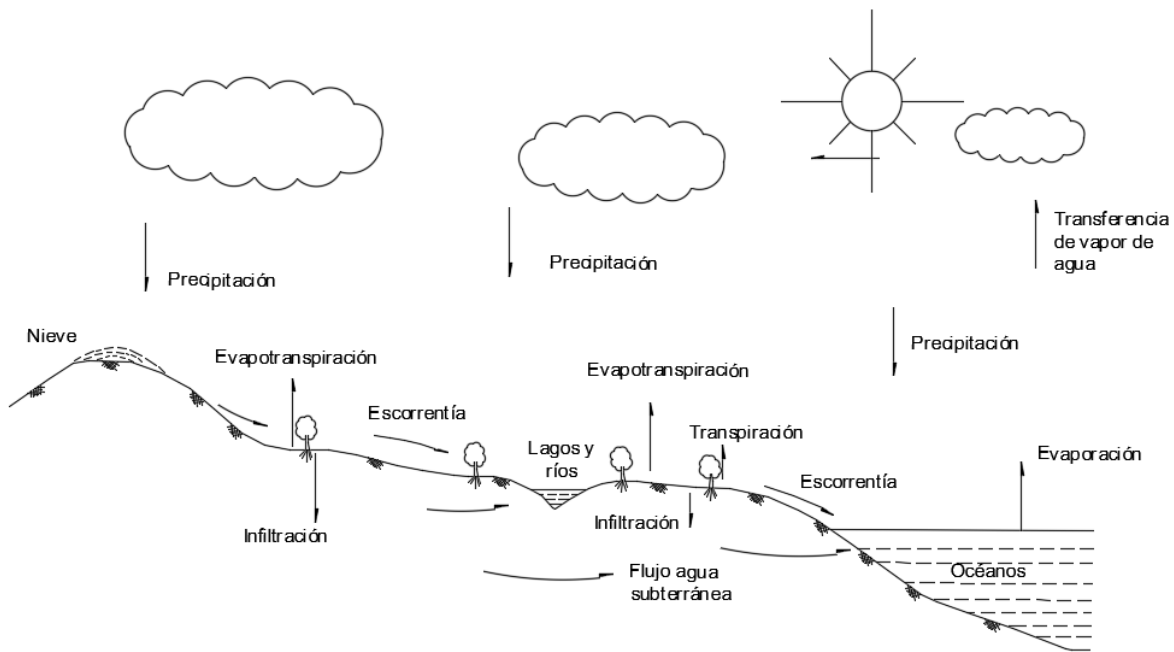


Figura 2.16. Diagrama esquemático del ciclo hidrológico.
Adaptado de “*Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*” de Singhal, B.B.S y Gupta, R.P (2010).

Parte de esta precipitación se escurre o drena como escorrentía en la superficie de la tierra y la otra parte se filtra hacia el suelo por infiltraciones, en sectores donde se generan humedades a pocas profundidades el vapor de agua vuelve a la superficie a través del proceso de la evapotranspiración. Otra parte del agua infiltrada llega a los flujos de agua subterránea y fluyen bajo la superficie con su gradiente hidráulico y descarga el agua a los ríos, lagos u océanos, donde inicia el ciclo hidrológico nuevamente con la evaporación del agua hacia la atmosfera.

Los sistemas de flujo bajo la superficie pueden ser bastante complejos, ya que estos están en función de los cambios en los niveles freáticos con el tiempo, de las unidades geológicas atravesadas, de los límites del medio y de otras variables. El flujo de agua bajo la superficie puede estar dentro del macizo rocoso, como a través de las discontinuidades, o en ambos casos.

Según el Servicio Geológico Colombiano (SGC), antes el INGEOMINAS, se considera agua subterránea aquella parte del agua del ciclo hidrológico que está bajo la superficie del terreno. Su ocurrencia se da en varios tipos de espacios abiertos en las rocas, tales como fisuras, intersticios entre granos, poros, grietas, fracturas, planos de foliación, planos de falla y diaclasas; debido a las diferencias de presión hidrostática, esta agua permanece en continuo movimiento. Se puede decir entonces que la existencia, el movimiento y el almacenamiento del agua subterránea están controlados por la secuencia estratigráfica, la litología, los espesores y la configuración estructural de los materiales que conforman la corteza terrestre. (Las aguas subterráneas: Un enfoque práctico. Vélez, María Victoria; Ortiz, Carolina y Vargas, María Consuelo. 2011).

El flujo del agua subterránea depende de las características geológicas, estas características dependen de la litología, textura y estructura que influyen en las características hidrogeológicas. Las características geológicas se clasifican en cuatro tipos según sus permeabilidades:

- **Acuífero:** Es una formación natural o una estructura geológica saturada que tiene buena conductividad hidráulica y permite que el agua circule con facilidad a través de ella. Un ejemplo de acuífero lo es un estrato de arenas y/o gravas y sectores de macizos rocosos con roca muy fracturada.
- **Acuitardo:** Es una formación que contiene agua apreciable pero el agua circula con dificultad a través de ella, ya que tiene una permeabilidad baja. Sin embargo, permite el intercambio de agua subterránea entre acuíferos adyacentes debido a fugas verticales. Un ejemplo de acuitardos son las arenas arcillosas, limos y macizos rocosos con fracturación moderada.

- Acuícludo: Es una formación que contiene agua apreciable y no permite que el agua circule a través de ella. Un ejemplo de acuícludos, son los estratos de arcillas, limos y estratos de lutitas sin fracturamiento.
- Acuífugo: En una formación que no almacena agua porque no permite que el agua circule a través de ella. Un ejemplo de acuífugos son las rocas de granito o esquisto inalterado y sin discontinuidades.

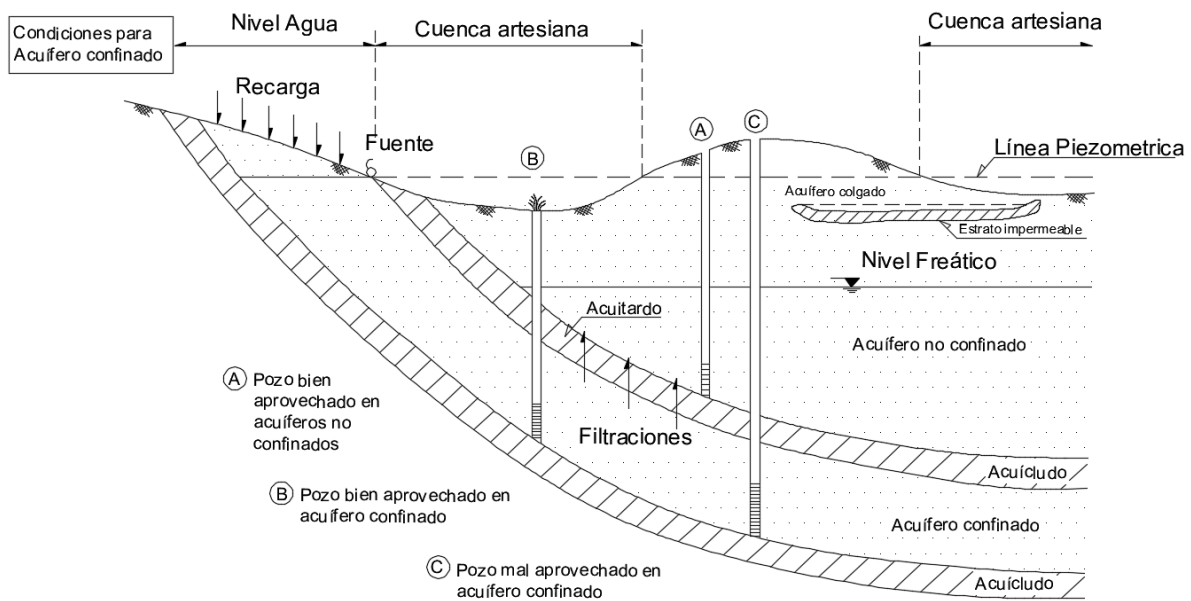


Figura 2.17. Tipos de acuíferos.

Adaptado de “*Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*” de Singhal, B.B.S y Gupta, R.P (2010).

Existen varios tipos de acuíferos que se clasifican de acuerdo a las condiciones de presión hidrostática a la que está sometida el agua almacenada en ellos, los cuales se describen a continuación:

- Acuíferos libres o no confinados: Son aquellos que presentan una superficie libre de agua la cual está a presión atmosférica. Dicha superficie se denomina nivel freático. Este nivel está relacionado directamente proporcional a las condiciones de precipitación en la superficie del terreno, por lo que es variable.
- Acuíferos confinados: Estos acuíferos de agua esta sometidos a una presión superior a la atmosférica. La superficie piezométrica de los acuíferos confinados están por

encima de los niveles freáticos, es decir por encima del estrato que lo confina. Estos se pueden presentar los llamados pozos de agua saltante, cuando las cabezas hidrostáticas es mayor a la superficie del terreno. Estos acuíferos se recargan en un sector aguas arriba de la cuenca. Los acuíferos confinados se forman en condiciones geológicas como: formaciones estratificadas en pliegues sinclinales, formando sistemas de alta presión en la parte más baja del pliegue; en fracturas y discontinuidades de rocas ígneas y metamórficas pueden tener condiciones de confinamiento; y en cavidades u oquedades de disolución de la roca, como el caso de las calizas donde puede haber confinamiento del agua en estas oquedades.

- Acuíferos semiconfinados: Son acuíferos a presión pero alguno de sus límites o estratos confinantes son semipermeables (Acuitardo). Esta situación permite que haya flujo entre los acuíferos que se encuentran separados por el acuitardo, creando un flujo por la diferencia de niveles piezométricos entre estos.
- Acuífero colgado: Es un acuífero separado del acuífero original por un estrato de arcilla localizada o cualquier estrato impermeable. Es espesor y extensión de los acuíferos colgados dependen de la forma y tamaño del estrato impermeable.

2.6.1 Métodos y etapas de investigación hidrogeológica

Según Fetter, C. (1988), la investigación de la hidrogeología del sector se debe realizar en etapas. Como se muestra en la Figura 2.18. Primero, se debe realizar una búsqueda de los datos existentes disponibles del sector como lo son informes publicados o no publicados de las entidades del estado, tesis académicas, artículos entre otros. Se puede obtener información adicional de propietarios de terrenos de la zona y empresas.

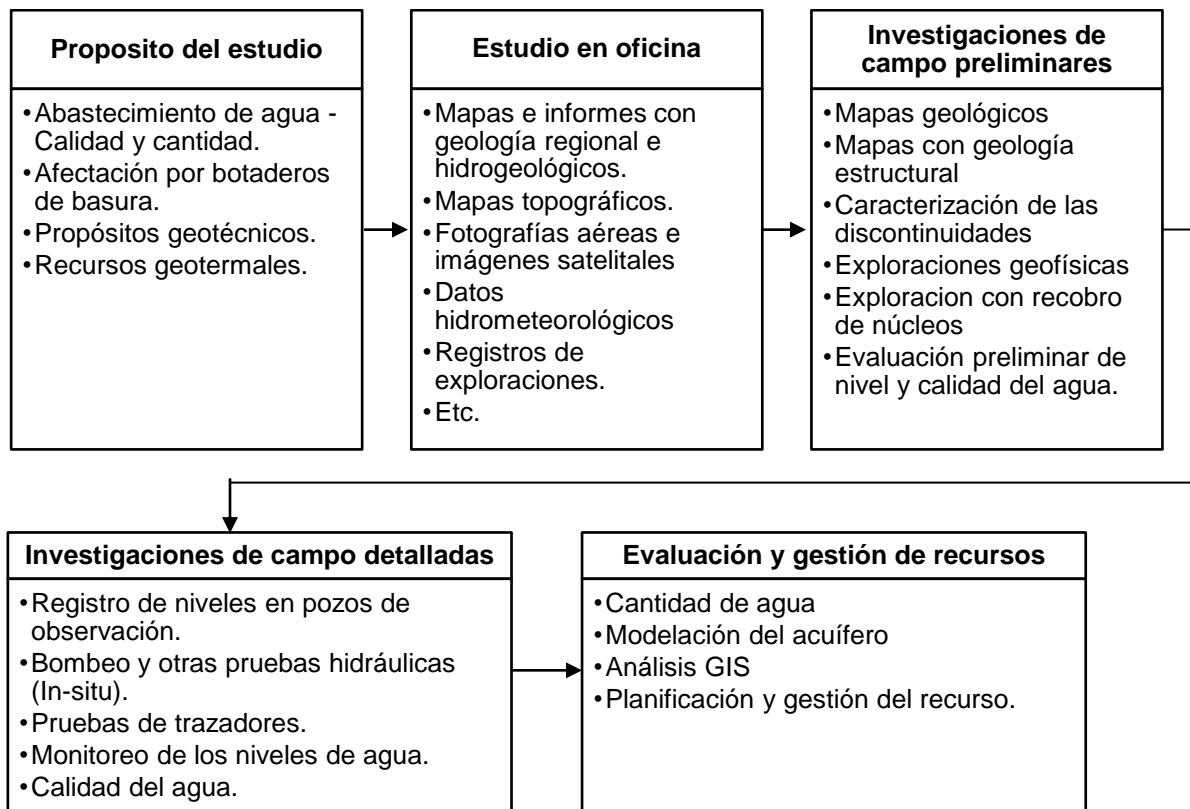


Figura 2.18. Etapas de la exploración hidrogeológica.
Adaptado de “*Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*” de Singhal, B.B.S y Gupta, R.P (2010).

Para la investigación hidrogeología es necesario obtener la siguiente información:

1. Datos del tipo de suelo en superficie, tipos de roca y sus características físicas. Aspectos de geología estructural es importante conocer.
2. Características geomorfológicas del sector y del drenaje, para identificarlas se deben usar imágenes satelitales, fotografías aéreas y mapas topográficos.
3. Registros de perforaciones realizadas en el sector.
4. Registros hidrometeorológicos sobre las precipitaciones, evotranspiración, escorrentía, etc.
5. Registros de los niveles de agua y su variación estacional.
6. Características hidráulicas del macizo, como es la conductividad hidráulica, transmisividad, almacenamiento entre otros.
7. Calidad del agua.
8. Bombeo de agua subterránea.

Todos estos datos deben compilarse e interpretar. Cuando no se tenga la información necesaria para realizar un estudio hidrogeológico del sector, se debe ejecutar un plan de investigaciones según los propósitos del estudio.

El Ingeominas, ahora el Servicio Geológico Colombiano (SGC), definió una metodología general para la exploración y evaluación de aguas subterráneas, Ingeominas (2004). Para realizar una exploración a nivel regional de las aguas subterráneas, que comprende: localización del sitio, definición de las dimensiones del sector a estudiar y caracterización de las zonas potenciales o favorables donde se acumulen las aguas subterráneas, se deben seguir lineamientos que siguen los estándares internacionales los cuales se cumplen en las siguientes etapas:

2.6.1.1 Etapa 1: Estudios hidrogeológicos de reconocimientos a escalas iguales o menores a 1:500.000

Son los estudios iniciales (conceptuales), donde se revisan las regiones, unidades hidrogeológicas o un país entero. Donde se identifican las estructuras geológicas, unidades geomorfológicas y unidades hidrogeológicas generales por medio de la compilación de información existente o secundaria. El objetivo de esta etapa inicial es orientar los estudios de la siguiente etapa, contribuyendo con los planes de exploración a escalas regionales y semiregionales.

2.6.1.2 Etapa 2: Estudios de exploración y evaluación hidrogeológica regional de escalas entre 1:250.000 y 1:50.000

En esta etapa, se identifican, delimitan y se caracterizan las estructuras hidrogeológicas y se estiman las cantidades de agua subterránea almacenadas. Permite evaluar y caracterizar el origen, distribución y régimen de las aguas subterráneas en las estructuras geológicas definidas en la etapa anterior.

Los estudios de exploración de hidrogeológica regional deben seguir un orden secuencial, tal como recomienda el Ingeominas (2004), ya que es fundamental y necesario para las siguientes etapas, como se muestra en la Figura 2.19.

2.6.1.3 Etapa 3: Estudios de exploración hidrogeológica de detalle a escala igual o mayor de 1:25.000

En esta etapa permite tener un conocimiento detallado del sector del estudio con el fin de localizar y diseñar obras de captación o resolver problemas específicos de construcción

de obras civiles, minería, etc. Estos estudios son locales, que requiere de levantamientos geológicos precisos de campo, evaluaciones geofísicas y la toma sistemática de muestras de roca, suelo y agua para llevarlos a analizar en pruebas de laboratorio.

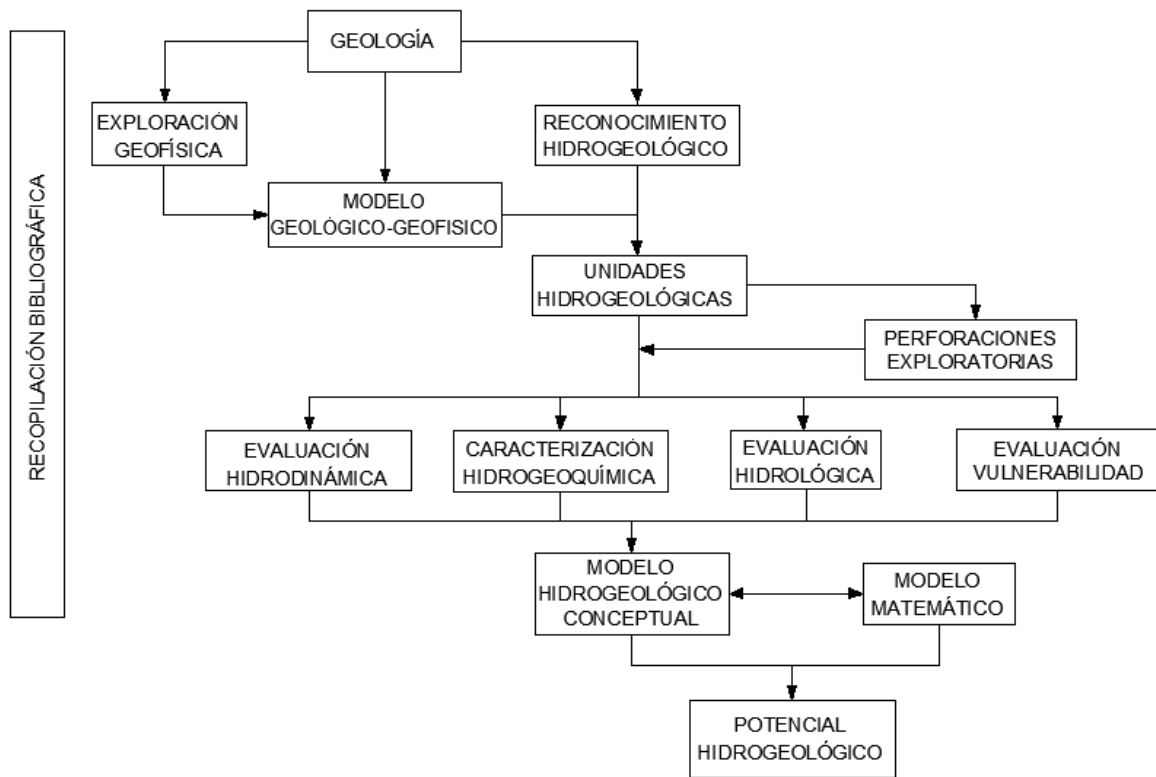


Figura 2.19. Diagrama de flujo metodológico de la exploración hidrogeológica regional. Adaptado de “Programa de exploración de aguas subterráneas” de Ingeominas (2004).

De las anteriores etapas resultan mapas hidrogeológicos que son una herramienta para visualizar y entender las condiciones hidrogeológicas regionales y tener información sobre el agua subterránea.

Tabla 2.12. Escala de los mapas hidrogeológicos según la etapa de estudio

Nivel de evaluación	Escala de trabajo	Tipo de mapa
Reconocimiento preliminar	Mayor a 1:500.000	Orientativo
Reconocimiento	Nivel estado / provincial 1:100.000 a 1:500.000 (datos 10 km)	
	Investigación semidetallada	Nivel urbano / municipal 1:25.000 a 1:50.000 (datos 200–500 m)
Investigación detallada		Local 1:10.000 a 1:5.000 (datos 50–100 m)

Adaptado de “Las aguas subterráneas: Un enfoque práctico”, Vélez, María Victoria; Ortiz, Carolina y Vargas, María Consuelo (2011).

Adicionalmente a lo descrito anteriormente, para obras civiles como presas y obras subterráneas, los estudios hidrogeológicos deben incluir las siguientes actividades:

- Medición del volumen del flujo en la superficie dentro del área de la obra en el tiempo, para el caso de presas se debe medir el volumen aguas abajo del sitio de la presa propuesta. Para revisar la potencial degradación del macizo rocoso en estos sectores.
- Se pueden inyectar trazadores (colorantes) en las perforaciones exploratorias en el sitio de la obra, para revisar donde fluye el agua subterránea, observando si los manantiales cercanos al sitio de obra contienen el trazador inyectado.
- Realización de Pruebas de permeabilidad de Lugeon en el sitio de la obra.

Según la ANLA (2017), los estudios hidrogeológicos para la construcción de túneles exigen cumplir los Términos de Referencia en la Resolución 0111 de enero 2015:

- *Hidrología, balance hídrico y recarga de las unidades hidrogeológicas presentes. Deben emplearse métodos adecuados para determinar la recarga, sustentando su selección. Debe entregarse un análisis de los procesos de recarga que se presentan en los acuíferos en estudio y su cuantificación.*
- *Análisis del riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas.*
- *Modelo hidrogeológico conceptual. Con base en el análisis e integración de la información anterior, debe definirse un modelo hidrogeológico conceptual de los acuíferos presentes en el área, que incluya los siguientes aspectos: delimitación de las zonas de recarga, tránsito y descarga, direcciones de flujo; conexiones*

hidráulicas entre las diferentes unidades acuíferos y con las fuentes superficiales definición de zonas con potencial de aprovechamiento. La caracterización hidrogeológica de las unidades presentes debe realizarse conforme a la Leyenda Hidrogeológica Internacional, o a las convenciones adoptadas por el Servicio Geológico Colombiano.

- *Modelo numérico del flujo de las aguas subterráneas. Debe desarrollarse un modelo numérico, empleando el software adecuado para las características específicas de acuíferos presentes en la zona y sustentando su selección. Este modelo debe representar el modelo hidrogeológico conceptual antes definido y deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:*
 - *Definición del área de interés para modelar.*
 - *Definición de fronteras hidráulicas apropiadas.*
 - *Datos de entrada del modelo (niveles históricos, parámetros hidráulicos de las diferentes capas a modelar, direcciones de flujo, conexiones hidráulicas).*
 - *Discretización horizontal y vertical del área de interés y definición apropiada del número de capas matemáticas, utilizando análisis de escenarios con información secundaria.*
 - *Realización de la etapa de montaje, y de contar con la información necesaria, la de calibración.*

El modelo numérico debe permitir la simulación espacial y temporal del comportamiento del recurso hídrico subterránea en donde se determine la posición actual del nivel piezométrico (estado estacionario) y cómo puede variar este nivel con el desarrollo del proyecto (construcción del túnel).

Si la información disponible lo permite, se podrán utilizar modelos adicionales y comparativos con base en experiencias de proyectos similares desarrollados en el país.

La información cartográfica producto de cada una de las temáticas (inventario, modelo geológico, modelo hidrogeológico conceptual, mapa hidrogeológico, modelo geoquímico, mapas de isoresistividades, modelo matemático de simulación hidrogeológica, diseño de la red de monitoreo, análisis geoquímico y de la

caracterización de las aguas subterráneas) y los datos espaciales deben entregarse de acuerdo con los criterios incluidos en la Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales expedida mediante Resolución 1503 de 4 de agosto de 2010, modificada para el componente geográfico mediante la Resolución 1415 de 17 de agosto de 2012, o aquellas normas que las modifiquen, sustituyan o deroguen.

La información cartográfica (planta y perfiles) para el área de influencia del componente hidrogeológico debe presentarse a escala 1: 10.000 o más detallada, localizando puntos de agua, tipo de acuífero, dirección de flujo del agua subterránea y zonas de recarga y descarga. El mapa debe ir acompañado de perfiles y un bloque – diagrama que represente el modelo hidrogeológico conceptual del sitio.

2.7 PERMEABILIDAD DEL MACIZO

Conocer la permeabilidad del macizo es esencial para diseñar los programas de inyección e identificar el propósito del tratamiento del macizo (reducir filtraciones, mejorar las propiedades físicas del macizo y/o reducir gradientes hidráulicos).

La permeabilidad de un macizo se describe en cuánta filtración puede pasar a través de él, bajo una presión estándar. Sin embargo, las filtraciones se desarrollan en varias direcciones, que dependen de la presión y la profundidad y dependen de la longitud y ancho de los pasos preferenciales del flujo. En la práctica, se define la permeabilidad como un tipo de unidad de velocidad que mide la infiltración total a través de una sección transversal de macizo, se calcula multiplicando velocidad del flujo bajo una presión estándar por el área de la sección transversal.

Para los trabajos de inyección, la prueba de permeabilidad utilizada es el tipo radial, donde se bombea agua dentro de una perforación de prueba en intervalos de tiempo y presiones establecidas, la prueba fue establecida por Lugeon en 1933 (véase numeral 2.3.4) y la unidad de permeabilidad relacionada con la prueba radial que lleva su nombre.

Las evaluaciones de permeabilidad para los trabajos de inyección se dividen en tres grupos: (1) aquellos que se realizan en etapa de exploración (etapa de diseño); (2)

aquellos que se realizan durante el tratamiento de inyección, antes de inyectar en el sitio; (3) y los que se realizan para verificación del tratamiento de inyección.

Las pruebas de permeabilidad (pruebas de conductividad hidráulica) que se realizan durante la exploración, sirven para evaluar la profundidad adecuada de inyección; las pruebas realizadas durante la ejecución de las inyecciones sirven para evaluar y/o optimizar el diseño del programa de inyección; y las pruebas realizadas después de la ejecución del tratamiento sirven para verificar la efectividad de las inyecciones.

2.8 HISTORIA DEL USO DE INYECCIONES A NIVEL MUNDIAL

La historia del uso de tratamientos con inyecciones no se limita a la inyección en macizos rocosos, sino a otros campos que fueron mejorando conforme se realizaban trabajos en condiciones desafiantes que requerían ingenio de quien las desarrollara, estas situaciones han contribuido en el desarrollo del proceso de tratamiento con inyecciones.

Los inicios de la inyección o en inglés "*grouting*", inicia como la mayor parte de los desarrollos de los materiales usados en la ingeniería civil, en el imperio romano, usada para el refuerzo de muros, puentes, acueductos y otras obras construidas. El uso de tratamientos para mejorar las condiciones del sitio de construcción se dato nuevamente hasta el siglo XVII en la construcción de iglesias, utilizando mezclas de cal caliente, que se endurece rápidamente y obtiene alta resistencia.

A mediados del siglo XIX, se utilizaron inyecciones de mezcla de lodo y cal para llenar los espacios detrás de los revestimientos de túneles mineros, así mismo, en Europa se utilizaron inyecciones para la reparación de obras civiles como las esclusas de puertos en Francia, inyectando una lechada de arcilla en la base de las esclusas para prevenir las fugas de agua.

Los primeros trabajos de inyección registrados en grandes obras, fue en el dique seco naval de Rochefort, Francia en 1818, donde se requirieron tratamientos para reducir las fugas considerables de agua, allí se utilizaron inyecciones de lechada con puzolanas, estos trabajos no se terminaron pero se observó que este tipo de tratamiento era efectivo para reducir fugas de agua en diques.

La inyección de lechada se utilizó para la reparación de mampostería en 1837, lo cual necesito que dichos trabajos desarrollaran bombas de lechada por parte de los Contratistas para realizar trabajos más eficientes.

Al final del siglo XIX, se realizaron los primeros desarrollos de los tratamientos de macizos rocosos para fundaciones de presas como fue:

- Perforaciones con brocas diamantadas en el sitio de presa.
- *Packers* para aislar las etapas de inyección, estos *packers* o empaques consistían en llenar bolsas con semillas que se hinchaban cuando estas se mojaban.
- Se utilizaron presiones de inyección de 7 a 14 bar.
- Utilización de pruebas de agua luego del tratamiento con inyecciones, este fue el primer uso de pruebas de agua en el sitio como medida de verificación del tratamiento.

El desarrollo de las inyecciones inicio a principios del siglo XX, cuando la cantidad de presas construidas incremento rápidamente (véase Figura 2.20) y consecuentemente una gran cantidad de estas fallaban cuando estaban apoyadas en macizos rocosos de permeabilidad alta, lo cual requería diseñar un tratamiento que permitiera reducir la permeabilidad del macizo rocoso y no permitiera las fugas de agua y consecuentemente las fallas de las presas.

Los primeros trabajos de inyección realizados para tratamiento de macizos rocosos para presas, se realizaban a prueba y error por parte de los Contratistas, los cuales perforaban miles de metros en las fundaciones de las presas sin especificar un orden sistematizado, luego se probaba inyectando mezclas de lechada con relaciones de agua cemento (A:C) desde 1.5:1.0 a 15:1.0, los mejores tratamientos se realizaban con relaciones bajas, pero estas no se utilizaban porque fraguaban rápidamente en el sistema de inyección (mezcladora, bomba y mangueras), por lo que en la mayoría de tratamientos se utilizaron lechadas con relaciones de agua: cemento altas por su alta manejabilidad. Igualmente, el proceso de inyección en el macizo rocoso no era continuo y por lo tanto no se tenía efectividad en el tratamiento.

La mayoría de los tratamientos de inyección realizados en las fundaciones de estas presas construidas a principios del siglo XX, actualmente se están reforzado con nuevas inyecciones, debido a la falta de efectividad de estos trabajos y por las lechadas usadas

en aquella época, las cuales tenían relaciones altas de agua cemento y por lo tanto una baja resistencia a la compresión de la lechada.

En aquella época no se tenía claro la cantidad de lechada necesaria para realizar un adecuado tratamiento del macizo rocoso, lo cual generaba discusiones entre clientes, consultores y contratistas. Según Houlsby (1990), una presa cimentada en piedras calizas, se usaron miles de toneladas de mezcla a base cemento para tratar el macizo, pero esta cantidad no fue suficiente para tratarlo, debido a las grandes cavidades cavernosas existentes bajo la cimentación de la presa, esto se comprobó durante el primer llenado del embalse, donde se presentaron grandes flujos de agua. Para evitar dichos inconvenientes fue necesario realizar un estudio detallado de la geología del sector. Los flujos se disminuyeron con la inyección de mezclas asfálticas en caliente.

En 1930 se elaboraron las primeras especificaciones técnicas en los tratamientos, durante el diseño y construcción de la presa Hoover, allí se utilizó un enfoque sistemático del tratamiento del macizo rocoso. En esa misma década Maurice Lugeon compartió su criterio de permeabilidad para decidir si era necesario los tratamientos en la fundación para presas.

En la década los 50's la mayor parte del desarrollo de las inyecciones era forma empírica y de las experiencias de diferentes contratistas y consultores. Para sistematizar el proceso de inyección el *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) realizó una serie de pruebas para estudiar el comportamiento de la lechada de cemento en los macizos rocosos.

El crecimiento exponencial de presas construidas en los EE.UU (Figura 2.20) entre 1950 y 2000, llevo al estudio detallado de los tratamientos de macizos rocoso con inyecciones.

La mayor parte de los trabajos de inyección en macizos rocosos en EE. UU, en fundaciones para presas, estaban bajo el control de grandes agencias del gobierno: como el *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE). Estas agencias generalmente diseñaron y supervisaron las operaciones de inyección, hasta el punto de que los contratistas básicamente solo proporcionaban la mano de obra, equipos y materiales, realizando un trabajo según las instrucciones dadas.

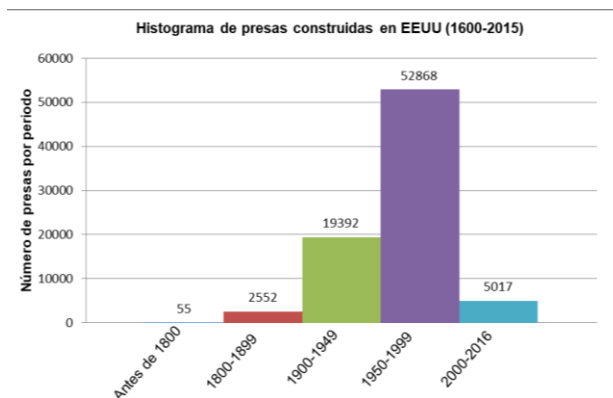


Figura 2.20. Histograma de presas construidas en los EE.UU (1600-2015).

Tomado de Inventario nacional de presas, CorpsMAP, <http://nid.usace.army.mil>. (2015).

Entre 1960 y 1980, se compartieron investigaciones, se celebraron simposios, conferencias y se abrió un curso corto anual (Universidad de Missouri), donde se presentaron algunas investigaciones avanzadas de tratamientos con inyecciones y casos históricos, lo que amplió el conocimiento de la tecnología de inyección.

En Colombia se construyeron 41 presas para la construcción de hidroeléctricas, proyectos de abastimimiento de agua y para distritos de riego, las primeras presas se construyeron en la década de los 30's ICOLD (2019), en la Figura 2.21 se muestra el histograma de presas construidas en Colombia desde 1930 hasta la actualidad.

Comparando los histogramas de construcción de presas en EEUU y Colombia, se observa que en el periodo de 1950-1999 es el periodo donde se construyeron el mayor número de presas en los dos países, debido a los avances tecnológicos de construcción. También se observa la diferencia abismal de número de presas construidas entre los dos países. Sin embargo, en el periodo de 1950-1999 en Colombia se construyó la presa más alta en cara de concreto del mundo, la presa más alta de enrocado y la presa más alta en concreto compactado con rodillo.

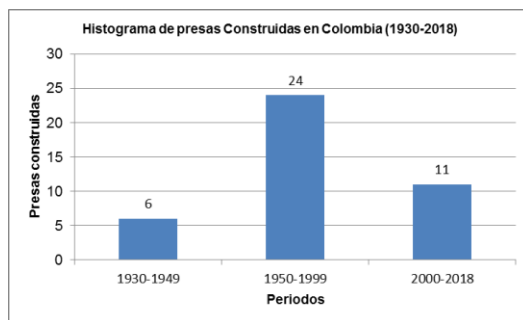


Figura 2.21. Histograma de presas construidas en Colombia (1930-2018). Tomado de ICOLD, https://www.icold-cigb.org/gb/world_register/data_search.asp. (2019).

En la década de los 90's a la actualidad, en países europeos y más recientemente en Japón, se desarrollaron investigaciones del tratamiento con inyecciones a presión, haciendo extensivo los estudios de mezclas de lechada de cemento y químicas. A diferencia de la práctica estadounidense, gran parte del trabajo europeo se realiza sobre una base de diseño y construcción, y son comunes los grandes proyectos donde se ha ido generando experiencia en este campo. Esto ha resultado que grandes empresas multidisciplinarias posean la capacidad de investigación y desarrollo, diseño y construcción, así como también la capacidad de diseñar, construir y mantener los equipos especializados usados para las inyecciones. La capacidad de integrar las diversas disciplinas, combinada con una sólida capacidad financiera, ha dado lugar a muchos avances técnicos en el tema de inyecciones y otros.

Al final del siglo XX, se amplió en EE.UU, los tratamientos de macizos rocosos en fundaciones para presas con aplicaciones técnicas y tecnológicas con las e ideas y conceptos aportados por Wallace Hayward Baker, Kenneth Weaver, Donald Bruce, DU Deere, CA Houlsby, James Warner y otros autores.

2.9 CONCEPTOS SOBRE INYECCIONES PARA EL TRATAMIENTO DE MACIZOS ROCOSOS

Para los diferentes tipos de roca con baja permeabilidad primaria, pero altamente fracturadas, es importante el uso de las inyecciones en las discontinuidades.

El tipo de característica estructural (por ejemplo, falla, pliegue o unión) determinará en el tipo y la extensión del tratamiento de inyección. El espaciado y la naturaleza de las discontinuidades (por ejemplo, abierto, cerrado, meteorizado o disuelto) influyen en el tipo

de tratamiento de inyección seleccionado, como la inyección de consolidación y las cortinas de inyección.

La selección de una cortina de inyección o una cortina de inyección múltiple y el espaciado de las perforaciones de inyección también se ven afectados.

La orientación (buzamiento y dirección de buzamiento) de estas características en relación con una estructura influye en el ángulo y la dirección planificados de las perforaciones de inyección y las perforaciones para drenaje.

Las variaciones espaciales en la permeabilidad de las fracturas afectan la profundidad de una cortina de inyección. Las perforaciones de inyección deben intersectar todas las discontinuidades, y cada discontinuidad inclinada o vertical idealmente debe ser intersecada por varias perforaciones a diferentes profundidades. Las fallas pueden presentarse rellenas e impermeables, formando así una barrera, o pueden estar abiertas y transportar agua subterránea. Las diaclasas pueden estar llenas o abiertas, pueden haber sido erosionadas o tener superficies desgastadas, y pueden cruzarse y conectarse en un área amplia. La condición de las discontinuidades afectará la perforación, pruebas de permeabilidad y el proceso de inyección.

2.10 TRATAMIENTO CON INYECCIONES RELACIONADOS CON MECANISMOS DE FALLA

2.10.1 En rocas sedimentarias

2.10.1.1 Lutitas y lodolitas

Las lutitas y lodolitas son de resistencia baja y poca durabilidad, en este tipo de rocas no es usual encontrar fracturas abiertas y continuas. En este tipo de rocas no se pueden tener presiones de inyección, ya que una presión muy alta tiende a separar las capas delgadas de la lutita. Así mismo, se debe tener en cuenta el efecto de rebote elástico en una excavación superficial y subterránea, lo que puede crear discontinuidades abiertas en los estratos de arenisca ligados a los estratos de lutita, creando un sector permeable, lo cual requiere un programa de inyección adecuado para tratar dicho sector.

2.10.1.2 Areniscas

El mayor riesgo de las areniscas poco cementadas es la erosión interna (tubificación), como se observa en la Fotografía 2.7. Los tratamientos con inyecciones permiten reducir las velocidades de filtración dentro del macizo rocoso para evitar velocidades erosivas.



Fotografía 2.7. Erosión en areniscas por efecto de las velocidades de filtración en el macizo.

Fuente del autor.

Cuando se diseña el proceso programa de inyección, se debe tener claro el propósito del tratamiento con inyecciones, si es para llenar discontinuidades del macizo o es para mejorar las propiedades físicas de este.

Si el propósito es llenar discontinuidades, la mezcla de lechada utilizada para la inyección debe tener características tales para cementar la arenisca y evitar que las discontinuidades se llenen de arena suelta. Estos rellenos de arena suelta en las discontinuidades son pasos preferenciales del flujo de agua, aumentando la permeabilidad del macizo rocoso. Según Burwell y Moneymaker (1950), los trabajos de tratamientos con inyecciones en discontinuidades rellenas por arena suelta son difíciles de inyectar con éxito, por lo que requiere un estudio detallado del programa de inyección para lograr un tratamiento efectivo.

Según las experiencias del autor, en la inyección en areniscas para el caso de la CH El Quimbo, donde se presentaron discontinuidades con rellenos arcillosos, el proceso de inyección fue complejo en el inicio de las actividades. Sin embargo, con el análisis de esta

información, se mejoraron las mezclas utilizadas, el método de inyección y el proceso constructivo, durante las actividades de inyección, obteniendo un tratamiento y cierre efectivo.

En el caso de mejorar las propiedades físicas (para evitar una excesiva presión de poros), se deben utilizar lechadas con microcemento y/o puzolanas combinado de prácticas adecuadas de inyección.

Los diseños de mezclas de lechada para areniscas, deben tener en cuenta la absorción del agua en la arenisca y evitar la obstrucción de la lechada entre las discontinuidades antes de que la lechada haya penetrado a una distancia efectiva.

Independientemente del tipo de mezclas utilizadas y procesos de inyección en areniscas, se deben tomar muchas medidas posteriores al tratamiento, como lo son drenajes e inyecciones adicionales.

2.10.1.3 Intercalaciones de areniscas y lutitas

Durante la investigación geotécnica y el estudio geológico se debe identificar las intercalaciones de capas de arenisca y las capas de lutita, para diseñar un adecuado programa de inyección, por las dificultades de inyectar el contacto arenisca–lutita, si la lutita es de resistencia baja. Igualmente, si los estratos de arenisca son inclinados se debe diseñar mezclas y procesos de inyección adecuados, para que la lechada no se extienda o “viaje” dentro del macizo más allá de lo requerido.

2.10.1.4 Conglomerados

En conglomerados con matrices bien cementadas, las filtraciones de agua se limitan a las discontinuidades y fracturas del macizo, por lo que el programa de inyección es similar al de las areniscas.

Sin embargo, los conglomerados con matrices poco cementadas, tienden a tener mayor permeabilidad en la matriz y el tratamiento con inyecciones debe mejorar las propiedades físicas impregnándose en la matriz.

2.10.1.5 Cársticidad

Los ambientes cársticos están compuestos por montañas muy suaves o también de montañas muy altas (escarpadas), pero con huecos (zonas cársticas), generalmente son

rocas porosas y muy permeables. Son ambientes donde predominan rocas solubles “karst”, por lo general rocas calizas.

1. Rocas calizas y dolomitas

Las rocas calizas reaccionan con la presencia de agua, lo cual después de un tiempo se forman cavernas (cavidades), depresiones y otras formas en el macizo rocoso, por disolución parcial de la roca. Esta disolución ocurre en mayor proporción en zonas de estructuras como fallas y fracturas, el cual produce que el drenaje superficial sea alterado.

Las cavernas u oquedades creadas por la disolución de las rocas calizas, no siempre están vacías y limpias, comúnmente están parcialmente llenas de arcilla, limo y otros materiales, por lo que no es fácil la inyección con lechada. Lo que requiere la inyección de mezclas con aditivos especiales, así como mezclas de lechada con poliuretanos expansivos o en algunos casos el uso de mezclas asfálticas en caliente.

2. Yeso y anhidrita

Estos materiales se asocian con las lutitas y las rocas calizas, la anhidrita es sulfato de calcio y el yeso es la forma hidratada, la presencia de estos materiales en cualquier obra civil genera dificultades en los tratamientos inyección, debido al potencial de disolución y si estos están muy fracturados. El diseño del proceso de inyección en estos materiales debe tener en cuenta perforaciones profundas en varias filas, orientados apropiadamente y una separación menor entre cada perforación, para tratar las discontinuidades, contactos entre capas de yeso y otras rocas y así disminuir la posibilidad de filtración.

3. Halita (Sal)

La halita al contacto con el agua es suave y soluble, esta no se encuentra en superficie por ser extremadamente soluble pero se encuentra en profundidad. Su presencia cerca de las obras civiles, se debe tener en cuenta por su solubilidad y posibles hundimientos.

4. Rocas sedimentarias clásticas

Los conglomerados, areniscas, limolitas y lutitas son los principales tipos de rocas sedimentarias clásticas. Las propiedades físicas de la arenisca, la limolita y el conglomerado. Depende del grado y tipo de cementación. Estas rocas pueden estar bien

cementadas y no requerir de tratamientos, o tener poca cementación lo que requeriría del tratamiento con inyecciones.

2.10.2 Rocas ígneas extrusivas y piroclásticas

Se incluyen los tubos de lava asociados con las lavas basálticas más fluidas, estos se generan por el enfriamiento rápido de la parte exterior del flujo mientras que al interior sigue fluyendo hasta drenarse totalmente, las dimensiones de estos varía entre 0,10 y 3,0 m o más.

Las más comunes son las piroclásticas, como la piedra pómez, que es el principal componente de las tobas. La toba volcánica es una roca piroclástica de grano fino compuesta de fragmentos menores de 5 mm. La mayor parte de los fragmentos son fenocristales rotos y fragmentos de lava solidificada; otros constituyentes comunes son partículas de vidrio volcánico, ya sean esquirlas microscópicas llamadas escamas o corpúsculos espumosos de pómez.

Las Tobas volcánicas son rocas formadas por material suelto arrojado por un volcán en erupción. Son materiales muy porosos y ricos en vidrio. En ocasiones, las tobas presentan depósitos de materiales arcillosos, expansivos o arcillas inestables.

Los depósitos de toba están formados por medio de la consolidación de fragmentos expulsados durante una erupción que son llamados piroclastos. Las partículas más pequeñas de ceniza y el polvo pueden ser arrastrados por el viento y esparcidos sobre grandes áreas en capas; las cuales se endurecen por medio de la consolidación. Cuando las partículas de ceniza y polvo son expulsadas en medio de una nube ardiente las partículas tienen a conformarse entre sí; tales tobas compuestas se llaman ignimbritas.

2.10.3 Rocas metamórficas

Los esquistos cristalinos con planos dominantes pueden ser equivalentes a las discontinuidades, las cuales pueden ser canales principales de flujo. Los planos de esquistosidad desarrollados en pizarra y filitas pueden tender a abrirse, bajo liberación de esfuerzos y generar discontinuidades que pueden tomar volúmenes significativos de mezcla de inyección durante el proceso de inyección.

2.11 TIPO Y PROPÓSITOS DE INYECCIÓN

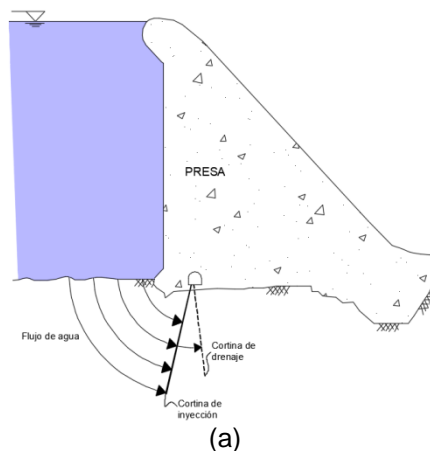
El objetivo principal de los tratamientos de inyección en macizos rocosos es típicamente reducir o detener los flujos de agua dentro del macizo, mejorar las propiedades físicas del macizo, o ambas.

La mayor parte de los tratamientos realizados en roca se relacionan con la construcción y el mantenimiento de presas y túneles, aunque también se usa en aplicaciones en minería, para llenar minas abandonadas, debido a que el acceso es restringido por un derrumbe, se puede inyectar lechada desde la parte superior.

En obras subterráneas, los tratamientos con inyecciones se realizan con el fin de reducir y controlar la infiltración de agua, aunque también sirve para mejorar el módulo de deformación del macizo.

En presas y diques el propósito principal de los tratamientos con inyecciones es minimizar la filtración a través de la roca de fundación, al igual que el mejoramiento de las propiedades físicas de macizos rocosos meteorizados.

Todos los tratamientos con inyecciones en macizos rocosos implica el relleno de grietas, discontinuidades y otros defectos existentes. Esto casi siempre se logra con lechadas de suspensión cementosa, aunque en algunos casos se realizan inyecciones químicas e inyecciones con resina.



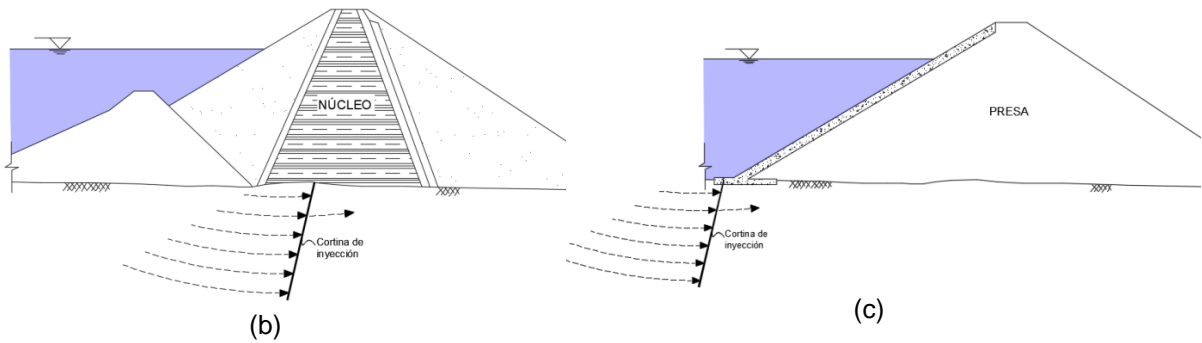


Figura 2.22. Tratamiento de inyecciones en presas.
 a) Presa de concreto b) Presa núcleo de arcilla c) Presa con cara de concreto.
 Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houslyby, A.C. (1990).

En la anterior figura se observa la ubicación de los tratamientos en fundaciones para presas en diferentes tipos de presa.

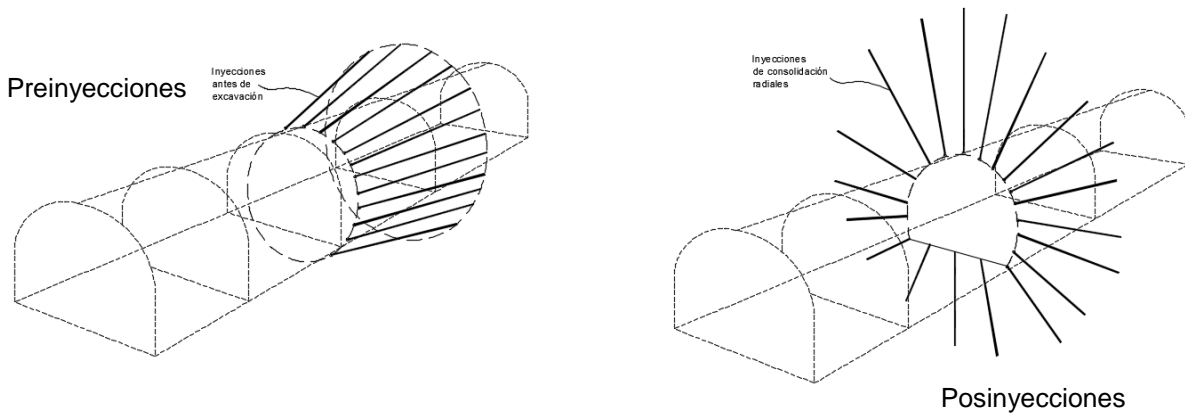


Figura 2.23. Tratamiento de inyecciones en túneles.
 Fuente del autor

Como se observa en la anterior figura se muestran los tratamientos típicos en túneles, la figura de la izquierda son los tratamientos previos a la excavación, se les denomina preinyecciones y mejoran las propiedades físicas e hidráulicas del macizo en el frente de la excavación. La figura a la derecha son tratamientos realizados después de la excavación, se les denomina posinyecciones y reducen los gradientes hidráulicos alrededor de la excavación, generalmente son utilizadas para el tratamiento de taponos de cierre y estructuras hidráulicas en los portales de entrada de los túneles.

2.11.1 Impermeabilización del macizo rocoso

Se utilizan las inyecciones para llenar los pequeños vacíos dentro del suelo o masas rocosas, en pequeños huecos entre estos materiales y una estructura existente, y/o en pequeñas grietas o fracturas dentro de las propias estructuras.

2.11.2 Reducción de gradientes hidráulicos

El tratamiento con inyecciones se usan comúnmente para reducir la permeabilidad, que puede ser necesaria para reducir las tasas de filtración a través de fracturas de la roca, reduciendo los gradientes hidráulicos y/o alterando gradientes de flujo o trayectorias de flujo para evitar la erosión de los cimientos y los materiales de los terraplenes, y/o el control del agua para las excavaciones según sea necesario para facilitar la extracción de agua o la estabilidad de la excavación. En cualquier aplicación de obras hidráulicas, las inyecciones son normalmente el tratamiento requerido para reducir los gradientes.

2.11.3 Mejoramiento de modulo elástico y propiedades de resistencia del macizo rocoso

Las inyecciones se pueden usar para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales de cimentación en suelos o rocas altamente meteorizadas. Las propiedades que pueden mejorarse mediante las inyecciones incluyen la mejora de la capacidad de carga, mejora en las propiedades relacionadas con la sedimentación, como el módulo elástico y la relación de vacío, mejora en la resistencia al corte y eliminación de vacíos que pueden afectar adversamente las condiciones de carga. Las inyecciones también se pueden usar como un método de compensación de asentamiento para prevenir o reparar daños a las estructuras.

2.11.4 Uso en obras subterráneas

Las aplicaciones típicas de tratamientos con inyecciones en obras subterráneas son:

- Tratamientos con inyecciones antes de la excavación para reducir las filtraciones durante construcción.
- Inyecciones antes de iniciar la excavación para mejorar las propiedades físicas del macizo rocoso, para estabilizar el macizo rocoso reducir y/o evitar el terreno que fluye dentro de la excavación.

- Inyecciones de contacto entre el revestimiento del túnel y las superficies de excavación para reducir las cargas del túnel a largo plazo, distribuir uniformemente los esfuerzos y reducir las filtraciones a través del revestimiento.
- Inyecciones de reparación de juntas y grietas en el revestimiento y reducir filtraciones de agua.
- Tratamientos de reducción de caudales de infiltración por requerimientos ambientales.
- Inyecciones de compensación, durante la excavación de túneles poco profundos, para proteger estructuras en superficie que se verían afectadas por los posibles asentamientos generados por la excavación subterránea.
- Inyecciones para impermeabilizar el macizo rocoso y reducir los gradientes hidráulicos en túneles hidráulicos con flujo a presión.
- Inyecciones de contacto y de consolidación en la construcción de tapones de concreto y/o estructuras de cierre en túneles hidráulicos y ventanas de acceso, para reducir el gradiente hidráulico y reducir las filtraciones.

2.11.5 Uso en presas

Las aplicaciones representativas de las inyecciones para presas nuevas o existentes de tierra y concreto, son:

- Tratamientos con inyecciones como una barrera hidráulica (cortinas de inyección) para controlar fugas y reducir gradientes hidráulicos en el macizo rocoso.
- Como inyecciones de consolidación para mejorar las propiedades del módulo de deformación del macizo rocoso y reducir las deformaciones en superficie.
- Inyecciones de contacto entre estructuras y la superficie del terreno
- Relleno de oquedades o huecos bajo las estructuras.
- Inyecciones de compactación e inyecciones de reemplazo para mejorar las propiedades de materiales sueltas bajo las estructuras.
- Tratamiento de discontinuidades en macizos muy fracturados.
- Relleno de perforaciones de exploración y galerías exploratorias.
- Inyecciones para mejorar las propiedades físicas del macizo para evitar la tubificación, igualmente para facilitar la estabilización de excavaciones superficiales

2.11.6 Otros tratamientos

Inyecciones para anclaje de pernos en roca y suelo para desarrollar la capacidad de anclaje y proporcionar protección ante la corrosión.

Levantamiento de estructuras de concreto, por ejemplo losas de concreto, andenes, cimentaciones, entre otros.

Relleno de tuberías abandonadas u otras estructuras subterráneas, por razones ambientales o estructurales, la tubería debe llenarse con concreto o lechada y para evitar la contaminación del agua subterránea en el área o un colapso estructural.

Inyección de espacios anulares en tuberías para volver reemplazarlas por otras, es un método de reemplazo de tuberías sin zanja.

Aplicaciones ambientales, como por ejemplo la construcción de una barrera para contener materiales contaminados y desviar los flujos de agua subterráneas alrededor de la zonas contaminadas.

Inyecciones para el relleno de minas abandonadas, que al no ser rellenas causan hundimientos en superficie y problemas hidrológicos, que lo son drenaje ácido de las minas a las aguas subterráneas hasta la alteración del flujo de agua superficial y subterránea.

3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

3.1 GENERALIDADES

En la construcción de una obra, sobre y dentro de un macizo rocoso, casi siempre requiere el tratamiento con inyecciones. El tratamiento se necesitara de acuerdo a los resultados de las investigaciones geotécnicas realizadas previas a la construcción de la obra, los resultados se deben complementar con los resultados de los tratamientos y las pruebas de agua realizadas durante construcción, para verificar las condiciones reales del macizo con las supuestas durante diseño.

Para realizar un adecuado análisis de verificación del tratamiento en el macizo rocoso, se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- Diseñar un programa de monitoreo después de realizar el tratamiento, por medio de piezómetros, manómetros, celdas de presión y otros instrumentos, debido a que el tratamiento con inyecciones reduce los gradientes hidráulicos, las filtraciones y mejora las propiedades físicas, pero no mejora totalmente el macizo, consecuentemente el macizo debe estar continuamente monitoreándose.
- Por requerimientos ambientales, las filtraciones deben ser nulas en lugares donde el recurso del agua es limitado, por lo tanto se requiere de un programa complejo y costoso de inyección.
- Los elevados costos de un programa de inyección para el tratamiento de un macizo, se justifican reduciendo las posibles futuras filtraciones, cuando el proyecto entre en operación y así evitar mantenimientos y reparaciones futuras.

La evaluación para revisar la efectividad del tratamiento con inyecciones en los posibles mecanismos de falla es la siguiente:

- Revisar los piezómetros y niveles freáticos aguas arriba y aguas abajo de la zona donde se realizó el tratamiento.
- Observar y registrar los efectos del tratamiento del flujo de agua subterránea dentro del macizo rocoso y las obras civiles.
- Revisar si el tratamiento con inyecciones genere mayores infiltraciones en el macizo.

- Revisar qué tipo de material y volúmenes, salen por los flujos de las infiltraciones antes y después del tratamiento.
- Revisar en caso de presentarse filtraciones considerables en la zona donde se realizó el tratamiento.

Aunque las investigaciones geotécnicas, las pruebas de aguas, los métodos geofísicos y otros métodos de investigación geológica puedan indicar las condiciones geológicas e hidrogeológicas del sector a tratar con inyecciones, no tienen una correlación definitiva o predecible entre los resultados de las investigaciones geológicas y la cantidad inyecciones necesarias para realizar un adecuado tratamiento. Sirven como guía inicial para programar adecuadamente el tratamiento, solo durante la ejecución de las inyecciones se pueden verificar las condiciones reales del proyecto. Sin embargo, como se mencionó en el numeral 2.3.3, existen ensayos o pruebas de inyección en el sitio durante las investigaciones geotécnicas, previas a la construcción, pueden proporcionar información de diseño útil para la optimización del programa de inyección y proporcionar una mejor estimación de costos.

3.2 CRITERIOS DE DISEÑO

Antes del desarrollo de las inyecciones de la década los 80's (numeral 2.8), los criterios de diseño de tratamientos con inyecciones se realizaban con reglas empíricas, relacionadas con la carga hidrostática aplicada en el macizo y al tipo de obra, estos no tenían un fundamento técnico ni eficaz, por lo tanto no trataba adecuadamente los macizos rocosos.

Solo hasta la década de los 90's, Houlsby (1990), Weaver (2007) y otros publicaron artículos, libros y publicaciones que promovió el diseño de las inyecciones de forma racional, basado en la investigación geotécnica del sitio, realizando enfoques semi-analíticos para el diseño las inyecciones y analizando los resultados durante ejecución del tratamiento.

Una guía generalizada utilizada en los Estados Unidos en el diseño de tratamientos con inyecciones, la explico A.C. Houlsby en 1977. Desarrollando un diagrama de flujo con algunas recomendaciones generales, para escoger el número de cortinadas para

inyección, siguiendo los resultados de permeabilidad de las pruebas Lugeon en macizos rocosos, esta metodología tiene en cuenta el potencial de tubificación en el macizo.

En la Figura 3.1, muestra el diagrama propuesto por Houlby para el diseño de cortinas de inyección para presas cimentadas en macizos rocosos.

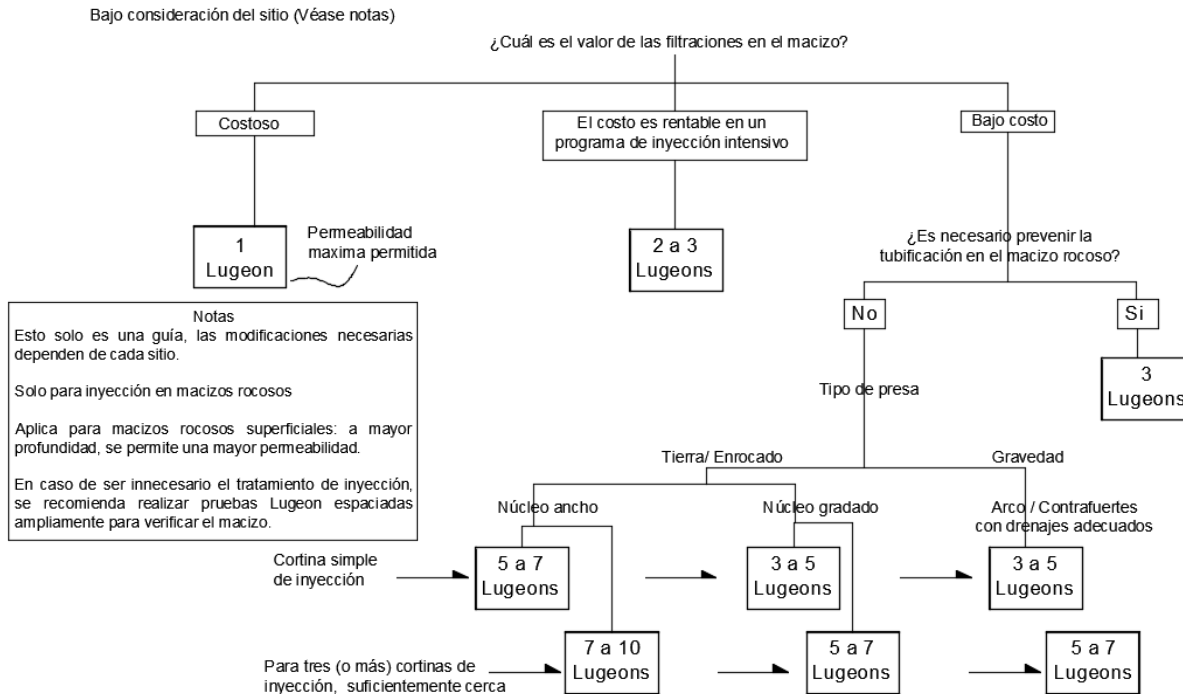


Figura 3.1. Diagrama de flujo con algunas recomendaciones generales para diseño de cortinas de inyección.

Adaptado de “*Routine interpretation of the Lugeon water-test*” de Houlby, A.C. (1976).

Otra metodología cuyo análisis se basa en consideraciones cuantitativas, es la propuesta por Wilson, D. B., y Dreese, T. L. (2003). para enfocar el diseño de Houlby de forma cuantitativa, esta metodología la llamaron Ingeniería Cuantitativa en Cortinas de Inyección (en inglés *Quantitatively Engineered Grout Curtain* con siglas, QEGC).

Esta metodología se basa la caracterización del sitio, especialmente de las condiciones del macizo que afectaran el tratamiento, incluidas las propiedades litológicas, geoestructurales e hidrogeológicas. El enfoque del diseño QEGC es considerar el tratamiento con inyecciones como una estructura con una geometría y permeabilidad específica que se interrelaciona con el macizo rocoso. El tratamiento con inyecciones está afectado por los siguientes condiciones: los materiales de inyección, las mezclas de

inyección, el equipo de utilizado, la técnica de inyección en sitio, el número de cortinas utilizadas, el espacio entre perforaciones, la orientación de la perforación, la experiencia del operador de inyección, la experiencia del inspector del trabajo, las técnicas de monitoreo y análisis de campo utilizadas para evaluar el tratamiento terminado, las condiciones climáticas y otras condiciones.

Con estos factores, se identifican cuatro niveles de posibilidades de diseño para la inyección de cortinas simples y triples, asumiendo que en todas las condiciones la inyección sea viable.

En la Tabla 3.1, se presentan los resultados esperados cuando se utilizan mejores prácticas de inyección durante el diseño, construcción y verificación del tratamiento.

Tabla 3.1. Resultados esperados en la permeabilidad del macizo para el diseño de cortinas de inyección.

	Características del proyecto	Cortina simple	Cortina triple
Nivel 1	<p>Contratación de baja oferta: Contratistas inexpertos. Trabajos de inyección: no dirigida por un ingeniero. Lechadas de cemento más delgadas con relaciones A:C 3:1 Pocas pruebas Lugeon. Según criterios empíricos la separación entre perforaciones de 3 m. Poca tecnología en la instrumentación durante la inyección y después del tratamiento. Inyecciones deficientes, sin completar el rechazo. Personal de inspección sin experiencia. Número de personal de inspección inadecuado para cubrir todas las operaciones a tiempo completo. Inexistencia de análisis de resultados.</p>	<p>Resultados impredecibles No se recomienda</p>	<p>1.0×10^{-5} (80 Lugeons)</p>
Nivel 2	<p>Contratación de baja oferta, con el requisito de contratistas con experiencia en inyecciones. Trabajos de inyección: dirigida por un ingeniero en tiempo parcial. Lechadas de cemento más gruesas mayores a 3:1. Según criterios empíricos la separación entre perforaciones de 1.5 m. Poca tecnología en la instrumentación durante la inyección y después del tratamiento. Inyecciones hasta obtener el rechazo con un periodo de espera después del rechazo. Personal de inspección con experiencia limitada. Número de personal de inspección adecuado para cubrir la mayoría de las operaciones a tiempo completo. Comprensión limitada del análisis de resultados.</p>	<p>1.0×10^{-5} m/s (80 Lugeons)</p>	<p>1.0×10^{-6} m/s (8 Lugeons)</p>

Nivel 3	<p>Precalificación de contratistas con equipos especializados en inyección. Mezclas de lechada equilibrada y estable. Pruebas Lugeon sistematizadas Trabajos de inyección: dirigida por un ingeniero en tiempo completo. Los espacios entre perforaciones como máximo de 1,5 m. Presiones máximas de inyección determinadas según las condiciones geológicas del sitio. Uso de tecnología en la instrumentación durante la inyección y después del tratamiento, visualización del proceso de inyección en tiempo real. Inyecciones hasta obtener el rechazo total. Personal de inspección con experiencia. Número de personal de inspección adecuado para cubrir todas las operaciones a tiempo completo. Buena comprensión de los resultados.</p>	1.0×10^{-6} m/s (8 Lugeons)	4.0×10^{-7} m/s (3 Lugeons)
Nivel 4	<p>Selección de mejor valor o precalificación de contratistas y equipos de inyección especializados. Mezclas de lechada equilibrada y estable y mezclas especiales. Programa riguroso de pruebas Lugeon Trabajos de inyección: dirigida por un ingeniero en tiempo completo. Los espacios entre perforaciones como máximo de 1,5 m, con análisis detallado del cierre entre perforaciones. Espacio entre orificios finales de 1,5 m como máximo y basado en análisis de cierre detallados Presiones máximas de inyección determinadas según las condiciones geológicas del sitio. Uso de tecnología en la instrumentación durante la inyección y después del tratamiento, visualización del proceso de inyección y sistemas analíticos en tiempo real. Inyecciones hasta obtener el rechazo total. Personal de inspección altamente experimentado Número de personal de inspección adecuado para cubrir todas las operaciones a tiempo completo Excelente comprensión de los resultados.</p>	4.0×10^{-7} m/s (3 Lugeons)	1.0×10^{-8} m/s (0.1 Lugeons)

Adaptado de "Quantitatively Engineered Grout Curtains" de Wilson, D. B., y Dreese, T. L. (2003).

Según la Tabla 3.1, recomendada por Wilson, D. B., y Dreese, T. L. (2003), se concluye que en situaciones idealizadas, el diseño debería cumplir permeabilidades supuestas del orden de 3 a 8 Lugeon mediante el tratamiento de una cortina de inyección y que el tratamiento con una triple cortina se puede alcanzar una permeabilidad baja de 0.1 Lugeons. Sin embargo, se aclara que situaciones comunes de inyección, donde no se utilizan equipos especializados, se esperan permeabilidades de 80 Lugeons con una cortina simple y 8 Lugeons para una triple cortina. Con el anterior argumento se

demuestra que los tratamientos de inyección en macizos rocosos requieren la construcción de varias cortinas con el uso de equipos especializados.

3.2.1 Cuerpo de ingenieros del ejército de los estados unidos (USACE)

El Cuerpo de ingenieros de ejército de los Estados Unidos, realiza el seguimiento de tratamientos con inyecciones en macizos rocosos, a obras civiles que requieran reforzamiento de las cortinas de inyección de obras antiguas o diseños desde la fase de diseño de las obras, por lo cual el USACE realiza planificación de las inyecciones en el diseño y el proceso constructivo del tratamiento.

3.2.1.1 Efectividad del tratamiento

El tratamiento con inyecciones desde la perspectiva historia ha demostrado que es un tratamiento efectivo, sin embargo varias experiencias de tratamientos que no han sido satisfactorios, han demostrado que (1) el propósito del tratamiento es poco confiable durante el proceso de inyección, (2) no se alcanzó el propósito del tratamiento a largo plazo, (3) se generan sobrecostos, retrasos y reclamos, y (4) faltan análisis de las cantidades requeridas y de los resultados del tratamiento. Cada uno de estos resultados insatisfactorios es el resultado directo de una o más faltas en la ejecución adecuada del proceso de factibilidad, diseño y construcción. En este numeral se describen los pasos generales necesarios para realizar un tratamiento con inyecciones exitoso.

3.2.1.2 Reconocimiento del sitio

El propósito de la fase de reconocimiento es identificar un problema existente y las posibles soluciones o definir un proyecto para atender una necesidad pública específica. Cualquier evaluación del posible tratamiento con inyecciones se basará en la información geológica general, en información específica del sitio que pueda existir, un buen juicio de ingeniería en tratamientos con inyecciones y los resultados del tratamiento con inyecciones en comparación con otras tecnologías disponibles. El resultado de la fase de reconocimiento es el conocimiento del alcance de las investigaciones geotécnicas y los estudios requeridos para la etapa de factibilidad.

3.2.1.3 Etapa de factibilidad

La etapa de Factibilidad es formular una solución específica para atender una necesidad pública específica. El trabajo en esta fase incluye estudiar soluciones potenciales, evaluar

costos y beneficios, preparar diseños iniciales y recomendar un plan para resolver el problema.

Un objetivo importante es desarrollar el diseño del plan recomendado con suficiente detalle como para poder autorizarlo, implementarlo y construirlo sin cambios importantes en el concepto, el costo o el cronograma. Con respecto a la lechada, la etapa de Factibilidad incluirá una investigación y caracterización del sitio, una evaluación preliminar de la idoneidad técnica del sitio para la inyección, una determinación de los beneficios potenciales que se derivarán del tratamiento y una estimación preliminar del costo.

Los métodos geofísicos se pueden usar para definir vías de infiltración y para ayudar en el diseño de investigaciones adicionales. Las investigaciones geotécnicas pueden incluir perforaciones, que permiten tanto las pruebas de agua para estimar la conductividad hidráulica in situ, como las imágenes dentro de la perforación, para caracterizar la capacidad de la roca para aceptar la lechada de inyección. Estas perforaciones también se pueden usar para instalar instrumentación en áreas donde la información es insuficiente.

El resultado esperado en esta fase es una evaluación rápida, pero confiable, de que la inyección resuelva el problema característico del macizo rocoso. En la Tabla 3.2, se describen los elementos en la etapa de factibilidad.

Tabla 3.2. Elementos de la etapa de factibilidad.

Ítem	Detalles
Caracterización del sitio para el tratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investigar y revisar información secundaria de datos disponibles. ▪ Realizar mapeo geológico, investigaciones geotécnicas y pruebas Lugeon. ▪ Cuantifique todas las condiciones del sitio en parámetros de diseño utilizables para la inyección, como: la estratigrafía de la roca, espaciamiento y orientación de los sistemas de discontinuidades, permeabilidad del sitio, calidad de la roca, perfiles de meteorización, propiedades de la roca intacta y del macizo rocoso, etc.
Definición de objetivos del tratamiento y criterios de diseño cuantitativos.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definir los criterios del macizo después del tratamiento, como lo son las filtraciones máximas permitidas, propiedades mecánicas del macizo específicas y las deformaciones máximas permitidas.
Modelo simplificado y análisis de las propiedades del macizo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Establecer el tratamiento que requiere el macizo rocoso para mejorar el desempeño del proyecto. ▪ Definir las zonas problemáticas que requieran tratamientos.
Evaluación preliminar de la utilidad del tratamiento y sus problemas particulares.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definir las zonas inyectables y el posible grado de mejora. ▪ Definir las zonas no inyectables. ▪ Definir las zonas que requieren inyecciones descendentes (por etapas) y las zonas adecuadas para las inyecciones ascendentes (con

	empaques). <ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificar las zonas de tratamiento particular (por ejemplo, zonas artesianas, zonas de interfaz suelo-roca, vacíos abiertos y rellenos, y materiales aluviales).
Asignación de propiedades de mejoramiento esperado en las zonas tratadas.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Asignación de propiedades del macizo que pueden esperarse ser alcanzables, teniendo en cuenta todos los factores que pueden afectar los resultados del tratamiento. ▪ Definir los tratamientos alternativos en las zonas que no inyectables.
Configuración de diseños y modelos alternativos y análisis del comportamiento con tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Realizar procesos de prueba y error para evaluar varias alternativas. ▪ Comparar los resultados de cada prueba con los requisitos del diseño.
Desarrollo de estimaciones de costos preliminares y selección del programa recomendado.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Preparar las estimaciones de costos comparativos aproximados para cada alternativa que cumpla o supere los requisitos del tratamiento. ▪ Evaluar los beneficios cuantitativos y cualitativos totales para cada alternativa. ▪ Evaluar los beneficios del tratamiento derivado de diferentes conceptos y configuraciones. ▪ Seleccionar un programa recomendado.
Desarrollo del costo final estimado para el programa recomendado.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ampliar los detalles del programa recomendado. ▪ Desarrollar una lista detallada de elementos de trabajo. ▪ Preparar una estimación del costo final utilizando las cantidades estimadas. ▪ Realizar verificaciones reales de los costos utilizando otra información (por ejemplo, los costos totales finales para proyectos exitosos similares y fuentes de información externas).

Adoptado de "Engineering and Design - Grouting Technology. Manual No. 1110-2-3506" de USACE. (2017).

3.2.1.4 Etapa de diseño

Si la evaluación de la fase de factibilidad indica que el tratamiento con inyecciones es un elemento necesario siendo eficaz y económicamente viable, se avanzará a la fase de diseño. En la fase de diseño, se finaliza el diseño, se preparan planos y especificaciones y se prepara el contrato de construcción. El objetivo es tener un programa de inyección con los documentos contractuales requeridos para lograr los objetivos de diseño, que sean fácilmente construibles y que estén libres de fallas técnicas, contractuales o financieras importantes. En la Tabla 3.3, se enumera los elementos del trabajo de esta etapa.

Tabla 3.3. Elementos de la etapa de diseño.

Ítem	Detalles
Elementos requeridos para la ejecución del proyecto en el contexto de los requisitos del tratamiento del proyecto y las condiciones del sitio del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tener en cuenta la naturaleza fundamental de las condiciones del sitio del proyecto y los requisitos del tratamiento. ▪ Evaluar el rendimiento del tratamiento con inyecciones. ▪ Evaluar la sensibilidad del desempeño final del programa de inyecciones en el macizo rocoso. ▪ Determinar si el programa de inyección puede ser definido por métodos preestablecidos o si necesita cambiar durante la ejecución del tratamiento. ▪ Determinar la naturaleza y el grado de verificación del tratamiento requerido. ▪ Evaluar la experiencia y el conocimiento del personal que proporciona la supervisión del tratamiento.
Evaluación detallada de los equipos y metodologías utilizadas en el tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identifique los equipos, metodologías y procedimientos necesarios para el tratamiento. ▪ Identifique todos los requisitos especiales, problemas, limitaciones y soluciones viables.
Definición de los resultados finales mínimos verificables que se deben alcanzar.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definir la geometría y las propiedades mínimas requeridas que deben alcanzarse para realizar un tratamiento aceptable. ▪ Definir los requisitos mínimos para alcanzar la permeabilidad deseada.
Determinar los retrasos en el tratamiento de inyección debido a actividades de construcción en el proyecto.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planificar la programación del proceso de inyección respecto a otros aspectos de los programas de construcción del proyecto para lograr el mejor resultado.
Desarrollo del diseño detallado del tratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Determinar los sitios donde se realizara el tratamiento con inyecciones, preparación del terreno, la ubicación de las cortinas de inyección, el espaciamiento entre perforaciones, las orientaciones de las inyecciones, la profundidad de inyección, las etapas de inyección, la secuencia de perforación, la secuencia de inyección (por etapas o empaques), definir las zonas especiales de inyección, etc. (Véase Figura 3.2)
Diseño de plan de instrumentación y control, análisis y verificación de información en tiempo real durante el tratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Determinar cómo se analizarán, presentarán y verificarán los resultados obtenidos antes, durante y después del tratamiento.
Diseño de aseguramiento y control de calidad de la organización y sus responsabilidades	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identifique el personal requerido para el análisis de la información durante el proceso de inyección. ▪ Identificar los requisitos de calificación del personal requerido. ▪ Determinar las funciones y responsabilidades respectivas del Cliente y del Contratista.
Desarrollo de las cantidades de obra como medida y pago.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Revise la lista final de las cantidades de obra para verificar su adecuación, imparcialidad y flexibilidad. ▪ Revisar las cantidades desde el punto de vista de que generen impacto en la calidad del trabajo.
Departamento de Aseguramiento y control de calidad de la USACE.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Llevar a cabo todas las revisiones necesarias según los niveles de revisión propuestos por la USACE: (1) Departamento de calidad, (2) Departamento técnico, (3) Revisión de la viabilidad, operatividad y revisión ambiental del tratamiento, (4) Revisiones ejecutadas por expertos externos a la organización (Board de expertos), (5) Cumplimientos de los requerimientos ambientales y (6) Cumplimiento

	de las normas política y legales de la organización y/o gobierno.
Diseño preliminar de estimación de cantidades y costos.	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollar cantidades apropiadas estimadas basadas de los anteriores análisis y la experiencia de proyectos similares. Combinar los resultados de los ítems y realizar una estimación de costo basada en las cantidades estimadas del tratamiento.
Preparación de planos y especificaciones y estimación del costo final del tratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> Adaptar todos los elementos necesarios para el tratamiento en las especificaciones técnicas del proyecto. Explicar el alcance del tratamiento en los informes de diseño, planos y especificaciones.

Adoptado de “Engineering and Design - Grouting Technology. Manual No. 1110-2-3506” de USACE. (2017).

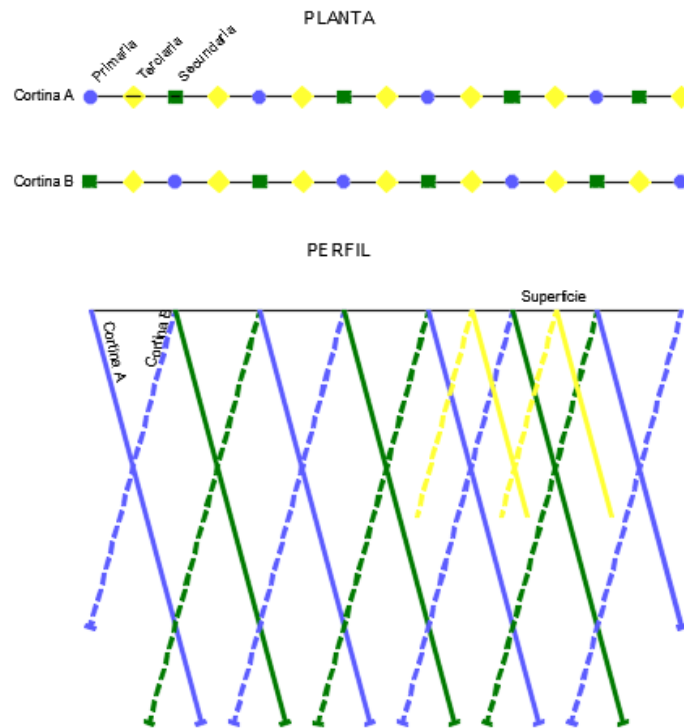


Figura 3.2. Disposición típica de tratamiento de inyección.

Adoptado de “Engineering and Design - Grouting Technology. Manual No. 1110-2-3506” de USACE. (2017).

En la anterior figura se muestra la disposición de las inyecciones en una cortina de inyección, direccionada de tal forma que intersecte la mayoría de las discontinuidades en niveles primarios, secundarios y terciarios.

3.2.1.5 Procedimientos de perforación e inyección por etapas (descendentes) y por empaques (ascendentes).

En la etapa de factibilidad y de diseño, es necesario escoger que secuencia de inyección realizar para el tratamiento en el macizo si es por medio de inyecciones ascendentes o

por medio de inyecciones descendentes. Esto es importante para estructurar y preparar los documentos para licitar y para estimar los costos y tiempos del tratamiento.

Las inyecciones ascendentes o por empaques son aquellas que implican perforar hasta la profundidad específica de diseño, luego el hueco se lava, en caso de requerir se realizan pruebas Lugeon, luego se realiza la inyección dentro de la perforación desde el fondo dejando que la lechada fragüe para avanzar a la siguiente etapa hacia la superficie de la perforación.

Las inyecciones descendentes o por etapas son aquellas donde el macizo presenta inestabilidad o derrumbe en la perforación, por lo que requiere inyectar desde la superficie hasta la profundidad de diseño. Este procedimiento inicia con una perforación en etapas (establecidas en el diseño o en campo), luego se inyecta esa etapa y se deja fraguar la lechada lo suficiente para que no se lave con la reperfuración, en seguida se reperfura la etapa inyectada y se continua la perforación en la siguiente etapa para que continúe con el procedimiento anterior. Este procedimiento es lento por los tiempos de fraguado y de reperfuración, estos tiempos se deberán tener en cuenta para el diseño del cronograma del programa de inyección.

En la Tabla 3.4, se describen las ventajas y desventajas de cada procedimiento de perforación e inyección.

Tabla 3.4. Ventajas, desventajas y otras consideraciones de los procedimientos de inyección ascendente y descendente.

Consideraciones	Perforación e inyección descendente (Etapas)	Perforación e inyección ascendente (Empaques)
Condiciones típicas del sitio que favorecen el tratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permite perforar e inyectar en cualquier tipo de roca y diferentes situaciones ▪ Cuando se presenten pérdidas de agua durante la perforación y/o cuando se presentan conexiones con otras perforaciones durante el proceso de inyección. ▪ Zonas problemáticas conocidas o alcances (por ejemplo, zonas muy meteorizadas, zonas de fallas, zonas de roca débil, zonas con relleno de suelo). ▪ Formaciones cársticas y otras zonas vacías. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Roca de buena calidad (es decir, RQD>40%) perforaciones estables. ▪ Adecuado en rocas blandas para el sellado de los empaques en las paredes laterales de la perforación. ▪ Cantidad mínima de pérdidas de agua durante la perforación (si se produce una pérdida de agua, las operaciones deben cesar y la zona debe estar sellada antes de continuar). ▪ Menor número de conexiones durante el procedimiento de inyección.

Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ En zonas poco profundas, a menudo las zonas más difíciles y más importantes para el tratamiento, pueden ser repetidamente inyectadas. ▪ Es el método más flexible disponible para adaptarse a todas las condiciones. ▪ La perforación de las etapas inferiores no interceptar las fracturas en las zonas más altas. ▪ Reduce las interconexiones de las perforaciones que pueden resultar en una inyección incompleta o ineficaz. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Las longitudes de las etapas se pueden variar para adaptarse a las condiciones del sitio, que se encontraron durante la investigación geotécnica. En etapas con longitudes cortas se pueden usar en zonas particulares y etapas de mayor longitud se pueden usar en zonas de baja permeabilidad o uniformes ▪ Este procedimiento es más económico y más rápido que las inyecciones descendentes, siempre y cuando las condiciones sean adecuadas para la inyección.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Este procedimiento es más costoso y consume más tiempo que las inyecciones ascendentes. ▪ Posibilidad de levantar la roca en la superficie al inyectar sin una carga de confinamiento pesada, lo que puede evitarse colocando el empaque en la parte superior de la etapa de perforación más reciente. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se usan inyecciones presiones bajas en zonas poco profundas. ▪ La perforación puede contaminar las fracturas a lo largo de todo el agujero. ▪ La inyección se puede desviar a través del sistema de discontinuidades y volver a entrar la perforación por encima del empaque. ▪ En roca débil o muy fracturada, es difícil sellar los empaques, y las pruebas de agua o lechada pueden causar la pérdida de estabilidad del agujero ▪ Las conexiones con perforaciones cercanas pueden contaminar los perforaciones ya inyectadas.
Otras consideraciones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Este procedimiento es común utilizarlo en zonas superiores de la roca y en zonas particulares conocidas. ▪ Este procedimiento se usa en ocasiones para preparar las inyecciones ascendentes, por ejemplo se utilizan en perforaciones primarias y secundarias, y a veces en el caso de una triple cortina, se usa en las cortinas exteriores y en la central se utilizan inyecciones ascendentes. 	

Adoptado de "Engineering and Design - Grouting Technology. Manual No. 1110-2-3506" de USACE. (2017).

3.2.2 Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE)

3.2.2.1 Pruebas de inyección

La ASCE sugiere realizar pruebas de inyección en sitios donde falta información para el diseño de tratamientos con inyecciones, en estas pruebas se determina la permeabilidad del macizo rocoso antes y después del tratamiento, los procesos óptimos de inyección para el tipo de macizo rocoso, rendimientos del tratamiento, entre otros que se explicaron en el numeral 2.3. De la información obtenida de las pruebas de inyección se refina el diseño y procedimientos del tratamiento con inyecciones, se conocen los datos de los rendimientos de ejecución para tener estimativos de tiempos.

Un ejemplo de una prueba de inyección en el sitio, es realizar un tramo de prueba con inyecciones a espacio dividido, sugerida por Nonveiller en 1970, la cual consiste realizar perforaciones primarias a espacio dividido establecido previamente, se realizan pruebas Lugeon y luego se inyecta según el procedimiento de diseño, luego el tratamiento entre inyecciones primarias se comprueba con pruebas Lugeon (rangos de permeabilidad entre 1 a 10 Lugeon). Los espacios entre inyecciones se dividen en espacios sucesivos (secundarias, terciarias, cuaternarias, etc) hasta alcanzar la permeabilidad específica o hasta obtener tomas de inyección bajas

Luego de realizar el tratamiento en el tramo de prueba se obtienen los siguientes datos estadísticos:

- Coeficiente de reducción de permeabilidad o la relación entre la permeabilidad promedio del macizo antes del tratamiento y la permeabilidad promedio del macizo después del tratamiento.
- Consumo promedio de inyección en cada nivel (primario, secundario, terciario, etc).
- Espaciamiento máximo entre perforaciones para inyecciones.

Los resultados anteriores pueden indicar la efectividad del tratamiento con inyecciones en el tramo de prueba, el análisis de los resultados obtenidos deben centrarse en la distribución y varios de los datos y explicar a qué se debe la distribución y variación de los datos.

Los resultados de las pruebas de inyección indican que el tratamiento dependerá de las condiciones geológicas encontradas en el sitio, si se encuentran condiciones geológicas

en el proyecto se deberán realizar pruebas de inyección en cada tramo y obtener resultados en cada sitio en particular.

3.2.2.2 Profundidad del tratamiento

La experiencia de ejecución de cortinas de inyección en los EEUU, tradicionalmente define la profundidad del tratamiento siguiendo la cabeza hidráulica, para el caso de las presas, produciendo profundidades más cortas que las prácticas Europeas, las cuales usan la misma profundidad que la altura de la presa a construir.

El objetivo de la profundidad del tratamiento es incrementar el camino del agua a través del macizo rocoso a un valor considerable según las características particulares del proyecto. Sin embargo, esta consideración no tiene en cuenta la cantidad de filtraciones a través del macizo rocoso y consecuentemente tener efectos de tubificación en profundidad, por lo que se deberá extender la profundidad del tratamiento hasta estratos menos permeables.

La profundidad del tratamiento depende de las condiciones de esfuerzos en el macizo rocoso, como por ejemplo los efectos de liberación de esfuerzos en macizos rocosos, generando discontinuidades profundas las cuales el tratamiento debe alcanzar

En tratamientos muy profundos es probable que las perforaciones para inyecciones puedan tener desviaciones excesivas dejando “ventanas” o tramos entre inyecciones sin tratar, conllevando a tratamiento ineficientes, por lo que estas desviaciones se deben controlar y medir para realizar inyecciones complementarias en los sectores donde no se alcanzó a tratar.

La ASCE sugiere profundidad máxima para una cortina múltiple es de 50 m en condiciones deficientes y 150 m en condiciones favorables. Estas profundidades máximas sugeridas se tienen en cuenta, si existen condiciones relativamente impermeables a profundidades menores. Buscando un estrato o nivel con permeabilidades menores o iguales a 1 Lugeon, teniendo en cuenta que en algunos proyectos se pueden aceptar valores de permeabilidad de 10 Lugeon según las condiciones particulares.

En zonas cársticas es necesario extender la profundidad del tratamiento hasta estratos o niveles impermeables, para evitar que las filtraciones por debajo del tratamiento viajen y generen pasos preferenciales de agua. En estas zonas la profundidad del tratamiento se

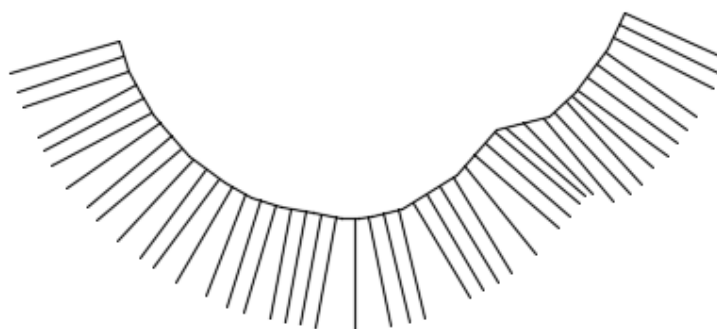
complementa con la construcción de múltiples cortinas, inyectar a presiones adecuadas para que la inyección “viaje” y llene las oquedades y desplace los rellenos de las oquedades existentes.

3.2.2.3 Longitud del tratamiento

La longitud del tratamiento se define con las condiciones geológicas existentes, para evitar que los pasos preferenciales de agua pasen por un lado del sector tratado, por esta razón el tratamiento con inyecciones debe extenderse hacia los estribos en el caso de una presa o a lo largo de una obra subterránea hasta una distancia apropiada.

Para el caso de tratamientos en fundaciones para presas, se solicita continuar el tratamiento a lo largo de los estribos (pendientes altas o bajas), en caso de tener pendientes bajas la continuidad del tratamiento hasta los niveles de la presa, en el caso contrario de pendientes altas se debe continuar el tratamiento más allá de los niveles de la presa. La separación de las inyecciones en pendientes bajas es la máxima permitida, según el numeral anterior. La separación de las inyecciones en pendientes altas requiere separaciones más juntas con inclinaciones sucesivas más bajas hasta ser casi horizontales.

Estas perforaciones casi horizontales imponen una restricción en el avance del tratamiento y en el proceso de perforación e inyección, según las condiciones del macizo rocoso.



Estribos con pendientes bajas

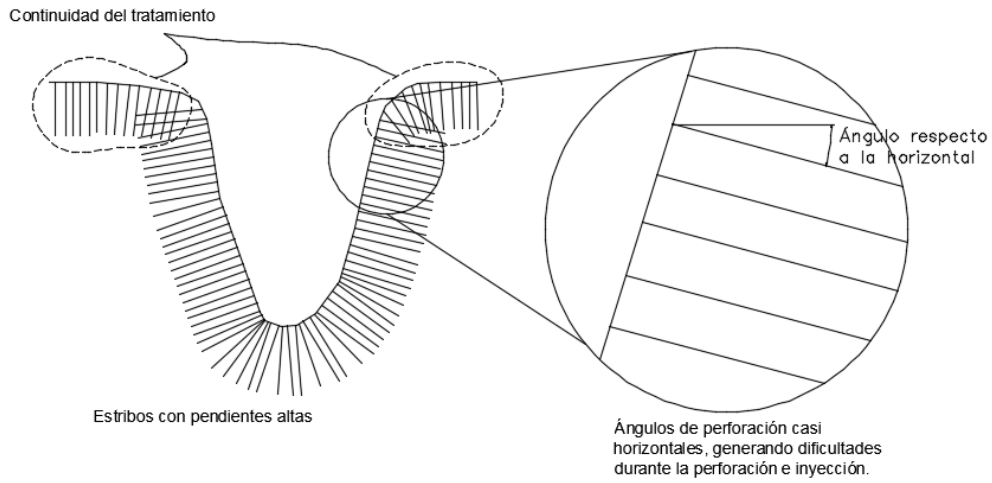
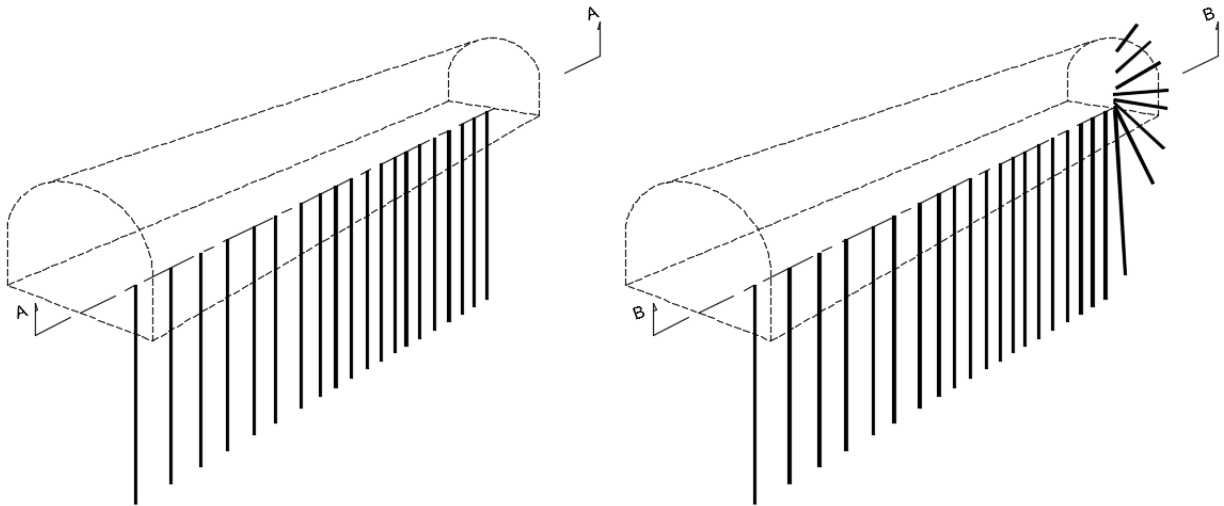


Figura 3.3. Continuidad del tratamiento en estribos.
Fuente del autor.

En la Figura 3.3, se observa que los tratamientos para presas apoyadas sobre estribos escarpados, requieren continuar con la cortina de inyección en la parte superior de los mismos, para obtener tratamientos efectivos.



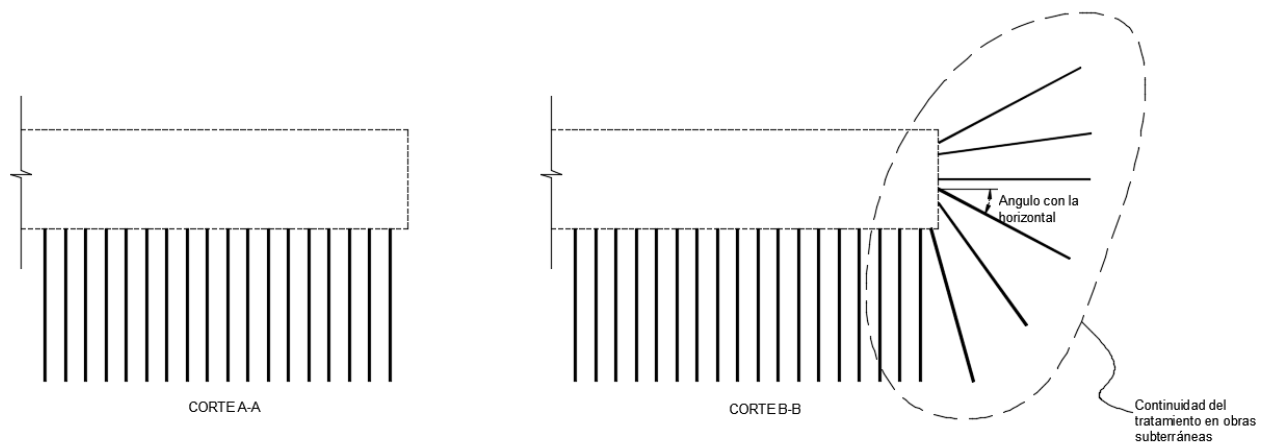


Figura 3.4. Continuidad del tratamiento en obras subterráneas.
Fuente del autor.

En la Figura 3.4, se observa en la vista isométrica y cortes, la continuación de la cortina de inyección en las obras subterráneas.



Fotografía 3.1. Ejemplo de continuidad del tratamiento con inyecciones en galería de inyección.
Fuente del autor.

3.2.2.4 Espaciamiento de perforaciones para inyección

El espaciamiento entre perforaciones para un tratamiento con inyecciones, se basa de la suposición de cuanto “viaja” la inyección a través del macizo y este sector no se sobreponga con el tratamiento de la inyección continua. (Figura 3.5).

Generalmente se escoge un espaciamiento entre inyecciones primarias entre 6 y 12 m en cada fila, según los requerimientos de cada proyecto puede requerir perforaciones más

separadas, en macizos rocosos muy sanos, o puede requerir inyecciones primarias separadas 3 m, en macizos rocosos muy fracturados o meteorizados,

Sin embargo, puede que estos espaciamientos no alcancen a intersectar discontinuidades muy abiertas o muy aisladas a la zona del tratamiento, lo que puede generar incremento en los tiempos de ejecución y de costos del tratamiento, para asegurar la efectividad del tratamiento. Por eso es importante tener un buen plan de explotación del sector y una retroalimentación continua de la información durante ejecución del tratamiento. Igualmente, el diseño debe prever un plan de contingencia con un 50% más de inyecciones que las estipuladas en el diseño.

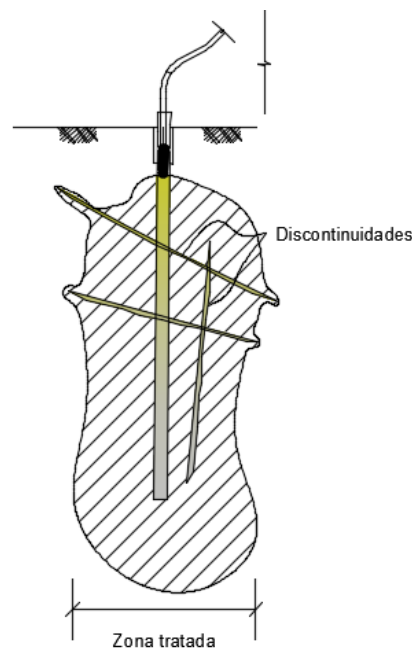


Figura 3.5. Zona tratada con inyecciones.
Fuente del autor.

Como se detalla de la anterior figura, el tratamiento con inyecciones tiene un área o zona de influencia hasta donde la mezcla de inyección recorre o viaja dentro del macizo y las discontinuidades existentes.

No obstante, a pesar de las incertidumbres involucradas, se debe hacer una estimación de tiempos y costos, realistas y conservadoras, según la experiencia del diseñador y comparando tratamientos ejecutados en otros proyectos.

3.2.2.5 Orientación de perforaciones para inyección

Generalmente las orientaciones de las inyecciones son perpendiculares a la pendiente del terreno o el sector donde se realizara el tratamiento, con el objetivo de lograr una profundidad de inyección igual en el sector. Sin embargo, la orientación depende de la distribución de las discontinuidades en el macizo rocoso, de tal forma que un número adecuado de perforaciones para inyección intersecten el mayor número de discontinuidades.

El diseño de las orientaciones de perforaciones para inyección, debe ser muy elaborado para que el tratamiento en general alcance todas las discontinuidades quedando con una geometría flexionada, curvada e inclinada. Estas orientaciones se deben explicar claramente en las especificaciones del tratamiento para que se configure adecuadamente la ubicación de los equipos de perforación en el sitio.

La ASCE recomienda que las perforaciones para inyección deban intersectar los sistemas de discontinuidades existentes con ángulos mayores a 30° a los ángulos de las discontinuidades para que el tratamiento cruce el mayor número de discontinuidades por metro como sea posible y recomienda que se deben tener al menos dos filas de perforaciones para inyección en diferente orientación y una adicional como verificación.

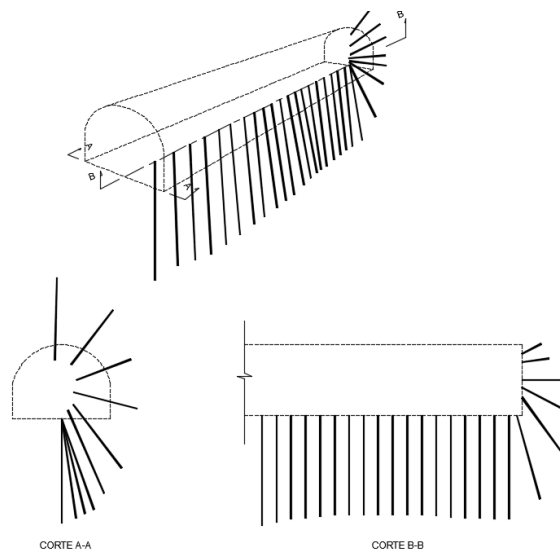


Figura 3.6. Orientación de perforaciones para inyección según las condiciones de las discontinuidades.
Fuente del autor.

La dirección y ángulos de las perforaciones deben explicarse claramente en los planos de obra, debido a que cada perforación tiene una configuración diferente tal como se observa en la Figura 3.6.

3.2.2.6 Comparación entre cortina simple y cortina múltiple de inyección

Las cortinas múltiples en el tratamiento con inyecciones reducen las posibilidades de dejar espacios o “ventanas” que el tratamiento con una cortina simple, la ASCE recomienda para el tratamiento de macizos rocosos para presas se requiere el uso de cortinas múltiples de tres filas, dos laterales y una central de verificación o cierre del tratamiento. Las cortinas laterales serán de orientaciones diferentes para que el tratamiento sea efectivo, junto con mezclas de inyección adecuadas.

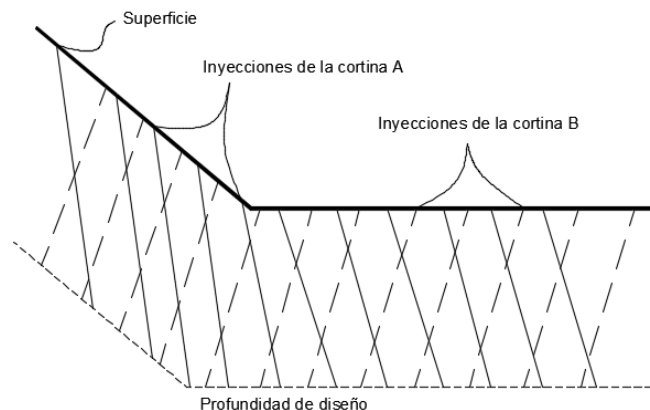


Figura 3.7. Tratamiento cortina múltiple.

Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

Con la cortina múltiple se esperan valores de permeabilidad después del tratamiento, menor o iguales a 1 Lugeon.

3.2.2.7 Inyecciones cortas complementarias

Durante la ejecución del tratamiento con inyecciones se debe contemplar de tratamientos adicionales en sectores de roca muy fracturada, en zonas de falla y discontinuidades muy abiertas y/o con rellenos de arcilla que por lo general se encuentra en la superficie del terreno entre 0 y 5 m de profundidad.

Estas inyecciones cortas complementarias servirán para dos propósitos:

- Reemplazar o mejorar las propiedades físicas de los rellenos en las discontinuidades, ya que estos son de naturaleza erosionable y es probable que generen conductos preferenciales de agua.
- Proporcionar un mejoramiento del macizo en la superficie, lo cual genera estabilidad en las perforaciones para inyección en la superficie del macizo.

Las inyecciones cortas complementarias, se utilizan en lugares donde la superficie del macizo está muy meteorizada o fracturada, generalmente estar en horizontes de meteorización IC (Véase Figura 2.14), donde el movimiento de los equipos de perforación e inyección sobre la superficie puede afectarla. Sin embargo, para casos prácticos es apropiado utilizar concreto de regulación o pobre en la superficie. Las inyecciones cortas suelen ser de una sola cortina, separadas cada 0,9 m y tener una profundidad de 0,9 m.

3.2.2.8 Galerías de inyección

Estas obras subterráneas son excavaciones de dimensiones pequeñas, (diámetros de 2.4 a 4.0 m), habitualmente utilizadas en el diseño de presas, para mejorar las propiedades del macizo rocoso en diferentes profundidades donde está apoyada la presa.



Fotografía 3.2. Excavación de galería de inyección y drenaje.
Fuente del autor.

El uso de galerías de inyección en macizos rocosos y cimentación de presas, ofrece las siguientes ventajas:

- Se pueden ejecutar los tratamientos normalmente en condiciones extremas de clima, como el invierno y las tormentas, sin tener las preocupaciones de estas en el exterior, los peligros de seguridad que conlleva realizar los trabajos y evitar la ineficiencia de las operaciones bajo estas condiciones.
- Los trabajos de inyección se ejecutan ininterrumpidamente, ya que no interrumpe con otras operaciones en un proyecto.
- Los tiempos de ejecución de los tratamientos son más rápido que en superficie
- Se pueden usar presiones de inyección más altas, suscitando un tratamiento con inyecciones más efectivo y, consecuentemente, reduciendo la cantidad de perforación requerida.
- La perforación e inyección del tratamiento se pueden realizar en una o más profundidades, lo que disminuye la desviación de las perforaciones, al tener perforaciones más cortas si se compara con tratamientos realizados desde la superficie y principalmente reduce el costo de tratar las zonas permeables que se pueden encontrar en esas profundidades.
- Las galerías de inyección proporcionan acceso a las inyecciones, en obras civiles cimentadas en macizos rocosos que requieren de mejoramiento o reforzamiento de trabajos existentes, en aquellos casos en que se considere necesario.
- Las galerías de inyección proporcionan acceso dentro del macizo para realizar inspección y para perforar drenajes y bajar las presiones hidrostáticas en el macizo rocoso.

Las galerías de inyección permiten monitorear y controlar el flujo de filtraciones, observando la cantidad de material que sale de las filtraciones.

3.2.2.9 Inyecciones de consolidación

Las inyecciones de consolidación es el tratamiento ejecutado aguas abajo del tratamiento principal o inyecciones para mejorar las propiedades mecánicas del macizo en zonas de taponés y muros en obras subterráneas. El propósito principal de las inyecciones de consolidación es fortalecer el macizo rocoso para mejorar las propiedades mecánicas para reducir las fisuras que se puedan crear en el macizo por cargas impuestas encima

del macizo. Estas inyecciones se diseñan en un patrón geométrico. Sin embargo, según las condiciones geológicas, puede ser más apropiado y conveniente diseñar las inyecciones en cortinas paralelas al tratamiento principal. Al igual que el tratamiento principal es adecuado perforar e inyectar según la orientación de las discontinuidades existentes para mejorar la probabilidad de alcanzar las discontinuidades y sean intersecadas por las perforaciones para inyección. Se debe especificar en el diseño del tratamiento de inyecciones adicionales para intersectar discontinuidades potencialmente abiertas, zonas de falla y otros defectos geológicos que no se consideraron en diseño y se detallaron durante la ejecución del tratamiento. Se aclara que las inyecciones en macizos rocosos son diferentes a las inyecciones de consolidación en suelos.

3.2.3 U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation

3.2.3.1 Localización de la cortina de inyección

El criterio de localización de la cortina de inyección para presas, depende del tipo de presa construida en la parte impermeable de la presa, para reducir los gradientes y mejorar las condiciones geológicas debajo de la presa. El Bureau of Reclamation recomienda las siguientes pautas generales para ubicar una cortina de inyección en una presa con núcleo impermeable:

- Si la cortina de inyección se coloca más cerca del extremo de la presa aguas arriba del núcleo, entonces pueden existir gradientes altos desde el núcleo del terraplén hasta la base de la presa.
- Si la cortina de inyección se coloca más cerca del extremo inferior del núcleo impermeable, entonces pueden existir gradientes altos desde la base hasta el núcleo.
- La ubicación de la cortina de inyección debe estar en o hacia arriba del eje de la presa.

Al ubicar la cortina de inyección, una de las consideraciones más importantes es la posibilidad de tener gradientes altos en el contacto del relleno y la cimentación, si la roca es permeable. Se deben considerar las implicaciones de los gradientes altos en la base del núcleo y el potencial de deterioro de los materiales del núcleo de la presa en esta área. Para mejorar las condiciones del macizo rocoso de fundación de la presa y reducir

el potencial de gradientes altos dentro del núcleo es recomendable utilizar inyecciones de consolidación.

Una vez establecida la ubicación, orientación y profundidad de la cortina de inyección, se deben revisar las orientaciones de las perforaciones para inyección para evitar las “ventanas”, estas pueden generar conductos preferenciales de agua a través del macizo y pueden afectar los tratamientos ya ejecutados y los materiales del relleno de la presa. La Figura 3.8, muestra una ilustración simplificada del cambio de orientación de las perforaciones para inyección creando una ventana en el tratamiento.

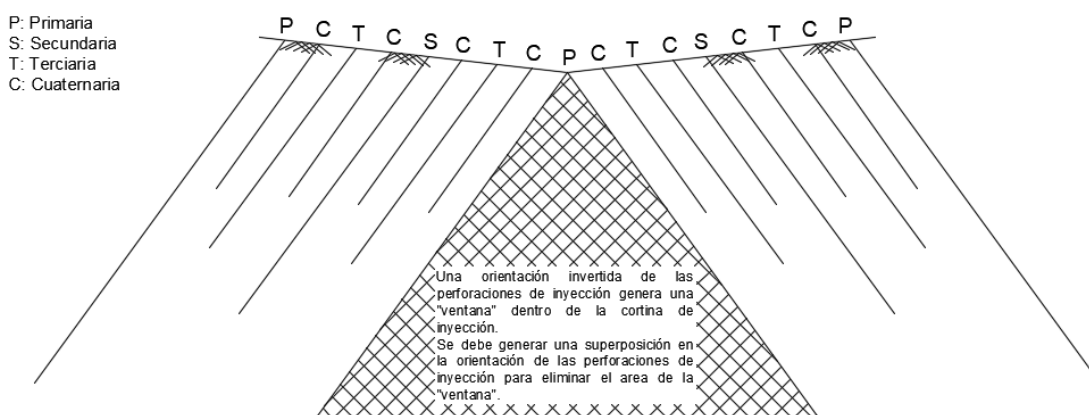


Figura 3.8. “Ventana” en la cortina de inyección por cambio de orientación de las perforaciones de inyección.

Adaptado de “*Design Standards No. 13 Embankment Dams*” de *U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation*. (2014).

3.2.3.2 Profundidad de la cortina de inyección

La profundidad de la cortina de inyecciones para presas se define según el *Bureau of Reclamation*, aproximadamente entre 0.5 y 1.0 veces la cabeza hidráulica que estará encima del macizo rocos. Sin embargo, la profundidad del tratamiento se selecciona según las condiciones geológicas del sitio, las condiciones regionales del agua subterránea, los resultados de las pruebas de permeabilidad, los posibles mecanismos de falla relacionados, las necesidades de operación y mantenimiento de la obra civil y los análisis de filtración antes y después del tratamiento.

El *Bureau of Reclamation* recomienda que una vez seleccionada la profundidad del tratamiento, esta puede disminuir gradualmente dependiendo de las tomas de inyección

conforme avanza la ejecución del tratamiento, desde las inyecciones primarias, las secundarias y sucesivamente hasta obtener el cierre de la cortina.

En obras subterráneas, según los criterios adoptados en la construcción de Hidroeléctricas en Colombia (Gutiérrez 2015), la profundidad de las inyecciones equivale a dos (2) veces del diámetro de excavación del túnel. Para la profundidad de inyecciones de consolidación equivalen a un (1) diámetro de la excavación del túnel.

3.2.3.3 Presión de inyección

El estado del arte de los tratamientos con inyección recomienda inyectar el macizo rocoso con la mayor cantidad de volumen de inyección a una presión permitida sin causar levantamiento, movimiento en superficie, fracturamiento de la roca y que la inyección no “viaje” más allá de lo diseñado. En general la presión máxima recomendada por el *Bureau of Reclamation* es de 1.0 lb/pul²/pie de profundidad medida desde la superficie hasta el *packer*, más la presión de los niveles freáticos y agua en superficie.

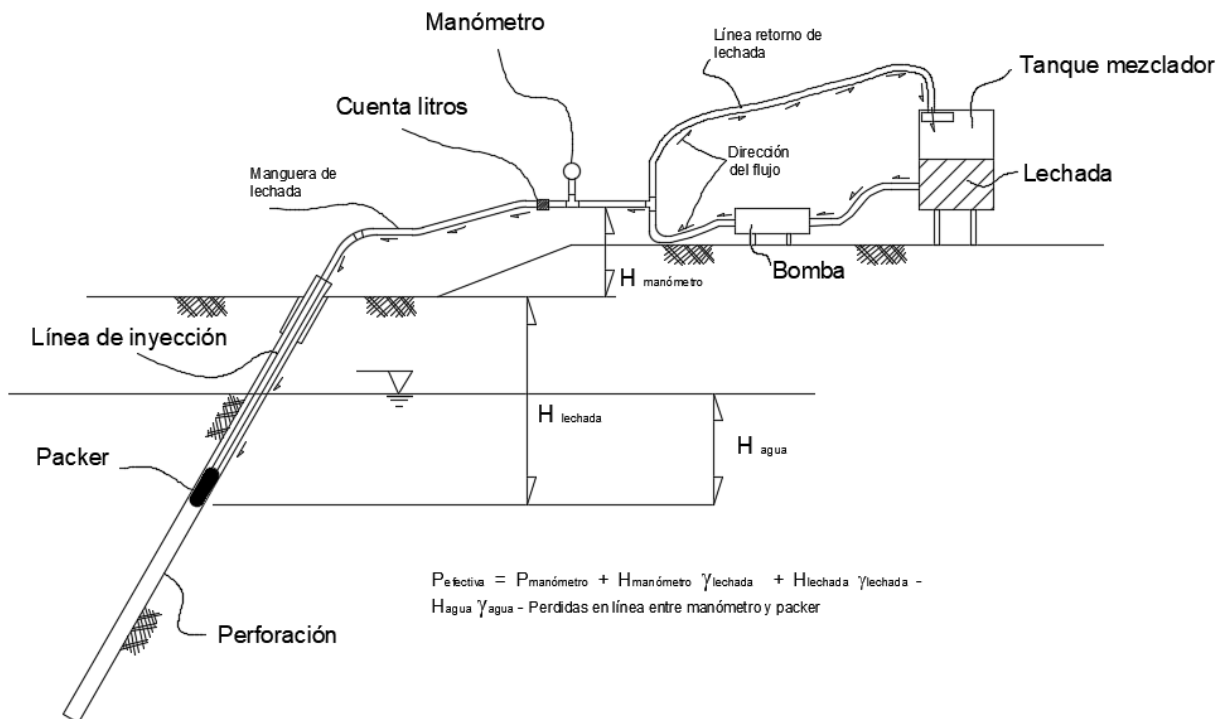


Figura 3.9. Estimación de presión efectiva en la etapa de inyección. Adaptado de “*Design Standards No. 13 Embankment Dams*” de *U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation*. (2014).

Durante la inyección es importante registrar las presiones de inyección por medio de manómetros, para controlar las presiones máximas y evitar los efectos explicados anteriormente, para esto se deben instalar por lo menos dos manómetros para monitorear y regular las presiones y así obtener tomas de inyección adecuadas para determinada etapa de inyección.



Fotografía 3.3. Manómetro de inyección utilizado en tratamiento de inyección.
Fuente del autor.

3.2.3.4 Métodos de inyección

Los métodos de inyección sugeridos por el Bureau of reclamation, son los siguientes: método de etapa simple, método descendente y método ascendente.

Etapa simple

El método de inyección en una sola etapa consiste en inyectar perforaciones poco profundas ($\pm 6,0$ m) en macizos rocosos poco fracturados en superficie.

Inyección ascendente

La inyección se ejecuta con etapas predeterminadas a cualquier profundidad. La inyección ascendente consiste en perforar el macizo rocoso para inyección hasta la profundidad máxima (diseño), luego lavar la perforación hasta que no salgan partículas, en seguida se colocar el *packer* en la parte superior de la etapa más baja, se realiza la inyección hasta alcanzar el rechazo y se pasa a la siguiente etapa superior, así sucesivamente hasta la superficie.

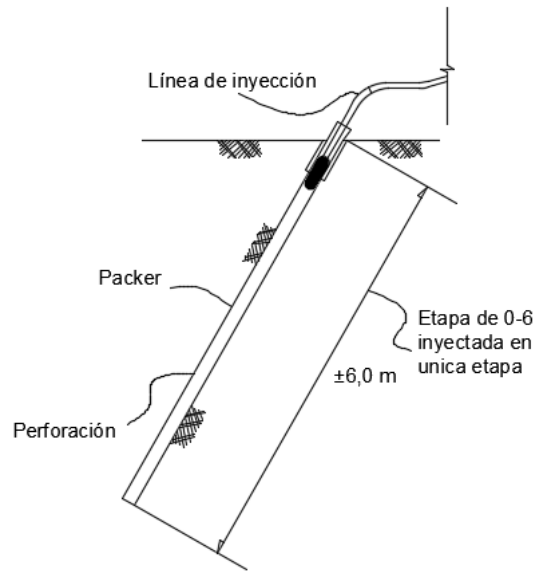


Figura 3.10. Etapa simple de inyección.
Adaptado de “*Design Standards No. 13 Embankment Dams*” de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

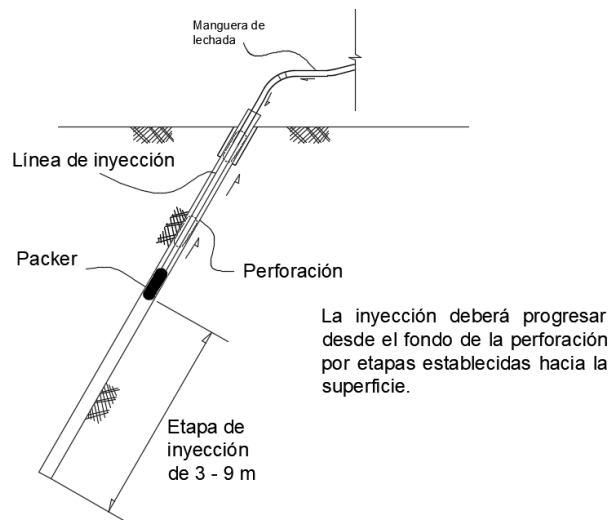


Figura 3.11. Método de inyección ascendente.
Adaptado de “*Design Standards No. 13 Embankment Dams*” de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

Inyección descendente

El proceso de inyección descendente, se realiza desde la parte superior hacia abajo, perforando e inyectando una etapa de inyección a la vez. Una vez se perfora y se inyecta la primera etapa se deja fraguar la mezcla de inyección lo suficiente en el macizo, luego

se reperfora la etapa ya inyectada y se continua a la siguiente etapa inferior y así sucesivamente hasta alcanzar la profundidad de diseño.

Debido a que este método debe perforarse varias veces, este método es más costoso que la inyección ascendente. Por esta razón el *Bureau of Reclamation* solo la recomienda si se encuentran condiciones deficientes (como cavidades, fugas durante la inyección, perdida de la perforación por derrumbes, entre otros) dentro de la perforación para la inyección. La Figura 3.12, ilustra el método de inyección descendente.

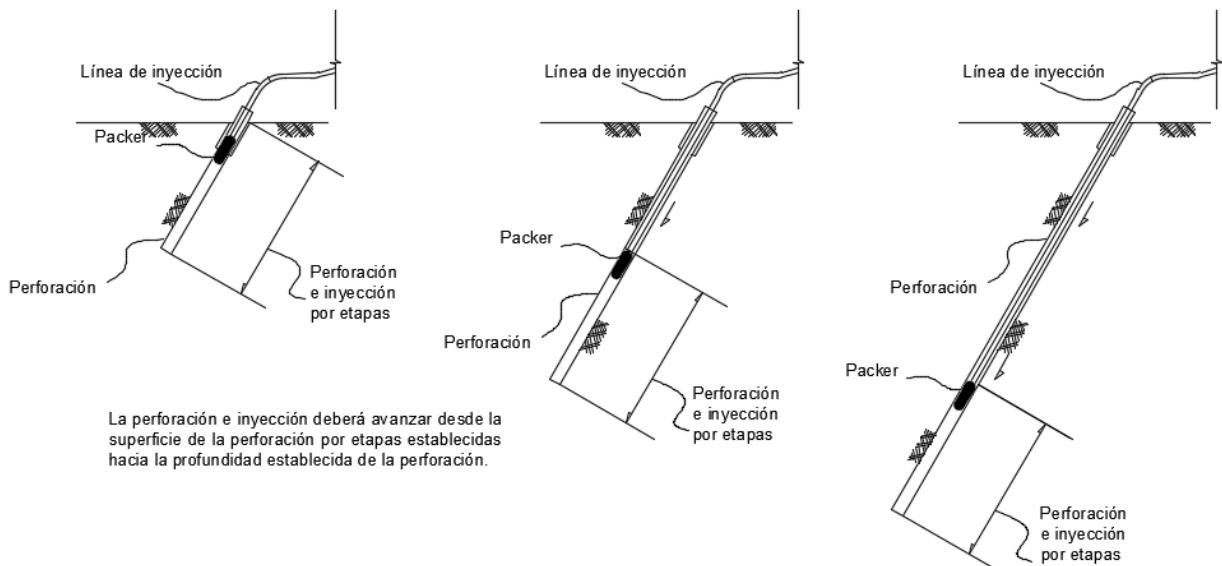


Figura 3.12. Método de inyección descendente.
Adaptado de “*Design Standards No. 13 Embankment Dams*” de *U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation*. (2014).

3.2.3.5 Longitud de etapa de inyección

El *Bureau of Reclamation* recomienda longitudes de etapa más cortas cerca de la superficie y longitudes de etapa más largas a mayor profundidad. A medida que la presión de inyección incrementa con la profundidad las longitudes de etapa también lo harán. La longitud de etapa de inyección en superficie se limita entre 0.0 a 3.0 m. A una profundidad de entre 3.0 a 30.0 m, la longitud de cada etapa se limita a 6.0 m. Entre las profundidades de 30.0 y 70.0 m, la longitud de cada etapa se limita a 9.0 m. A profundidades superiores de 70.0 m, se pueden usar longitudes de inyección ascendente de 12.0 m. En condiciones

de roca meteorizada o fracturada, las longitudes de la etapa en profundidad pueden reducirse según sea necesario.

3.2.3.6 Distancia entre perforaciones inyección y criterio de cierre

Inyección a espacio dividido

El *Bureau of reclamation* recomienda el método de espacio dividido para obtener el cierre del tratamiento en macizos rocosos. La inyecciones a espacio dividido se dividen en patrones de cierre de 25.0 m de separación entre perforaciones primarias medidos perpendicularmente del centro la perforación a la otra. Consta de inyecciones primarias (P), secundarias (S), terciarias (T) y cuaternarias (C). La separación entre perforaciones primarias de 25.0 m disminuye la posibilidad de comunicación de la inyección a las perforaciones primarias adyacentes durante la inyección.

La Figura 3.13, muestra el diseño de las perforaciones para inyección primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria.

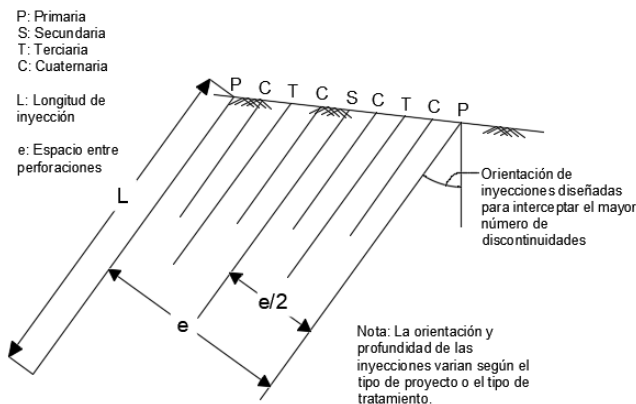


Figura 3.13. Espaciamento y profundidad de inyecciones.

Adaptado de “*Design Standards No. 13 Embankment Dams*” de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

El método de inyección a espacio dividido inicia con la perforación e inyección de las perforaciones primarias. Al completar la inyección de las perforaciones primarias dentro del patrón de cierre, la perforación secundaria se perfora e inyecta a la mitad de la distancia entre las perforaciones primarias. Al completar la inyección de las perforaciones secundarias dentro del patrón de cierre, la perforación terciaria se perfora e inyecta a la mitad de la distancia entre la perforación primaria y secundaria. Luego, las perforaciones cuaternarias se perforan e inyectan a la mitad de la distancia entre las perforaciones

primarias, secundarias y terciarias. Para algunos casos es necesario agregar perforaciones al patrón (quinarias, sexagenarias, septenarias, etc.), según los criterios de toma del tratamiento.

Con este método de inyección, los resultados de las pruebas Lugeon y la toma de inyección deberían disminuir a medida que se reduce el espacio entre perforaciones. Las mezclas de cemento óptimas, utilizadas por el *Bureau of Reclamation*, serán más delgadas o con relaciones de A: C más altas en la inyección de las perforaciones primarias que las inyecciones de los siguientes niveles, donde no se requiere que la inyección “viaje” más allá de lo necesario. La experiencia del *Bureau of Reclamation* en tratamientos con inyecciones en macizos rocosos ha demostrado que las inyecciones primarias pueden tomar entre el 55% y 70% del volumen total de las inyecciones, las perforaciones secundarias pueden tomar entre el 10% y 30% del volumen total de las inyecciones, las inyecciones terciarias pueden tomar del 5% al 20% del volumen total y las inyecciones cuaternarias pueden tomar entre el 0% y 5% del volumen total. Las inyecciones adicionales pueden representar menos del 1% del volumen total. En caso de tener tomas altas entre las inyecciones terciarias y cuaternarias se debe realizar una evaluación del sitio para determinar la causa y tomar las medidas preventivas necesarias.

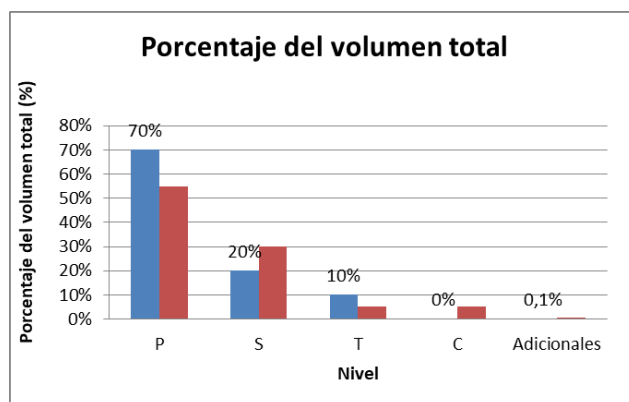


Figura 3.14. Distribución de porcentaje del volumen de inyección en diferentes niveles.
Fuente del autor.

Pruebas de agua en las perforaciones para inyección

El *Bureau of Reclamation* recomienda que antes de realizar el tratamiento con inyecciones, deben realizarse pruebas con agua con la misma presión de la etapa correspondiente, el *Bureau of Reclamation* utiliza los resultados de las pruebas de agua

para determinar si es necesaria inyección en la etapa. La experiencia del *Bureau of Reclamation* ha demostrado que si una etapa "toma" menos de 30 litros de agua de agua durante un período de prueba de 5 minutos, es probable que la etapa tome poco o nada durante la inyección.

En caso de tener tomas bajas durante la inyección y tomas medias a altas (30 – 60 litros) durante las pruebas de agua, puede haber comunicación entre perforaciones, entre sistemas de discontinuidades u otros factores que el tratamiento no alcanzo durante la inyección.

3.2.3.7 Rechazo de etapa

El *Bureau of Reclamation* recomienda terminar el proceso de inyección cuando:

- La tasa de flujo de inyección sea menor a 30 litros en 20 minutos (1.5 l/min) con presiones de hasta 3.45 bar (50 psi).
- La tasa de flujo de inyección sea menor a 30 litros en 15 minutos (2.0 l/min) con presiones entre 3.45 bar (50 psi) y 6.89 bar (100 psi).
- La tasa de flujo de inyección sea menor a 30 litros en 10 minutos (3.0 l/min) con presiones entre 6.89 bar (100 psi) y 17.24 bar (250 psi).
- Cuando en cualquier etapa se inyecten menos de dos (2) sacos de cemento por hora durante una inyección continúa durante 2 horas, es decir aproximadamente una tasa de inyección de 1,67 l/min durante 2 horas, se podrá suspender el proceso de inyección.

En caso de tener cortina múltiple los criterios de cierre en las cortinas laterales (aguas arriba y aguas abajo), serán el doble del especificado anteriormente:

- La tasa de flujo de inyección sea menor 3.0 l/min con presiones de hasta 3.45 bar (50 psi).
- La tasa de flujo de inyección sea menor 4.0 l/min con presiones entre 3.45 bar (50 psi) y 6.89 bar (100 psi).
- La tasa de flujo de inyección sea menor a 6.0 l/min con presiones entre 6.89 bar (100 psi) y 17.24 bar (250 psi).
- Cuando en cualquier etapa se tiene una tasa de inyección de 3.34 l/min durante 2 horas, se podrá suspender el proceso de inyección.

3.2.3.8 Criterios de cierre del proceso de inyección

El *Bureau of Reclamation* utiliza la cantidad total de volumen inyectado en cada etapa para determinar los criterios de cierre del patrón de inyección. El criterio de cierre para una cortina simple de inyección, es de 1.64 sacos/m. En caso de tolerar alguna filtración, el criterio de cierre es de 3.3 sacos/m.

En caso de tener cortina múltiple los criterios de cierre en las cortinas laterales (aguas arriba y aguas abajo), serán el doble del especificado anteriormente: 3.28 sacos/m.

Para una cortina simple de inyección o una cortina central (múltiple), la profundidad final de las perforaciones siguientes a las primarias dependerán de las tomas durante la ejecución del tratamiento. La profundidad de las perforaciones primarias se realizarán hasta lo especificado en diseño, las profundidades de las perforaciones secundarias dependerán de las tomas obtenidas del nivel anterior y así sucesivamente con los siguientes niveles.

El *Bureau of Reclamation* proporciona una guía para determinar las profundidades de una perforación de inyección secundarias entre dos inyecciones primarias:

- Al completar las inyecciones primarias adyacentes, la inyección secundaria dentro de un patrón de cierre debe extenderse hasta la profundidad de diseño o hasta la etapa con toma mayor a 1.64 sacos/m.
- La mayor de las dos profundidades se selecciona en el sitio para la perforación e inyección secundaria.
- La Figura 3.15, muestra un ejemplo para determinar la profundidad de las inyecciones secundarias.

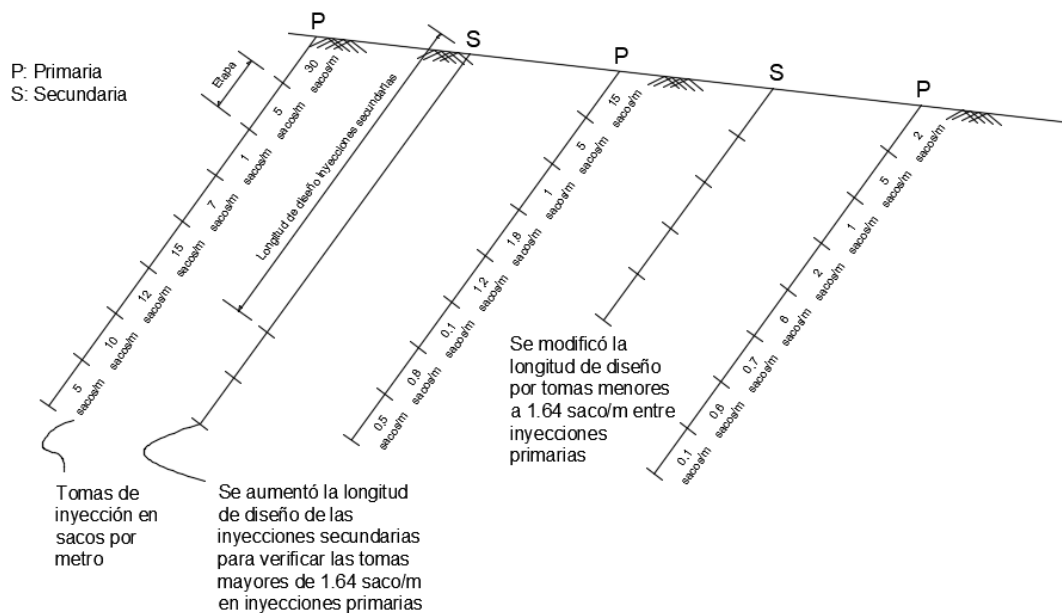


Figura 3.15. Criterios de cierre para inyecciones a espacio dividido.
Adaptado de "Design Standards No. 13 Embankment Dams" de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

El *Bureau of Reclamation* proporciona una guía para determinar las profundidades de una perforación de inyección terciaria entre dos inyecciones secundarias:

- Al completar las inyecciones primarias y secundarias, las inyecciones terciarias deben extenderse hasta la profundidad de diseño o la etapa más baja (o más baja, según la geología) en la que una inyección secundaria adyacente tenga tomas de inyección superiores a 1.64 sacos/m.
- La mayor de las dos profundidades se selecciona en campo para la perforación e inyección terciaria.

La siguiente información proporciona orientación para determinar las profundidades de las inyecciones cuaternarias:

- Al completar las inyecciones primarias, secundarias y terciarias, las inyecciones cuaternarias deben extenderse hasta la profundidad de diseño o hacia la etapa más baja (o más baja, según la geología) en la cual inyección terciaria adyacente tuvo una toma mayor a 1.64 sacos/m.
- La mayor de las dos profundidades se selecciona en campo para la perforación e inyección cuaternaria.

Si las inyecciones cuaternarias registran toma superior a 1.64 sacos/m, se agregaran perforaciones adicionales a espacio dividido hasta obtener tomas menores a 1.64 sacos/m.

En caso de requerir niveles superiores a los quinarios, las inyecciones adicionales (sexagenarias y septenarias), se debe considerar ubicarlas aguas arriba o aguas abajo de la cortina, por el poco espacio que quedaría entre perforaciones.

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL TRATAMIENTO

3.3.1 Orientación de las perforaciones para el tratamiento.

El principal objetivo del tratamiento con inyecciones es interceptar tantas discontinuidades como sea posible. Si las discontinuidades son verticales y horizontales, la orientación de las perforaciones debe orientarse de tal forma que atraviese la mayor parte de las discontinuidades.

Cuando se tienen discontinuidades verticales y horizontales y se perfora verticalmente, se podrían pasar por alto muchas de estas discontinuidades, y por lo tanto, no sería un tratamiento eficiente como en el caso de tener perforaciones orientadas.

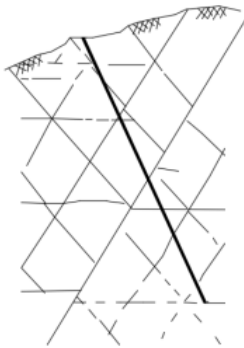


Figura 3.16. Perforación intersectando varias discontinuidades. Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houlsby, A.C. (1990).

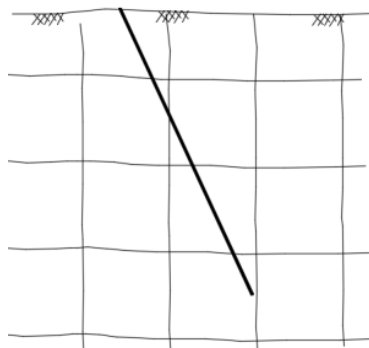


Figura 3.17. Perforación intersectando discontinuidades verticales y horizontales. Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houlsby, A.C. (1990).

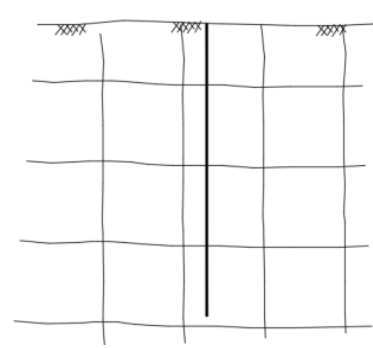


Figura 3.18. Perforación sin intersectar las discontinuidades. Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houlsby, A.C. (1990).

En caso de tener discontinuidades abiertas y con mayor continuidad que otras familias, se debe dar prioridad a estas para tratarlas desde el inicio del tratamiento.

Cuando el macizo rocoso está muy fracturado y las discontinuidades están muy cerca una a la otra, se requieren perforaciones verticales para que el tratamiento se realice efectivamente y viaje a través de este, incluso si la orientación de estas discontinuidades son verticales.

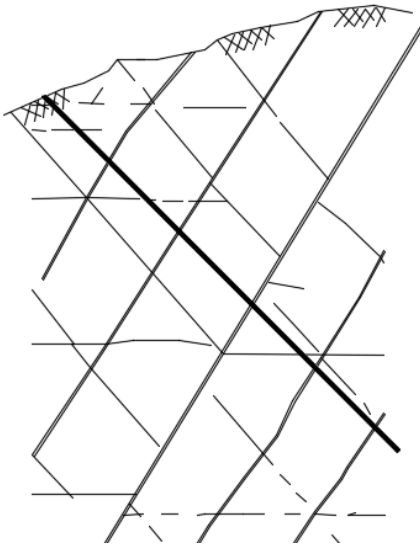


Figura 3.19. Perforación intersectando las discontinuidades abiertas.

Adaptado de “*Construction and design of cement grouting*” de Houlby, A.C. (1990).

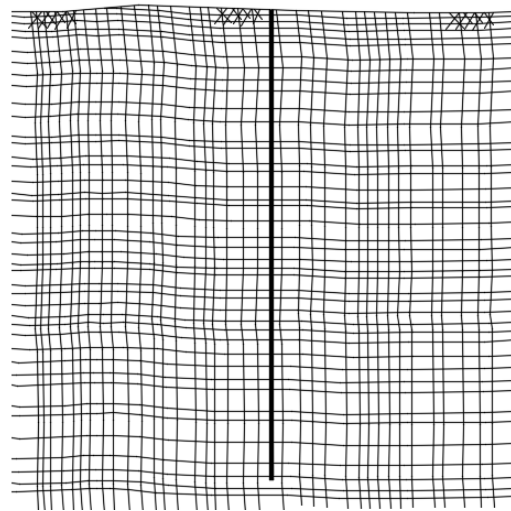


Figura 3.20. Perforación vertical utilizada en macizos rocosos muy fracturados atravesando gran parte de las discontinuidades abiertas.

Adaptado de “*Construction and design of cement grouting*” de Houlby, A.C. (1990).

Según A.C. Houlby, sugiere que la orientación más adecuada para tratar discontinuidades verticales y horizontales es de 30° desde la vertical.

La orientación de las perforaciones para el tratamiento de inyección, debe tener en cuenta las limitaciones de los equipos de perforación, como por ejemplo en caso de perforar sobre una superficie horizontal y el equipo utilizado solo puede inclinarse hasta 45° desde la horizontal.

En el caso de tratamientos desde túneles y superficies empinadas, pueden ser necesarias diferentes orientaciones (Véanse Figura 3.3 y Figura 3.6), como en las zonas de falla, en sectores específicos, entre otros, estas perforaciones deben acoplarse según los requerimientos necesarios.

Para el diseño de la orientación de las perforaciones para el tratamiento con inyecciones requiere de la experiencia de un diseñador, el cual decide la orientación de las perforaciones observando las discontinuidades visibles en el sitio, desde afloramientos o sitios sin capa vegetal, realizando celdas geotécnicas.

En caso de no tener experiencia en el diseño de tratamientos con inyecciones, se siguen las siguientes pautas para la orientación de las perforaciones sugeridas por Housby, A.C. (1990):

- Revisar la información geológica disponible del sitio del proyecto. Indicando la orientación de las discontinuidades y las condiciones físicas de estas.
- Con la ayuda de estereogramas se identifican las discontinuidades principales y se orientan las perforaciones para que las atraviesen perpendicularmente.
- Tener en cuenta la orientación de las obras geotécnicas como: orientación de la presa, orientación del túnel, y la orientación de cualquier estructura.

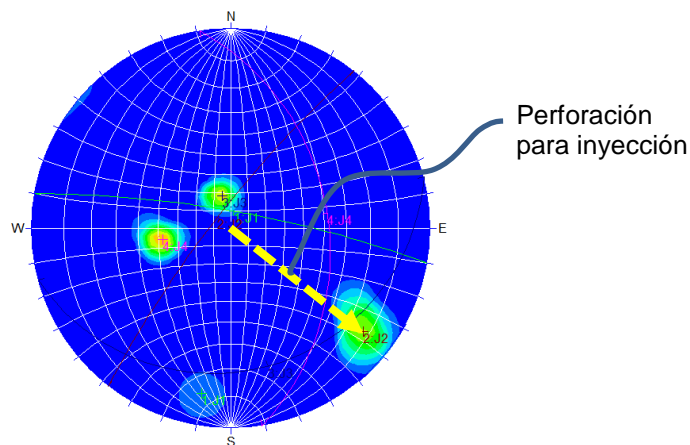


Figura 3.21. Estereograma con familia de discontinuidades.
Fuente del autor.

Esta representación se visualiza como un rango de buzamientos de discontinuidades atravesadas por la perforación.

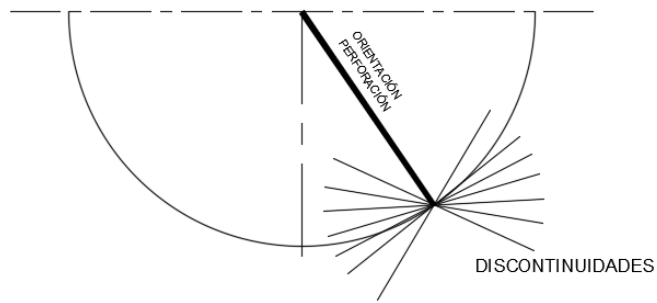


Figura 3.22. Perforación para inyección representada en un plano del estereograma atravesando una familia de discontinuidades.

Adaptado de “*Construction and design of cement grouting*” de Housby, A.C. (1990).

- En caso que la orientación de la perforaciones no atraviese las discontinuidades, existen dos posibles tratamientos:
 - Orientar la cortina de inyecciones en dirección a las discontinuidades. Sin embargo, el rango de intersecciones es menor a la intersección con perforaciones orientadas hacia las discontinuidades.
 - Orientar las perforaciones hacia afuera del plano de la cortina de inyección. La perforación se orientaría directamente hacia las discontinuidades principales, generando un mejor tratamiento.

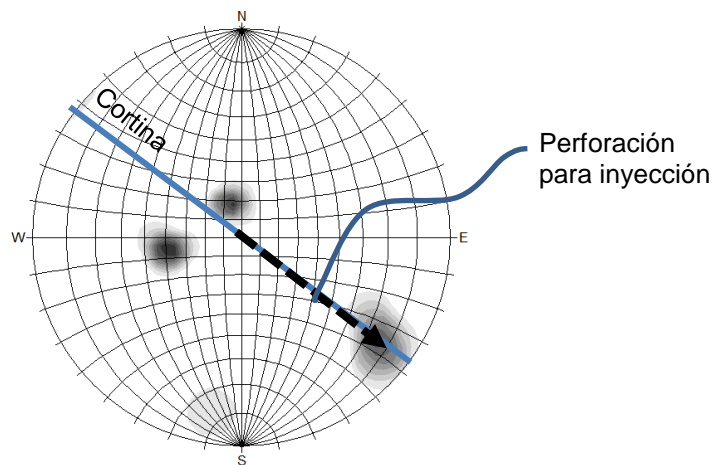


Figura 3.23. Familia de discontinuidades en dirección a la cortina de inyecciones.

Fuente del autor.

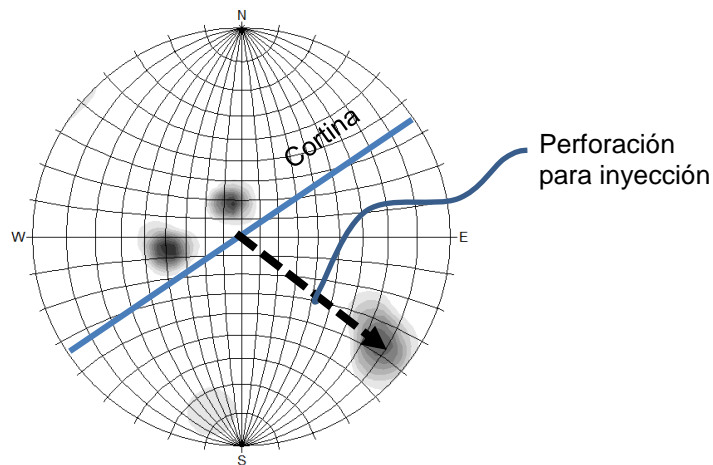


Figura 3.24. Familia de discontinuidades en dirección diferente a la cortina de inyecciones.
Fuente del autor.

La elección de estas alternativas depende de la posición de las discontinuidades, para el ejemplo se orientaron las perforaciones hacia la mayor familia de discontinuidades. Para este ejemplo la orientación de las perforaciones sería ineducada para las demás familias, por lo que sería razonable el uso de perforaciones verticales y orientar la cortina de inyecciones a través de las diferentes familias para que las atravesase el tratamiento.

Las anteriores pautas pueden ser molestas, para alguien que las revise por primera vez. Sin embargo, el estudio de las orientaciones de las perforaciones aparte de revisar las familias de discontinuidades del macizo rocoso, debe tener en cuenta otros factores, como son las limitaciones de los equipos de perforación y la facilidad de realizar las perforaciones desde el sitio que se plantee.

Luego de orientar las perforaciones para el tratamiento en diferentes sitios del proyecto, es necesario adecuarlas para realizar un diseño funcional de una cortina de inyecciones, para esto se requiere que la cortina de inyecciones tenga diferentes orientaciones a lo largo del macizo rocoso, las cuales se deben orientar gradualmente para que no queden pasos preferenciales de agua a través de la cortina.

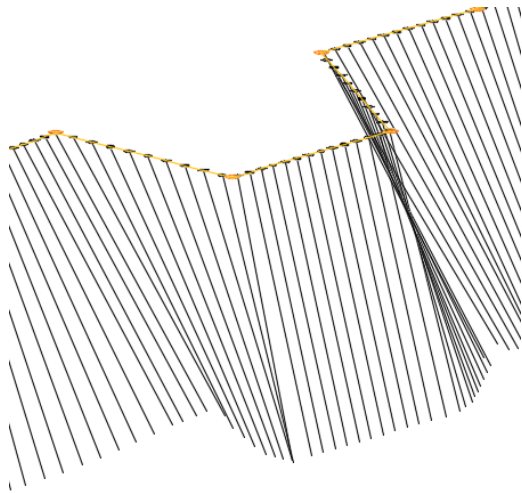


Figura 3.25. Orientación de perforaciones para inyección vista isométrica NE.

Fuente del autor.

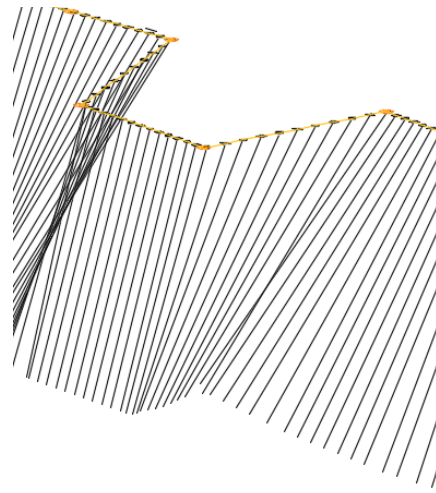


Figura 3.26. Orientación de perforaciones para inyección vista isométrica SE.

Fuente del autor.

Con este método las discontinuidades verticales son atravesadas adecuadamente, aunque las longitudes de perforación son mayores que las longitudes de perforaciones verticales, esta longitud adicional es compensada con un mejor tratamiento de las discontinuidades.

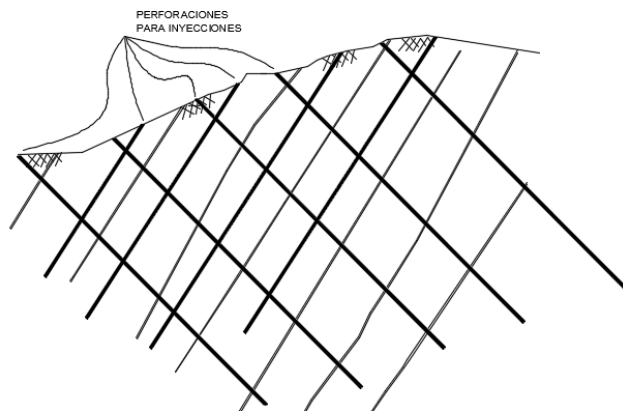


Figura 3.27. Perforaciones para inyección cruzadas para reforzar sectores específicos.

Fuente del autor.

Al cruzar la orientación de las perforaciones a lo largo del macizo rocoso proporciona un tratamiento adicional a las zonas de falla, identificadas en los estudios geológicos iniciales

y durante construcción. Una guía para identificar una zona de falla es realizar perfiles a través de la obra y observar las depresiones topográficas o las zonas de quebradas, las cuales son posiblemente zonas de falla, donde el paso del agua ha erosionado el sector por ser una zona de resistencia menor, estos sectores requieren especial atención en el diseño y durante ejecución del tratamiento.

3.3.1.1 Orientaciones especiales de las perforaciones

Durante el diseño del tratamiento de inyecciones, la orientación de las perforaciones tienen que tener en cuenta el cambio de dirección de la cortina en una superficie ondulada o escalonada, igualmente se debe tener en cuenta las obras civiles alrededor del tratamiento, como lo son túneles, pozos y otras estructuras que deben ser evitadas o tenidas en cuenta en la orientación de las perforaciones. Aparte de las condiciones geológicas y geotécnicas, existen diferentes situaciones que pueden complicar el diseño, las cuales deben tenerse en cuenta durante el diseño.

Para estos casos el diseñador debe tener bien desarrollado el sentido de la geometría tridimensional para tener en cuenta todas las variables en el espacio. Un método sugerido por A.C. Houlby, para verificar las intersecciones entre los planos de la cortina de inyecciones y las estructuras (geológicas y civiles), diseñando las orientaciones de las perforaciones siguiendo la topografía y la geología es el uso de contornos de la cortina. El método consta de dibujar en vistas de perfil, planta y secciones transversales, las elevaciones hasta donde llega la profundidad de la cortina. Para tener una imagen más clara de los planos y las posiciones de las perforaciones y observar los sectores donde se pueden cambiar y ajustar donde sea necesario para cumplir con los objetivos del tratamiento. También se pueden revisar las diferentes orientaciones y vistas de las perforaciones y estructuras con la ayuda de sistemas de diseño asistidos por computadora (CAD) para facilitar la observación de diferentes puntos de vista de las orientaciones.

Esta revisión se debe hacer incluso en el diseño de cortinas sencillas donde hay cambios en los niveles de la superficie o cambios en la orientación de la cortina.

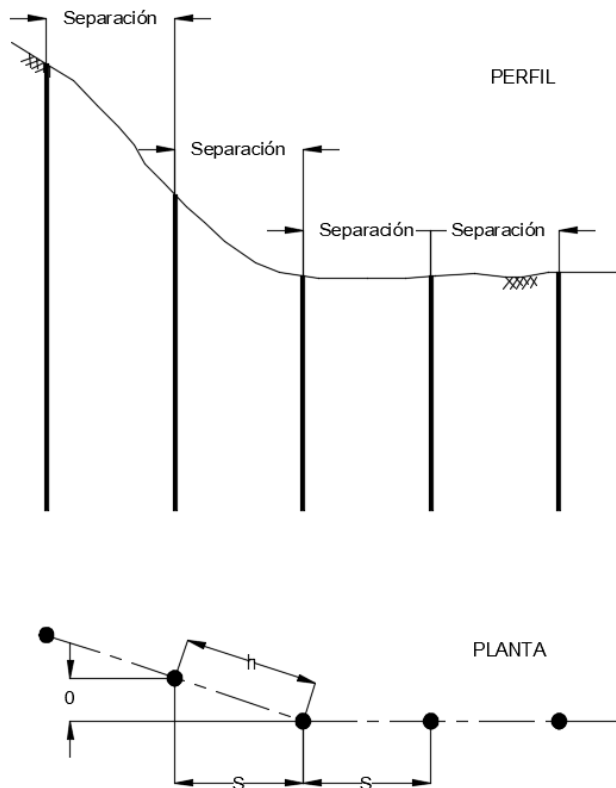


Figura 3.28. Cambios de nivel en la superficie.

Adaptado de “*Construction and design of cement grouting*” de Houlsby, A.C. (1990).

Como se observa en la Figura 3.28, las perforaciones de inyección son verticales, separadas a una distancia equivalente. Sin embargo, un cambio en la dirección de la cortina mueve algunas perforaciones a un plano diferente al requerido, de modo que el espacio requerido entre perforaciones ya no es la distancia equivalente entre las perforaciones. Este cambio no es significativo en algunos diseños, pero en algunos tratamientos de mayor precisión el espacio entre las perforaciones debe respetarse.

En una situación similar, con perforaciones orientadas hacia una misma dirección, como se muestra en la Figura 3.29, se observa en planta y perfil que el espacio entre las perforaciones tiene el mismo efecto.

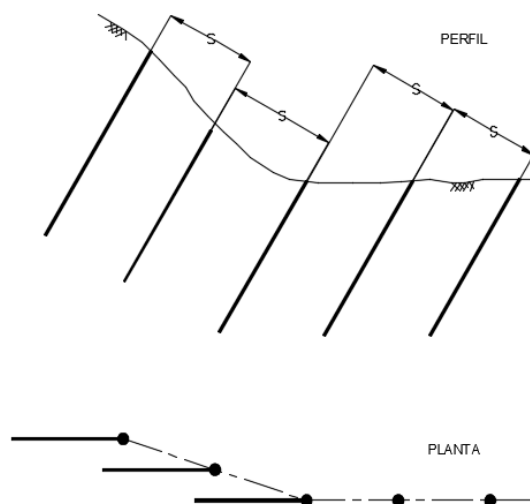


Figura 3.29. Cambios de nivel en la superficie en perforaciones orientadas.
Adaptado de “*Construction and design of cement grouting*” de Houlsby, A.C. (1990).

En la Figura 3.29, la separación entre perforaciones se mide horizontalmente, para evitar medir con las pendientes, en los planos de construcción se debe mostrar las distancias entre perforaciones a intervalos iguales en la superficie donde se ejecuta el tratamiento, sin tener en cuenta la pendiente del terreno. No obstante, esta situación produce distancias desiguales entre las perforaciones al subir y bajar en la superficie. En tratamientos complejos, donde no se tienen los niveles finales de superficies, puede ser mejor mostrar la distancia entre perforaciones normal a la superficie en lugar que horizontalmente.

La solución a este problema de orientación de las perforaciones es especificar, en los planos de construcción, el espaciamiento entre las perforaciones en los sectores donde hay cambios de nivel y cambios de dirección.

Para el caso de perforaciones con dirección e inclinaciones (doblemente inclinados), es mejor indicar el espaciamiento horizontalmente y dar la resultante entre los dos ángulos de inclinación por medio de un ángulo desde el norte (Azimut). Este azimut se debe mantener cuando la cortina tiene pequeños cambios de dirección.

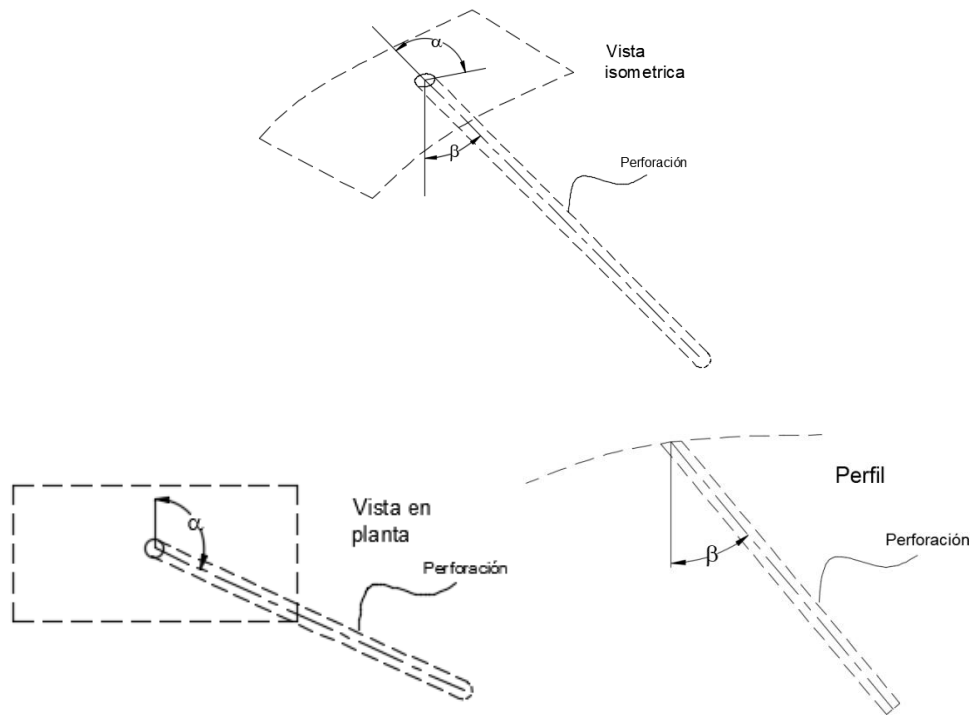


Figura 3.30. Ángulos de inclinación (α y β).
Fuente del autor.



Fotografía 3.4. Perforación direccionada para tratamiento con inyecciones en el plinto de una presa CFRD.
Fuente del autor.

3.3.2 Espaciamiento de perforaciones a espacio dividido o escalonadas (Primaria, Secundaria, Terciaria, etc.)

La separación entre las perforaciones iniciales (primarias) en la práctica común de tratamientos con inyecciones, es medida con la distancia horizontal y luego dividir ese espacio de manera equitativa en las siguientes perforaciones (secundaria, terciaria, etc).

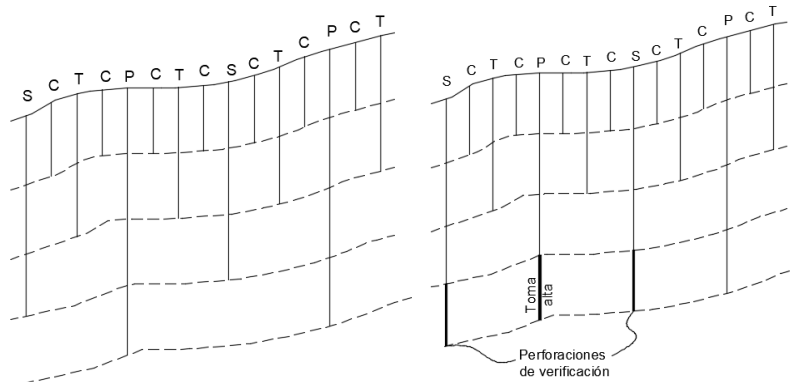


Figura 3.31. Separación y profundidad de las perforaciones para inyección requeridos en el diseño y durante el tratamiento de inyección.

Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houslyby, A.C. (1990).

Para cortinas de inyección con diferentes etapas de inyección, con profundidades recomendadas en el diseño, suelen combinar con las condiciones encontradas en la ejecución del tratamiento, observando las condiciones geológicas y las tomas altas de inyección, en cierta profundidad, para llegar a sitios donde requiere especial atención por medio de longitud adicional de perforación a las especificadas en la etapa de diseño o perforaciones adicionales en el siguiente nivel o etapa (secundario, terciario, etc), para verificar ese sector.

Conociendo que estas condiciones se pueden presentar durante la ejecución del tratamiento, se deben explicar en las especificaciones de construcción del tratamiento, esto permite variar el diseño, en los sectores donde se encuentre condiciones especiales o características inesperadas, según se considere necesario. Tal como se explicó en el numeral 2.3, una adecuada campaña de investigación y una interpretación de la información obtenida del sitio del tratamiento, conlleva a tener menos variables durante la ejecución del tratamiento.

En el diseño del tratamiento, la separación de las perforaciones, debe tener en cuenta las condiciones del macizo rocoso, como por ejemplo condiciones donde las permeabilidades

disminuyen con la profundidad y las tomas de inyección disminuyen en profundidad, estas condiciones son las comunes. En cambio en otras situaciones especiales donde las permeabilidades y tomas de inyección son altas en profundidad, requieren perforaciones adicionales para completar el tratamiento.

En las especificaciones de construcción se debe dejar los siguientes conceptos:

- Las perforaciones primarias (P) son la base de la cortina de inyección, es decir son obligatorias.
- Las perforaciones secundarias (S), es la siguiente etapa del tratamiento y deben verificar cualquier toma alta de las perforaciones primarias en ambos costados de la perforación primaria. Dependiendo de las condiciones del tratamiento pueden ser obligatorias con cierta profundidad.
- Las perforaciones terciarias (T), es la siguiente etapa del tratamiento que se encuentran a ambos costados de una perforación secundaria, la longitud de estas perforaciones pueden ser más largas que las estipuladas en los diseños, dependiendo de las tomas de las perforaciones secundarias. Al igual que las perforaciones secundarias estas perforaciones pueden ser obligatorias dependiendo de las condiciones del tratamiento.
- Las perforaciones cuaternarias (C), se requieren cuando se tiene una toma alta en una perforación terciaria y se extienden hasta la profundidad requerida a ambos costados de la perforación terciaria. En condiciones especiales pueden ser perforaciones obligatorias.
- Las perforaciones quinarias (Q) y subsiguientes (sextarias, septenarias, etc), se requieren cuando las tomas de las perforaciones anteriores son altas y deben ser verificadas con perforaciones adicionales a ambos costados.

En algunos casos las perforaciones quinarias (y subsiguientes) se requieren en condiciones especiales, cuando las perforaciones primarias se encuentren muy separadas y las condiciones del macizo rocoso se encuentren muy fracturadas.

3.3.2.1 Separación de perforaciones primarias (P)

La separación entre perforaciones primarias (P) en un tratamiento debe ser lo más regular posible para simplificar su ejecución y minimizar los errores. Las perforaciones primarias no deben estar tan cerca una de la otra para evitar que durante la inyección se conecten

entre sí; las conexiones entre perforaciones ponen en duda la efectividad del tratamiento e interfieren con la evaluación de la toma de inyección. Por otro lado, las perforaciones primarias no pueden estar tan separadas para evitar perforaciones a niveles sextarios o septenarios.

Los espacios típicos sugeridos por A.C Houlby, para las perforaciones primarias son:

- 12,0 m: en la mayoría de los casos.
- 6,0 m: donde las permeabilidades del macizo son lo suficientemente bajas para garantizar que existan pocas conexiones entre perforaciones.

Al especificar el espaciamiento entre perforaciones primarias, se tiene que tener en cuenta que el espacio debe ser divisible por cuatro para simplificar el espaciamiento de las siguientes perforaciones. Un ejemplo claro es cuando se tiene un espaciamiento de 12,0 m entre perforaciones primarias, esto quiere decir que el espaciamiento entre perforaciones a nivel cuaternario es de 1,5 m.

Generalmente, no se especifica una separación final entre las perforaciones, ya que esto limita el tratamiento adecuado intensivo en caso se encontrar una zona especial que requiere un tratamiento intensivo.

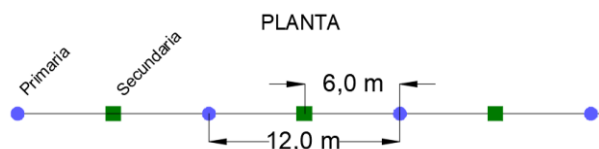


Figura 3.32. Separación a espacio dividido de perforaciones en una cortina de inyección.
Fuente del autor.

Por otro lado, durante el cierre progresivo de perforaciones a espacio dividido del tratamiento, para evitar que la separación entre perforaciones alcance separaciones absurdas, hasta que las perforaciones casi se toquen entre sí. Se recomienda para un buen cierre del tratamiento, es detener el tratamiento de la cortina cuando la separación entre las perforaciones sea hasta 0,75 m. Para verificar la toma alta entre las perforaciones separadas hasta 0,75 m, se recomienda adicionar dos perforaciones ligeramente a un lado y al otro lado de la cortina, esto refuerza el tratamiento en estos sectores especiales.

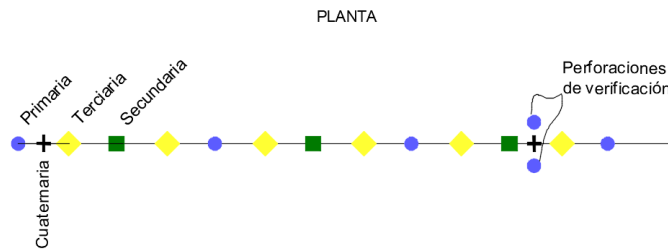


Figura 3.33. Perforaciones adicionales a lado y lado de la cortina de inyección.
Fuente del autor.

3.3.3 Cortinas múltiples

Las cortinas múltiples de tratamiento con inyecciones se requieren cuando, una sola cortina no es lo suficiente para tratar el macizo rocoso o cuando no se sabe con certeza las condiciones del sitio (pese a las investigaciones geotécnicas), donde se requiere tratar macizos rocosos de manera adecuada con diferentes cortinas de inyección. Al ejecutar cortinas de inyección adicionales, el tratamiento funciona como una única cortina pero con un mayor alcance, comparándola con una sola cortina. Estas múltiples cortinas son ideales en macizos rocosos muy fracturados y/o muy permeables.

La separación entre cortinas depende del diseño de la mezcla de inyección, conociendo su área de penetrabilidad en el terreno, por lo general la distancia o el área alcanzada por un tratamiento con inyecciones es de 1,50 m alrededor de la cortina. Sin embargo, en macizos rocosos donde las discontinuidades son muy cerradas y/o con rellenos arcillosos, macizos poco permeables, pueden ser necesarias cortinas con separaciones menores a 1,50 m.

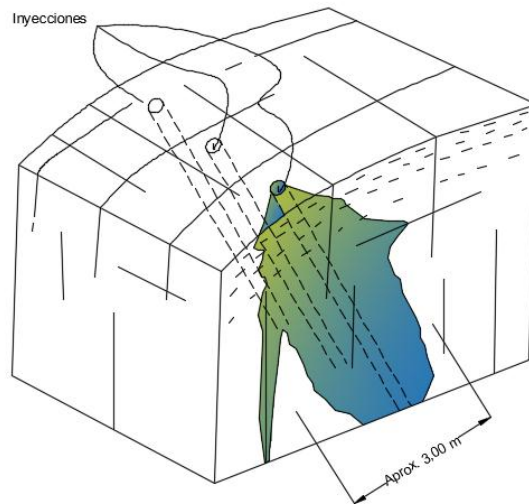


Figura 3.34. Tratamiento con inyecciones con una sola cortina.
Fuente del autor.

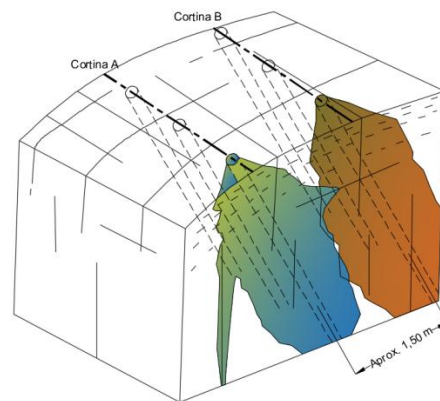


Figura 3.35. Tratamientos con inyecciones con varias cortinas.
Fuente del autor.

Según A.C Houlby (1990), la separación entre cortinas tiene que ser menor que el doble de la distancia alcanzada por el tratamiento en el macizo rocoso, véase Figura 3.35. Si no se empalman los tratamientos entre las cortinas de inyección, es posible que el efecto de generar una cortina más grande no se cumpliera y por ende no se verifiquen las condiciones esperadas en el diseño. Por ejemplo, para el caso de tratamientos con inyecciones en fundaciones para presas, si no se empalman las cortinas y forman un único tratamiento, puede crear “ventanas” o pasos preferenciales de agua en los sectores donde no se realizó empalme entre cortinas y el tratamiento no cumpla con el objetivo de mejorar las condiciones del macizo, o rellenar las discontinuidades y el flujo de agua pueda pasar más fácilmente en estas zonas deficientemente tratadas.

3.3.4 Posición de una cortina de inyecciones en presas y túneles

La posición de las cortinas para el tratamiento con inyecciones en presas y túneles depende del tipo de presa y tipo de obra subterránea, así como la geología del sector, las preferencias de diseño, y otras condiciones que puede variar el diseño de la posición de la cortina.

3.3.4.1 Presas de enrocado con núcleo de arcillas

La posición de la cortina de inyecciones en este tipo de presa debe ser máxima a un tercio de la distancia entre el eje de la presa y el extremo del relleno en arcilla tal como se detalla en la Figura 3.36.

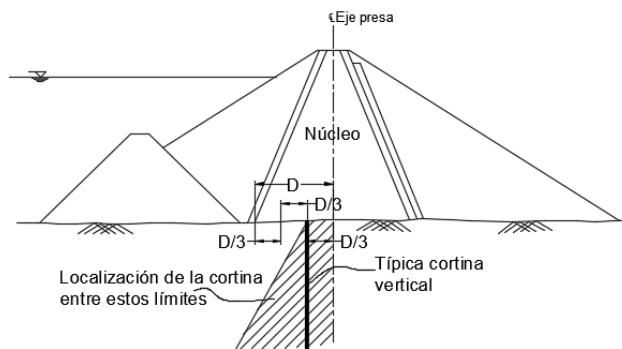


Figura 3.36. Ubicación típica de una cortina profunda en una presa con núcleo de arcilla.
Adaptado de "*Construction and design of cement grouting*" de Hously, A.C. (1990).

Como se observa en la Figura 3.36, la posición típica de una cortina de inyecciones en la cimentación de una presa con núcleo de arcilla es aguas arriba del eje de la presa con una ligera inclinación para interceptar las discontinuidades adecuadamente.

En la Figura 3.37, se muestran las inyecciones de consolidación aguas arriba de la cortina principal o profunda, formando una cortina gradual en la fundación de la presa. Esta condición se diseña cuando la fundación de la presa tiene un macizo rocoso muy fracturado o se presenten condiciones particulares en el sitio.

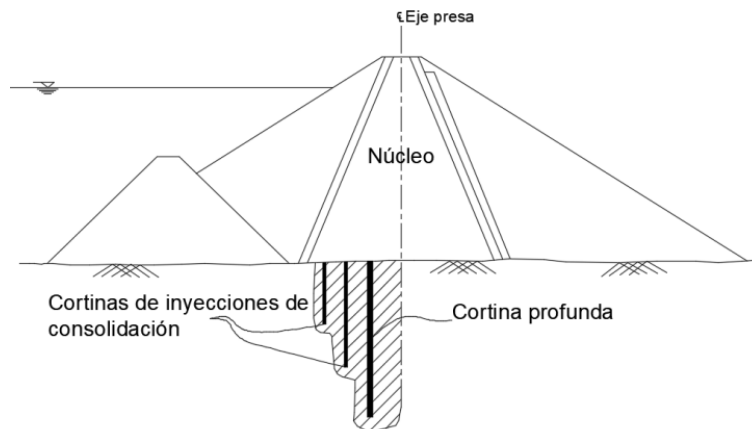


Figura 3.37. Inyecciones de consolidación en fundación de la presa con núcleo de arcilla.
Fuente del Autor.

3.3.4.2 Presas de enrocado con cara de concreto (CFRD)

Las presas de enrocado con cara de concreto, tienen en la cara aguas arriba de la presa una membrana impermeable inclinada, por lo general esta membrana es de concreto, asfalto u otro material impermeable. En el caso de cara la de concreto, su construcción se realiza con una serie de losas de concretos repartidas a lo largo de la cara expuesta hacia el embalse. Estas losas están apoyadas sobre el relleno de la presa y hacia su base están apoyadas sobre el terreno en una estructura en concreto llamado plinto, su función es parecida a la de una zapata llevando las cargas verticales al terreno. En esta estructura se ubica la cortina de inyecciones como se observa en la Figura 3.38.

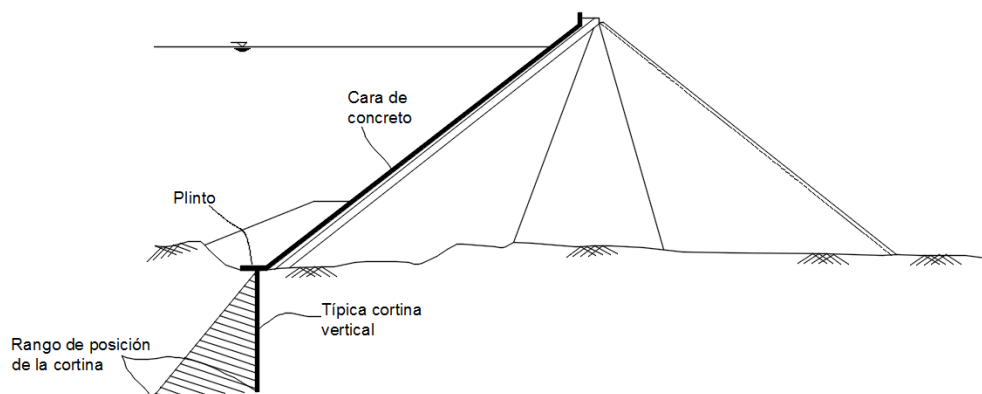


Figura 3.38. Ubicación típica de una cortina profunda en una presa de enrocado con cara de concreto.

Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houslyby, A.C. (1990).

Como los gradientes hidráulicos son altos en esta posición, lo recomendable es construir varias filas de cortinas de inyección para disminuir los gradientes con una cortina reforzada con todas las filas.

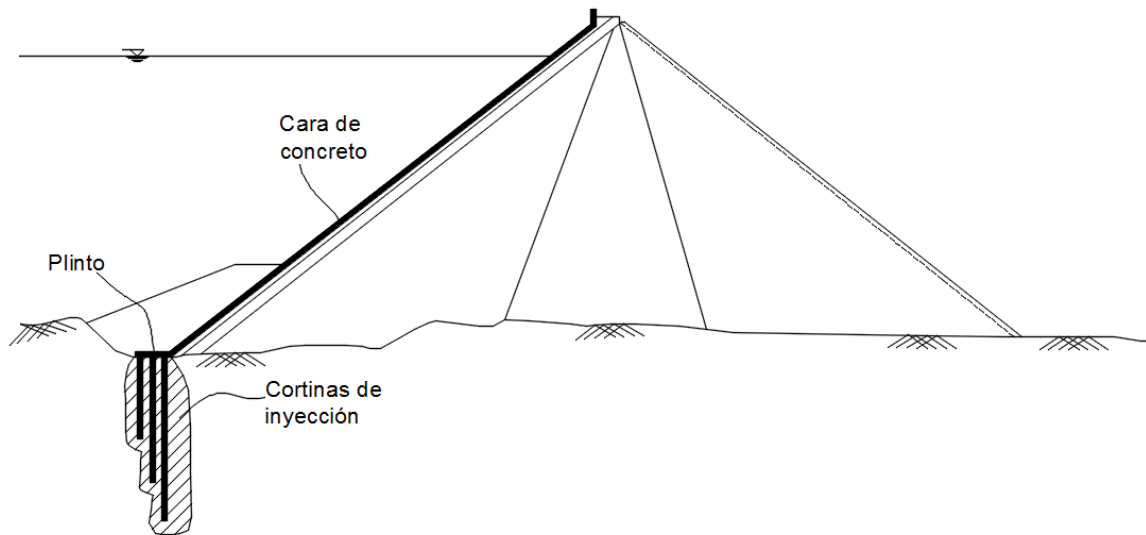


Figura 3.39. Cortinas de inyección en el plinto de una presa de enrocado con cara de concreto.

Fuente del autor.



Fotografía 3.5. Ubicación de pasantes de PVC en plinto para la posterior perforación e inyección de los tratamientos con inyecciones desde el plinto.

Fuente del autor.

En situaciones específicas donde no se puede realizar las inyecciones desde el plinto o para reforzar un tratamiento previo, se excava una galería de inyección para alcanzar un sitio bajo el plinto para realizar el tratamiento con inyecciones, esta galería proporciona un acceso a las inyecciones y/o funciona como galería de monitoreo de filtraciones.

Esta opción es costosa debido a las condiciones particulares del macizo rocoso o en el caso de un reforzamiento del tratamiento previo, se requiera excavar la galería con condición de embalse.

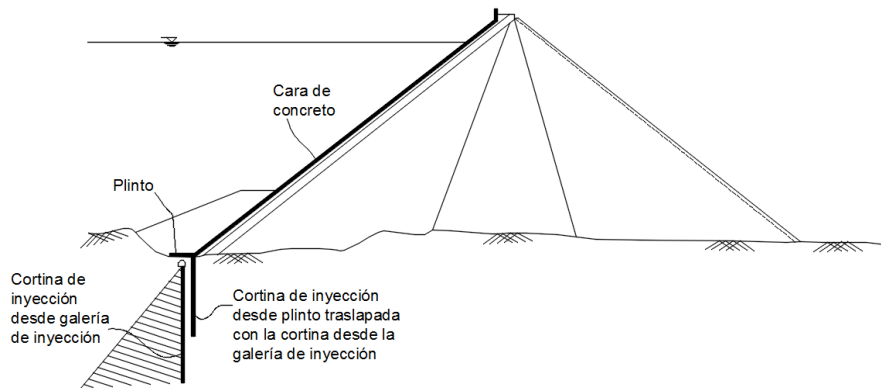


Figura 3.40. Cortinas de inyección desde galería de inyección desde el macizo rocoso.
Fuente del autor.

3.3.4.3 Presas de relleno homogéneo

Estas presas se construyen con un solo material relativamente impermeable. La ubicación de la cortina de inyecciones es igual que las presas de enrocado con núcleo de arcilla.

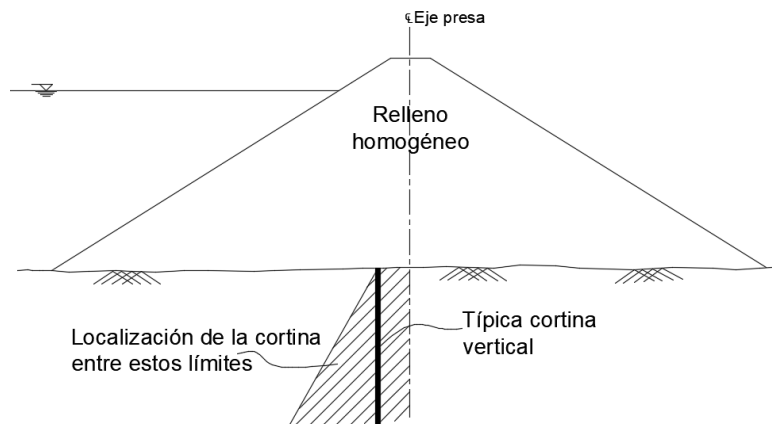


Figura 3.41. Cortinas de inyección en presas de relleno homogéneo.
Fuente del autor.

3.3.4.4 Presas de gravedad en concreto

Las presas de gravedad en concreto tienen un contacto definido entre la cimentación en el macizo rocoso y el concreto, por lo que se crean condiciones de flexibilidad entre la estructura y el macizo por efectos de la carga hidrostática de la altura del embalse. Para reducir las cargas hidrostáticas en la presa de gravedad, generalmente se construyen galerías de inyección y drenaje en los estribos donde está apoyada la estructura y continúan a través de la presa. Una vez terminada la estructura se realiza el proceso de inyección en la galería dentro de la presa para que el tratamiento con inyecciones creen un contacto entre la estructura y el macizo rocoso, al igual que consoliden el terreno y selle discontinuidades en la fundación.

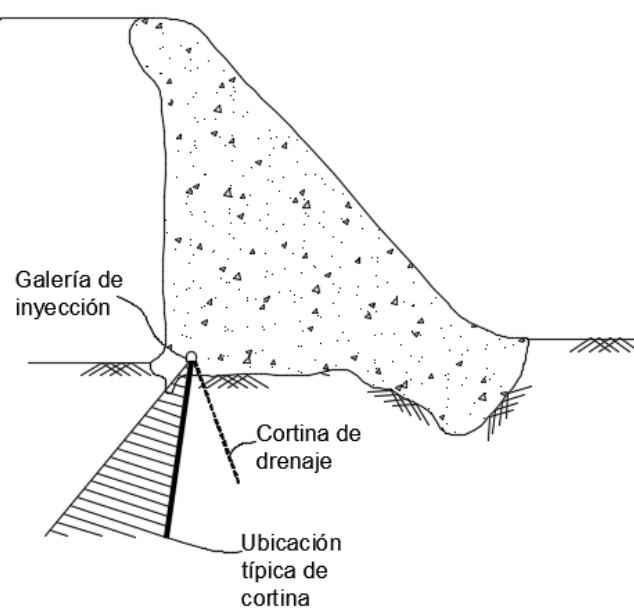


Figura 3.42. Ubicación típica de una cortina profunda en una presa de gravedad en concreto.

Adaptado de "*Construction and design of cement grouting*" de Houlsby, A.C. (1990).

El propósito de los tratamientos con inyecciones bajo las presas de concreto es limitar las filtraciones que llegarían a los drenajes aguas abajo de la presa y minimizar las presiones hidrostáticas bajo la presa. En el caso de las presas de gravedad en concreto la prioridad son los drenajes que dan control de seguridad a la presiones bajo la presa, por eso es de gran importancia, mantenerlos y monitorearlos constantemente.

3.3.4.5 Presas en arco y de contrafuertes

El tratamiento con inyecciones en las presas en arco y de contrafuertes, el tratamiento es parecido al requerido en las presas de gravedad en concreto, se ubican drenajes desde las galerías construidas en el cuerpo de la estructura y se deja una cortina de inyecciones aguas arriba de la cortina de drenaje para evitar presiones altas en los drenajes.

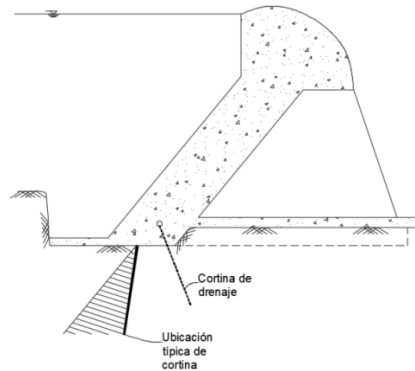


Figura 3.43. Ubicación típica de una cortina profunda en una presa de contrafuertes en concreto.

Adaptado de “*Construction and design of cement grouting*” de Houlby, A.C. (1990).

3.3.4.6 Posición de las cortinas en estribos escarpados

Cuando se tienen taludes escarpados donde se requiera el tratamiento con inyecciones, se deberá realizar el tratamiento con inyecciones por medio de configuraciones diferentes a las establecidas normalmente, esta configuración de las cortinas en estos sectores se realiza en forma de abanico con un punto de origen establecido, para que exista una transición adecuada entre la configuración normal de la cortina y estos sitios escarpados. Un ejemplo de esta situación se observa en la Figura 3.44.

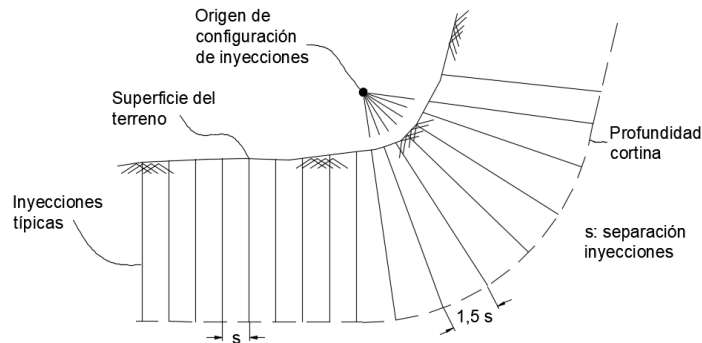


Figura 3.44. Configuración particular de cortina de inyecciones en sectores escarpados.
Fuente del autor.

Al realizar este tipo de inyecciones sobre un escarpe con esta configuración particular, hay que supervisar detalladamente el procedimiento de inyección para que las presiones de inyección no sean excesivas y así desestabilizar un bloque de roca con la presión de inyección detrás de este.



Fotografía 3.6. Trabajos de inyección en terrenos escarpados.
Fuente del autor.

3.3.4.7 Tratamientos de inyección en excavaciones subterráneas

Esta configuración de cortinas de inyección se muestra en la Figura 3.44, mostrando como las perforaciones se direccionan desde un punto de origen para sectores donde hay un cambio drástico en la pendiente del terreno natural, esta configuración de abanicos de inyección se aplica también en excavaciones subterráneas debido al poco espacio que se tiene. Los abanicos de inyección realizan una transición adecuada desde la superficie donde se realice el tratamiento y de esta forma obtener cierres adecuados en los tratamientos, esta situación se muestra en la Figura 3.45.

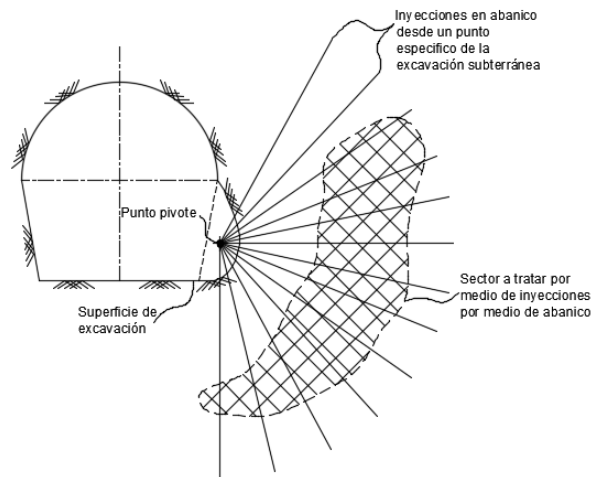


Figura 3.45. Inyecciones en abanico para tratar un sector específico desde una excavación subterránea.
Fuente del autor.



Fotografía 3.7. Perforación dirigida en túnel para perforación de huecos para inyecciones.
Fuente del autor.

Sin embargo, esta configuración particular de abanicos debe ser estudiada detalladamente para que no queden “ventanas” o espacios en el tratamiento, como se observa en la Figura 3.44 el espaciamiento “s” entre perforaciones en el fondo de la perforación es igual que en la superficie cuando se tiene una configuración de la cortina lineal, pero cuando la configuración de la cortina es en abanico la separación de las perforaciones en el fondo es del orden de 1,5 veces “s”. Esto se puede atender aumentando la cantidad de inyecciones en el sitio, teniendo en cuenta las configuraciones geométricas de la excavación.

Estos tratamientos con cortinas en abanico son utilizados para realizar tratamientos de inyección en túneles para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso en los frentes de excavación o reducir la permeabilidad previa al avance de la excavación, tal como se muestra en la Figura 3.46. Este tipo de inyecciones tiene la desventaja que reduce considerablemente los rendimientos de excavación de un túnel, aumentando el tiempo de construcción y a su vez los costos. Se utilizan cuando se presenta condiciones de falla, por ejemplo terreno que fluye. Este fenómeno, ocurre generalmente en rocas sedimentarias, aunque también en algunas rocas metamórficas. El terreno que fluye ocurre cuando un túnel excavado a través de un estrato poco permeable (arcillolitas, lutitas, etc.) se encuentra, más adelante, con un estrato permeable, (areniscas, conglomerados, roca triturada, etc.) con un nivel freático alto (acuífero confinado), ocasionando el rompimiento del estrato y generando un flujo del material permeable hacia el frente de excavación.

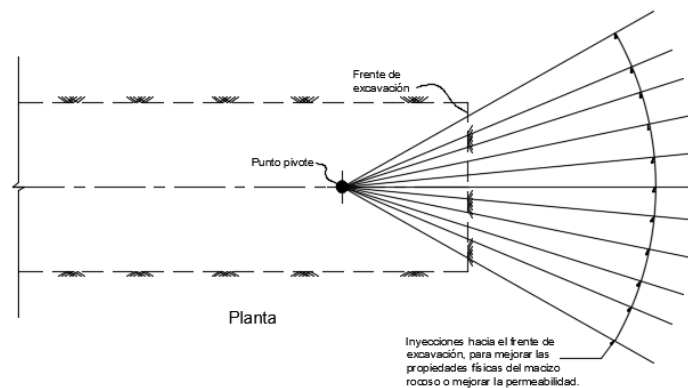


Figura 3.46. Inyecciones hacia el frente en una excavación subterránea.
Fuente del autor

Igualmente las inyecciones hacia adelante se realizan por requerimientos ambientales, donde se debe cumplir con caudales de infiltración permisibles de agua subterránea (Ruiz, 2018).

En caso que las excavaciones subterráneas sean de gran diámetro (diámetros de excavación mayores a 6,0 m) y requieran tratamientos para mejorar el frente de excavación o reducir la permeabilidad del macizo rocoso, se deben realizar inyecciones de consolidación desde el frente de la excavación con inyecciones en abanico desde varios puntos del frente, como se detalla en la Figura 3.47. Para esto es necesario que se

perforen los abanicos desde varios puntos de pivotes y que estos tratamientos se entrelacen para crear un solo tratamiento en el frente de excavación, teniendo en cuenta que estas perforaciones se pueden ejecutar de forma simultánea disminuyendo los tiempos en el tratamiento. Sin embargo, se debe prestar atención al programa de perforación para evitar que las brocas de perforación choquen en algún punto y bloquee todo el sistema de perforación simultánea.

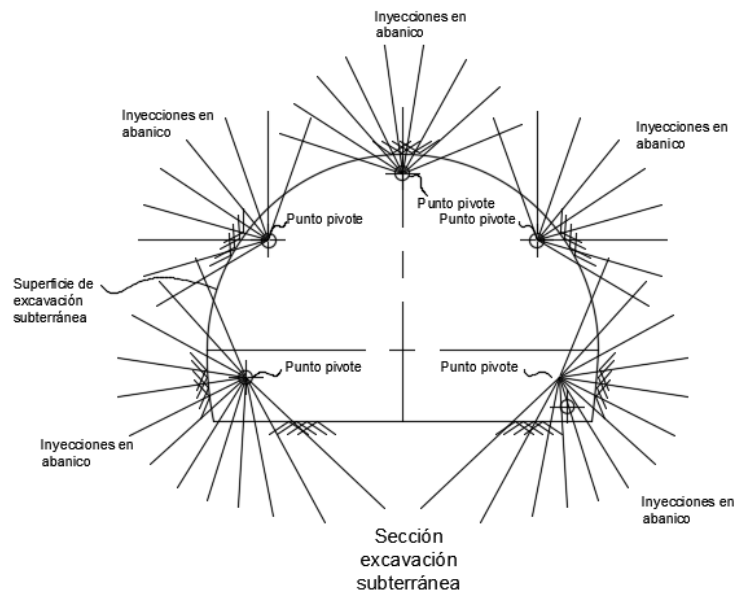


Figura 3.47. Inyecciones de consolidación en los frentes de excavación para túneles de gran diámetro.
Fuente del autor.

Las configuraciones de cortinas en abanico, son de bastante ayuda para un tratamiento desde una excavación subterránea. No obstante, la configuración de estas perforaciones no debe ser tan compleja debido a que se tiende al error en la perforación de la cortina, debido a la diferencia de ángulos indicando la dirección de cada perforación. Para estos casos es mejor diseñar cortinas en abanico sencillos.

Cuando el avance de excavación es lento ($<2,0$ m/ciclo) por terrenos complejos, los tratamientos previos de inyección afectarían los rendimientos de excavación, para este caso A.C. Housby (1990) recomienda excavar nichos laterales para realizar los tratamientos de inyección en el frente desde estos. Una vez se termine el tratamiento se inicia la excavación del frente, véase Figura 3.48.

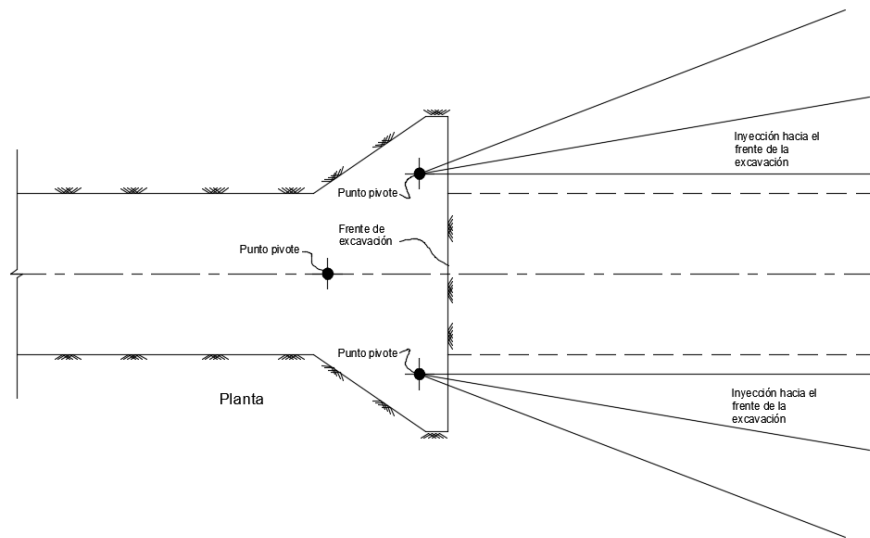


Figura 3.48. Configuración de inyecciones hacia el frente de excavación desde nichos laterales.

Adaptado de “*Construction and design of cement grouting*” de Houslyby, A.C. (1990).

Como se describió anteriormente la configuración en abanico en cortinas de inyección sirve para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del frente de excavación o para reducir la permeabilidad del macizo en el frente.

En el caso donde a lo largo del túnel se presenten flujos de filtraciones hacia la excavación. Se utiliza otra configuración de inyecciones para reducir la permeabilidad del macizo y reduzcan estos flujos hacia la excavación en un tramo del túnel o todo el túnel, según lo observado. Para este caso se utilizan cortinas radiales de inyección, con longitudes de tratamiento del orden de 1 a 2 veces el diámetro de excavación, estas cortinas radiales están separadas entre 3,0 a 8,0 m, según el estado del macizo rocoso. La configuración de las cortinas radiales de inyecciones se detalla en la Figura 3.49. Estas inyecciones radiales son inyecciones posinyecciones.

Las inyecciones radiales también se utilizan para mejorar las propiedades del macizo rocoso luego de la excavación por el efecto de las voladuras y para propósitos generales de mejoramiento de la excavación.

Para la excavación de pozos, se puede requerir una cortina alrededor de estos para mejorar las propiedades mecánicas y de permeabilidad, este tratamiento se realiza previo a la excavación según las condiciones del macizo rocoso. Igualmente, este tratamiento se

puede realizar después de la excavación del pozo para mejorar las condiciones de permeabilidad alrededor del mismo. En la Figura 3.50 se muestra la configuración del tratamiento alrededor de pozos.

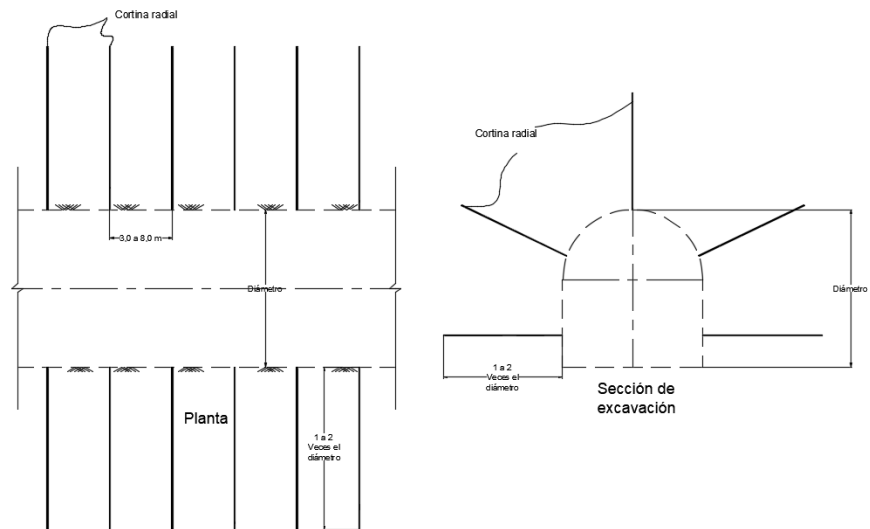


Figura 3.49. Cortina radial de inyecciones.
Fuente del autor.

Las inyecciones de la anterior figura son tratamientos de posinyecciones, es decir inyecciones ejecutadas después de la excavación del túnel.

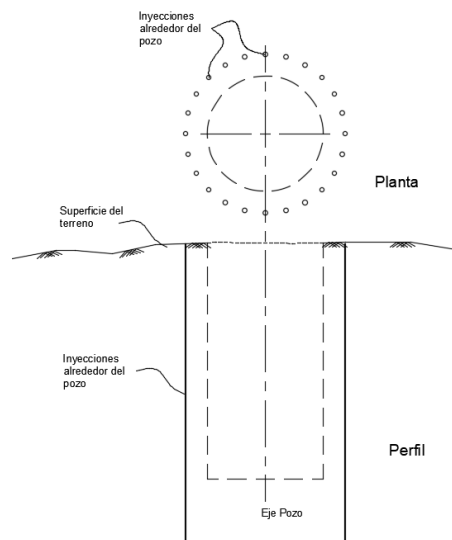


Figura 3.50. Cortinas circulares alrededor de pozos.
Fuente del autor.

En el caso de realizar el tratamiento antes de la excavación del pozo, se sugiere la inyección de toda la profundidad del pozo para que el procedimiento de inyección no sea lento, ya que el tratamiento se puede realizar por etapas inyectando y excavando en ciclos. Primero tratando con inyecciones el tramo a excavar, luego se realizaría el correspondiente avance excavación del pozo y se continuaría el ciclo con la inyección del siguiente avance de excavación.



Fotografía 3.8. Excavación de pozo para compuertas de un túnel de conducción de agua.
Fuente del autor.

3.3.5 Intersección de cortinas desde superficie y tratamientos desde túneles

Cuando una excavación subterránea pasa por debajo de una cortina de inyección desde superficie, se debe asegurar el empalme entre la cortina desde la superficie y el tratamiento de inyección desde el túnel, para que no se pase los flujos de agua alrededor del túnel o por debajo de este. Así mismo, el empalme entre las cortinas se realiza para obtener un único tratamiento en el macizo rocoso, esta situación se muestra en la Figura 3.51.

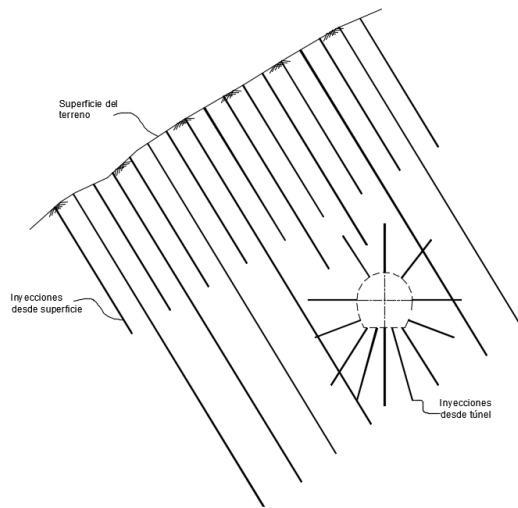


Figura 3.51. Intersección de cortinas desde superficie y desde túneles.
 Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houslyby, A.C. (1990).

En el ejemplo descrito las dos cortinas se encuentran en un mismo plano y su intersección es más definida. En otros casos las cortinas son inclinadas y con diferentes direcciones, en estos casos las cortinas deben acoplarse adecuadamente para obtener un tratamiento efectivo dentro del macizo rocoso.

Sin embargo, si el macizo rocoso es sano y su permeabilidad es baja puede que no sea necesario empalmar las cortinas de inyección o no se encuentren en un mismo plano, como se muestra en la Figura 3.52.

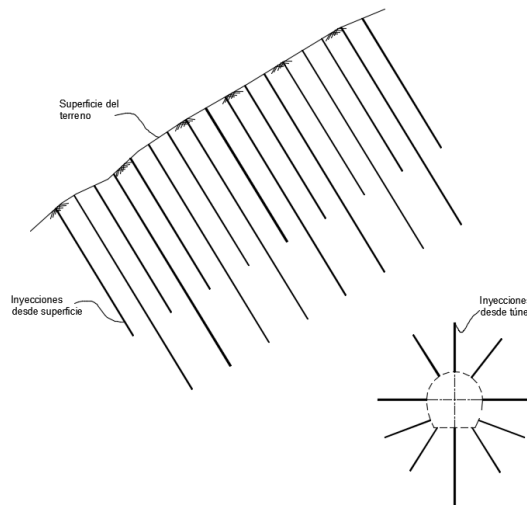


Figura 3.52. Cortinas separadas en superficie y túnel.
 Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houslyby, A.C. (1990).

3.4 GALERÍAS DE INYECCIÓN

Las galerías de inyección, son excavaciones subterráneas de poco diámetro del orden de 1,5 m a 3,0 m. La Figura 3.53, muestra las dimensiones mínimas para la excavación de las galerías, las cuales son las requeridas para el ingreso de equipos de perforación e inyección para realizar los tratamientos.

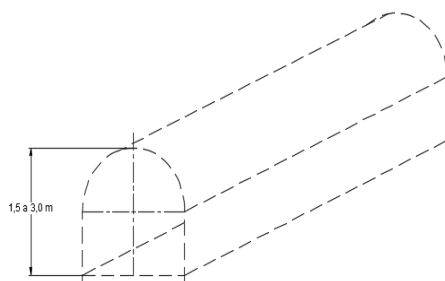


Figura 3.53. Dimensiones típicas de las galerías de inyección.
Fuente del autor.

Las brocas utilizadas para la perforación de los tratamientos son cortas de 0,5 a 1,5 m de largo comparándolas con las usualmente utilizadas desde superficie. Igualmente, los equipos utilizados para las inyecciones deben ser remotos, desde el portal de entrada, o pueden utilizarse plantas mezcladoras, dosificadoras y bombas dentro de la galería de pocas dimensiones para ingresar a la galería. Actualmente, es más eficiente que las plantas mezcladoras se encuentren fuera de la galería, debido a que los diseños de mezclas de lechada de cemento permiten que la mezcla se transporte a través de líneas de inyección hasta el sitio de inyección dentro de la galería, pasando antes por agitadores dentro de la galería.



Fotografía 3.9. Galería de inyección desde el portal de entrada y dentro de la excavación.
Fuente del autor.

El objetivo de las galerías de inyección es completar los tratamientos desde niveles más profundos en el macizo rocoso. Debido a las grandes desviaciones durante la perforación de las inyecciones que se presentarían si se realizaría un tratamiento desde superficie. Los tratamientos realizados desde las galerías empalman y complementan los tratamientos con inyecciones realizados desde superficie véase Figura 3.54, para de esta forma obtener un único tratamiento desde varios niveles.

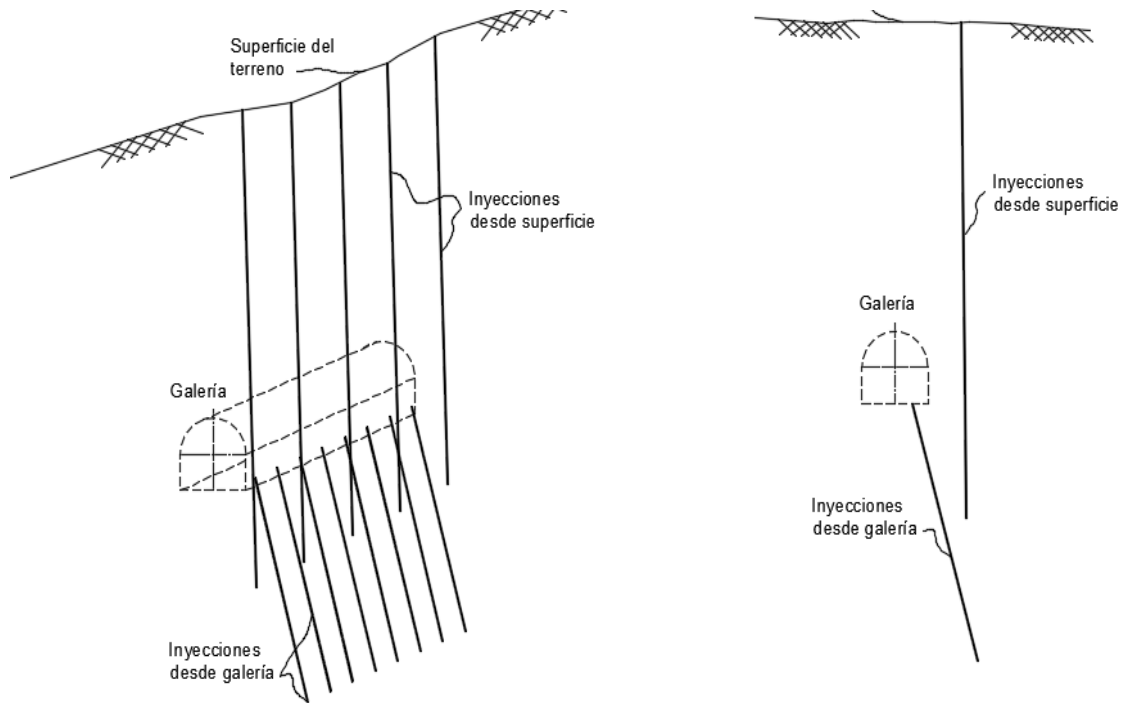


Figura 3.54. Tratamientos de inyección desde las galerías de inyección.
Fuente del autor.



Fotografía 3.10. Equipos de inyección en Galería de inyección.
Fuente del autor.

Así mismo, las galerías de inyecciones sirven para complementar trabajos de inyección después de su construcción y para el caso de presas, después del llenado del embalse, véase Figura 3.40. La ubicación de estas galerías de inyección, en presas, es hacia los estribos y en el lecho, donde se apoyara la presa, para realizar tratamientos con inyecciones desde cualquier nivel en el macizo rocoso.

Las ventajas de las galerías de inyección son: (1) Los trabajos de excavación de la galería, perforación del tratamiento de inyección y los trabajos de inyección, no interrumpen con otras actividades dentro del proyecto, ya que estos tratamientos son independientes de cualquier excavación o relleno en el proyecto; (2) Los tratamientos de inyección desde las galerías permiten alcanzar más fácilmente las particularidades geológicas a niveles más profundos dentro del macizo rocoso, como los son zonas de falla, zonas fracturadas, estratos permeables, cavidades en el macizo, entre otros; (3) Las galerías de inyección permiten conocer las filtraciones hacia la excavación antes y después del tratamiento; (4) Permite realizar tratamientos adicionales luego de culminar el tratamiento principal, según las condiciones de cierre de las cortinas; y (5) El registro geológico de excavación de la galería (Figura 3.55), sirve para complementar la información de la etapa de investigación para modificar los diseños del tratamiento, en caso de encontrar particularidades del macizo rocoso, que no se contemplaron en la etapa de investigación.



Fotografía 3.11. Equipos de perforación en la galería de inyección.
Fuente del autor.

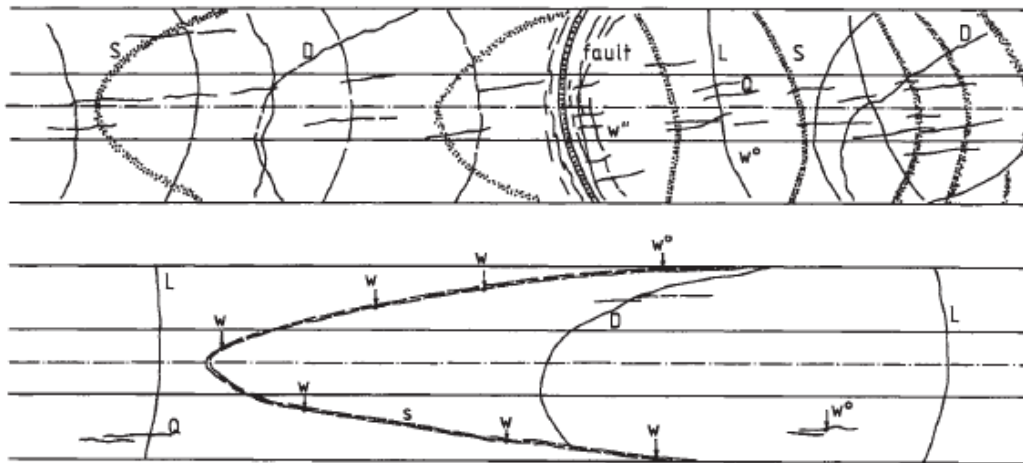


Figura 3.55. Registro geológico de las galerías de inyección.
Tomado de "Rock grouting with Emphasis on Dam sites" de Ewert F-K. (1985).

Sin embargo, la efectividad de los tratamientos con inyecciones realizadas desde galerías, se determinara durante la operación del proyecto, en presas y túneles. Mediante la medición de caudales de infiltración, medición de presiones hidrostáticas, mediciones de niveles desde piezómetros y realizar pruebas de agua a presión para determinar la permeabilidad después de los tratamientos. Toda medición inusual de las actividades mencionadas, requiere ser revisada por un experto o una empresa consultora con experiencia en tratamientos con inyecciones, para planear medidas o trabajos adecuados de remediación.

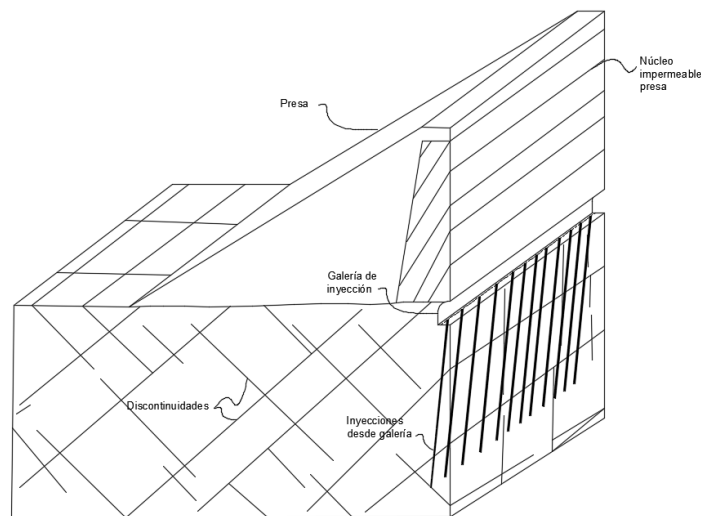


Figura 3.56. Galería de inyección en la fundación de una presa.
Adaptado de "Rock grouting with Emphasis on Dam sites" de Ewert F-K. (1985).

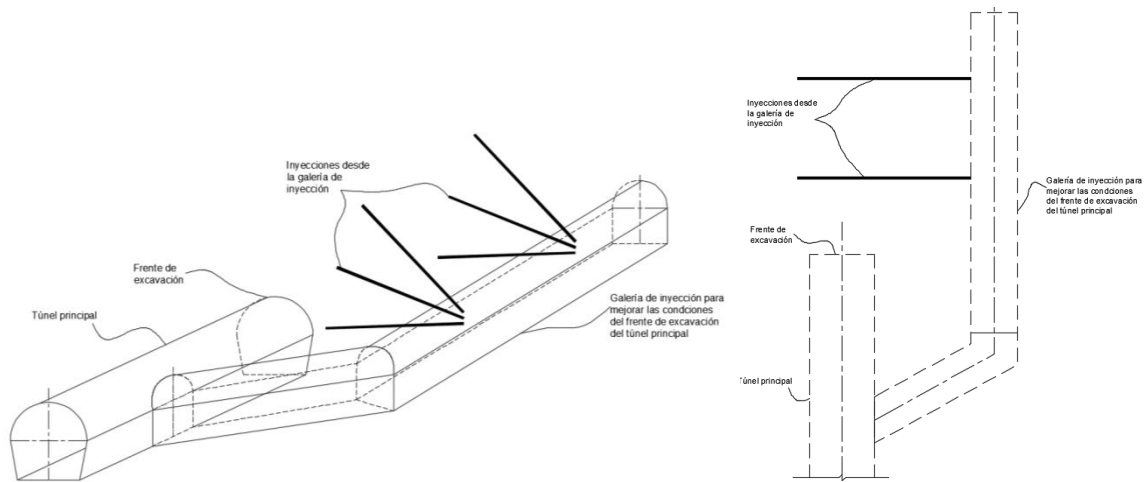


Figura 3.57. Inyecciones desde galería de inyección en túneles.
Fuente del autor.

3.5 INYECCIONES DE CONSOLIDACIÓN

Las inyecciones de consolidación en túneles según Henn (1996), se requieren para el llenado de las discontinuidades abiertas, planos de estratos separados, zonas de falla, cavidades en la roca y otras particularidades que tiene el macizo rocoso hasta cierta distancia, hasta un diámetro adelante del frente de excavación (Figura 3.58). Este tratamiento mejora el macizo rocoso y reduce la permeabilidad. En túneles los flujos de agua hacia la excavación pueden ser inaceptables por razones estructurales, estéticas y ambientales.

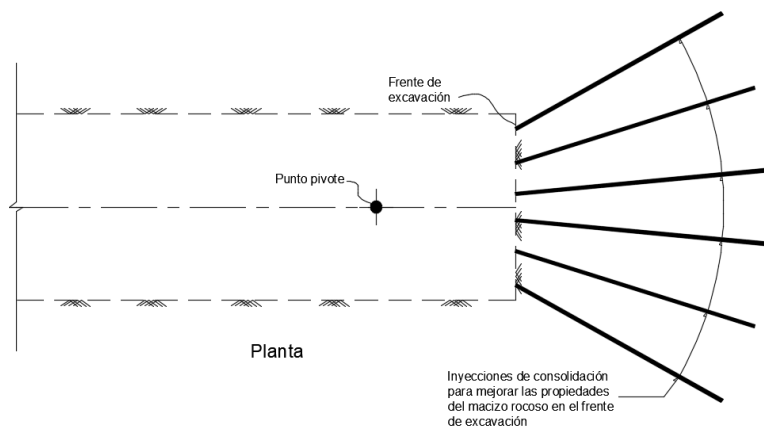


Figura 3.58. Inyecciones de consolidación en el frente de excavación de túneles.
Fuente del autor.

El fracturamiento de la roca pudo ocurrir naturalmente por razones geológicas, o por los efectos de la excavación que cambia los esfuerzos in situ alrededor de la excavación, por los efectos de las excavaciones con voladuras o las excavaciones mecánicas.

Para el caso de las presas se utilizan para el tratamiento de la cimentación de roca donde se apoyara la presa, este tratamiento tiene poca profundidad en áreas relativamente amplias ubicadas aguas arriba y aguas abajo de la cortina principal de inyección (Figura 3.59), el objetivo del tratamiento depende del tipo proyecto o presa, para una presa de tierra se requiere para reducir las pérdidas de agua por filtración por debajo de esta, reducir las velocidades de filtración en una zonas relativamente permeables y reducir la pérdida del material de la presa.

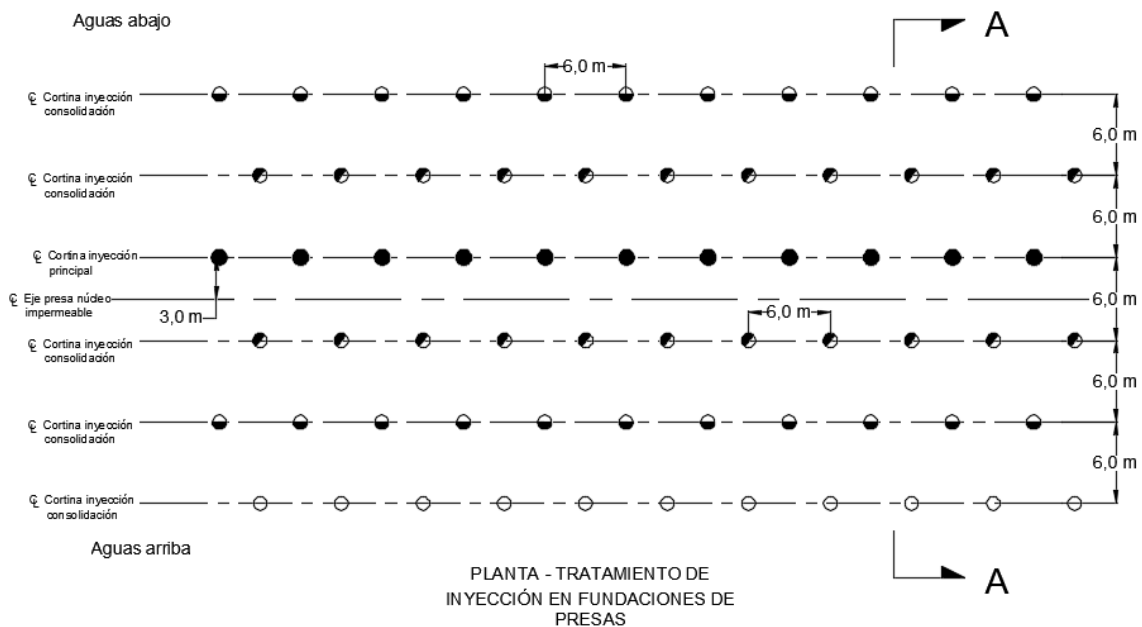


Figura 3.59. Planta de inyecciones de consolidación en tratamientos de fundación para presas.

Adaptado de "Design Standards No. 13 Embankment Dams" de U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014).

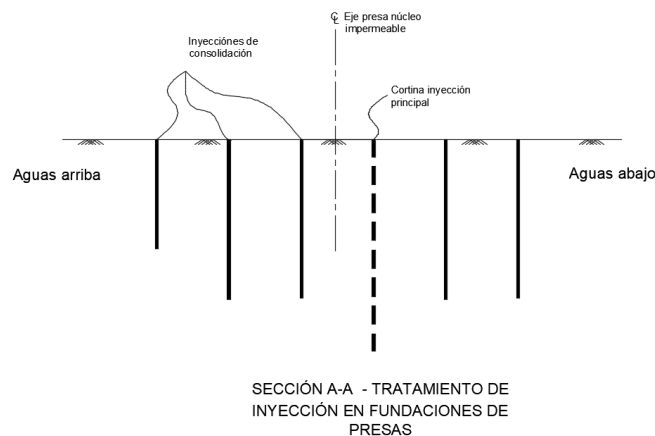


Figura 3.60. Sección A-A. Inyecciones de consolidación en tratamientos de fundación para presas.
Fuente del autor.

Así pues, las inyecciones de consolidación (en presas) mejoran las propiedades de la cimentación, reduciendo el potencial de asentamiento del terreno por efectos del cierre de discontinuidades abiertas por la carga impuesta (relleno de la presa) en superficie.

De otro lado, los diseños de los tratamientos con inyecciones de consolidación en presas, se deben verificar con métodos analíticos y comprobando con modelaciones numéricas de flujos en la cimentación y a través de la presa. Según lo expresado por Wilson y Dreese (1998), los tratamientos con inyecciones de consolidación posiblemente aumenten la presión piezométrica aguas arriba de la presa, creando un potencial de filtración, este potencial de filtración pasa por encima del tratamiento en la fundación de la presa, creando flujos a través de la presa e introduciendo un gradiente de flujo potencialmente descendente que afectaría la presa y su fundación.

Las inyecciones de consolidación deben distribuirse en fundaciones para presas de la forma más apropiada y conveniente, como sugiere Weave, Kenneth. y D. Bruce D. A. (2007), por medio de perforaciones en filas paralelas a la cortina profunda de la presa, como se muestra en la Figura 3.59. Del mismo modo, la orientación de las inyecciones de consolidación debe ser opuesta a la dirección de las discontinuidades para aumentar la probabilidad de intersectarlas. Sin embargo, se debe estipular en los diseños que la orientación y patrón de las inyecciones de consolidación se puedan modificar para intersectar la mayoría de las particularidades geológicas observadas durante la excavación de la fundación de la presa.

Se aclara que las inyecciones de consolidación en macizos rocosos tanto para túneles y presas no tienen relación con la consolidación de suelo en la excavación de túneles y tratamientos para la cimentación de presas.

4. MATERIALES PARA LA INYECCIÓN

4.1 GENERALIDADES

Los materiales utilizados para los tratamientos con inyecciones, se clasifican según su rendimiento reológico, como se muestra en la Figura 4.1. Donde se muestra como los fluidos a base de partículas de cemento, dependiendo de su composición, pueden ser estables (es decir, con mínima exudación) o inestables cuando se dejan en reposo. Se observa que los fluidos estables tienen cohesión y viscosidad que aumentan con el tiempo a una velocidad que puede acelerarse considerablemente bajo presión. Estos fluidos muestran un comportamiento no newtoniano, en comparación con las características evolutivas o no evolutivas newtonianas de las soluciones coloidales y las soluciones puras, respectivamente.

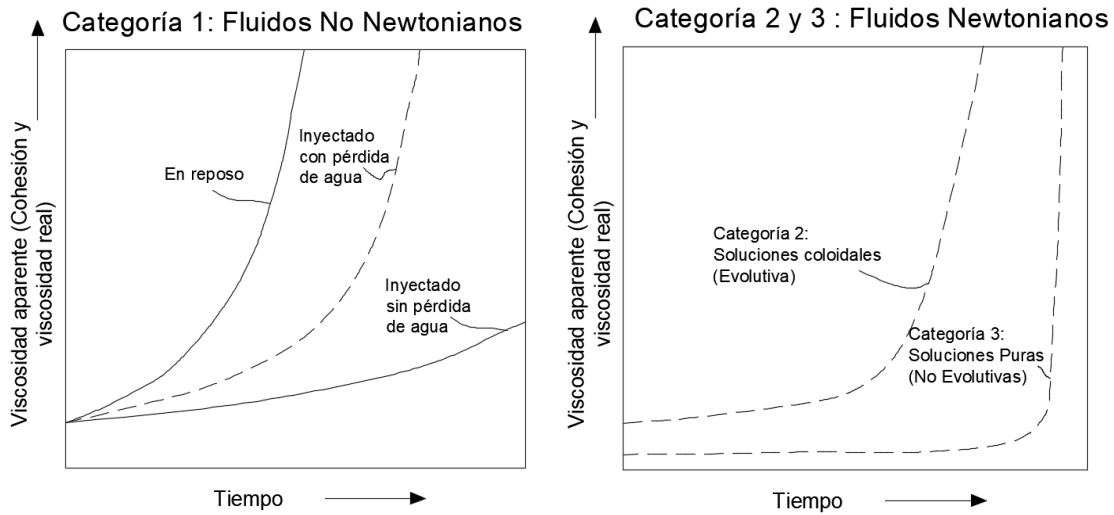
Las categorías de los fluidos utilizados en los tratamientos con inyecciones se explican a continuación:

Categoría 1: Lechadas de partículas de cemento que tienen un comportamiento no newtoniano.

Categoría 2: Soluciones coloidales, son fluidos newtonianos evolutivos en los que la viscosidad aumenta progresivamente con el tiempo.

Categoría 3. Soluciones puras, son fluidos newtonianos no evolutivos en las que la viscosidad es esencialmente constante hasta el fraguado de la lechada, dentro de un período controlable.

Categoría 4. Materiales combinados, no están incluidos en las categorías 1 a 3.



(1) La pérdida de agua de la mezcla ocurre durante el proceso de inyección debido a la presión ejercida sobre la mezcla.

Figura 4.1. Características reológicas de fluidos No Newtonianos y Newtonianos. Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

De la categoría 1, lechadas a base de partículas de cemento, la principal determinante de sus propiedades y características básicas, que incluye cohesión, viscosidad, estabilidad de la mezcla, durabilidad y resistencia es la relación de agua y cemento (Baker Wallace, 1982). En esta categoría se identifican 5 subcategorías, las cuales son:

- *Lechadas de puro cemento*: Estas lechadas se asocian a su alta resistencia y durabilidad.
- *Lechadas de arcilla y cemento con bentonita*: El cemento se estabiliza con un mineral de arcilla para proporcionar características específicas del fluido y fraguado de la mezcla. Estas mezclas se utilizan para relleno de discontinuidades abiertas o perforaciones de pruebas de agua. Esta mezcla es de baja resistencia debido a su alto contenido de arcilla y bajo contenido de cemento, al igual que la calidad de dicha mezcla tiene influencia en las propiedades de la lechada como lo es la exudación, penetrabilidad y resistencia
- *Lechadas con aditivos*: La adición de sustancias no cementosas modifica sustancialmente las propiedades resultantes y reduce el costo unitario de volumen de la mezcla. Los rellenos más comunes son las arenas y el *flyash*; pero se han utilizado otros materiales dependiendo de las preferencias del proyecto y de la disponibilidad en el sitio. Estos son generalmente subproductos industriales finos e inertes que

incluyen relaves de minas, polvo de horno, piedra pómez, humo de sílice y otros materiales.

- *Lechadas para condiciones especiales:* Dependiendo de los requisitos específicos del proyecto, la lechada debe tener tasas controladas de hidratación y reológicas. Estas lechadas serán mezclas multicomponentes de muchos materiales como las espumas de resistencia mejorada y/o resistencia mejorada al lavado, y otros aditivos.
- *Lechadas de alta penetración:* Estas lechadas se requieren para rellenar pequeños espacios en el macizo rocoso. Para el relleno de estos pequeños espacios se requieren cementos ultrafinos que puedan penetrar en estos. Según el ISRM (1995), un cemento ultrafino está hecho de los mismos materiales que un cemento ordinario. Sin embargo, se caracteriza por su tamaño de grano ($d_{95} < 16$ micrones) y una distribución uniforme. La escala de los cementos ultrafino se detalla en la siguiente figura.

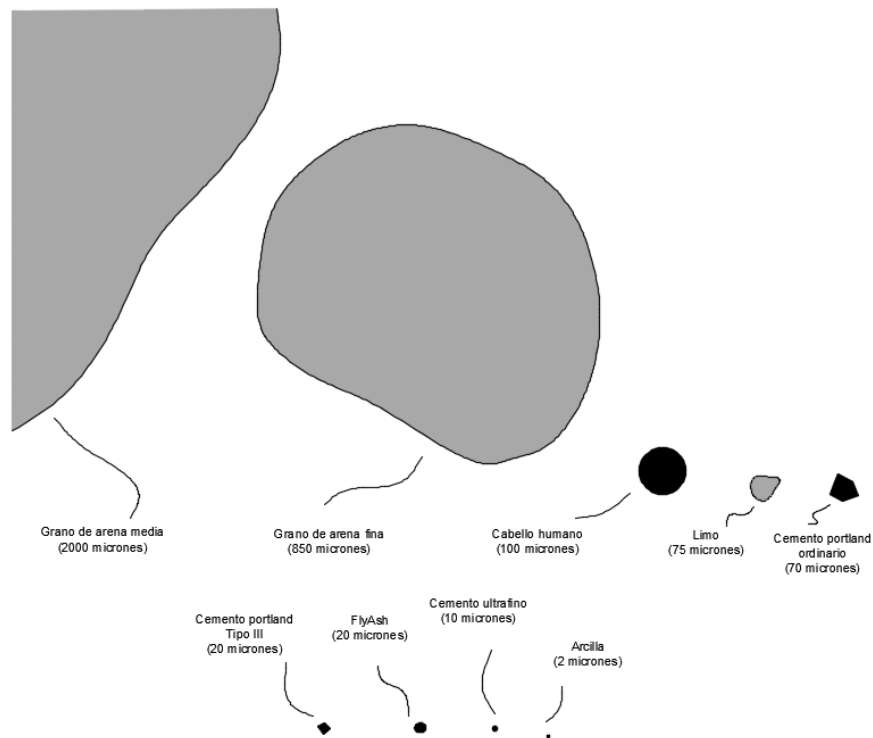


Figura 4.2. Tamaños relativos de diferentes partículas comparándolos con el cemento ultrafino.

Adaptado de “*Ultrafine Cement in Pressure Grouting*”. Henn y Soule (2010).

Como las lechadas utilizadas para el tratamiento con inyecciones requieren penetrar masas rocosas, la penetrabilidad de la lechada en el macizo rocoso es en función de la apertura de la discontinuidad y la rugosidad de la superficie, así como la cohesión de la lechada. Cuanto mayor sea la cohesión de la lechada, menor será la distancia que penetrará para una presión dada. Por lo tanto, las lechadas con cemento ultrafino son potencialmente capaces de penetrar grietas o fracturas mucho más pequeñas que las partículas de cemento portland ordinario debido a su tamaño de grano relativamente pequeño, como se muestra en la Figura 4.3.

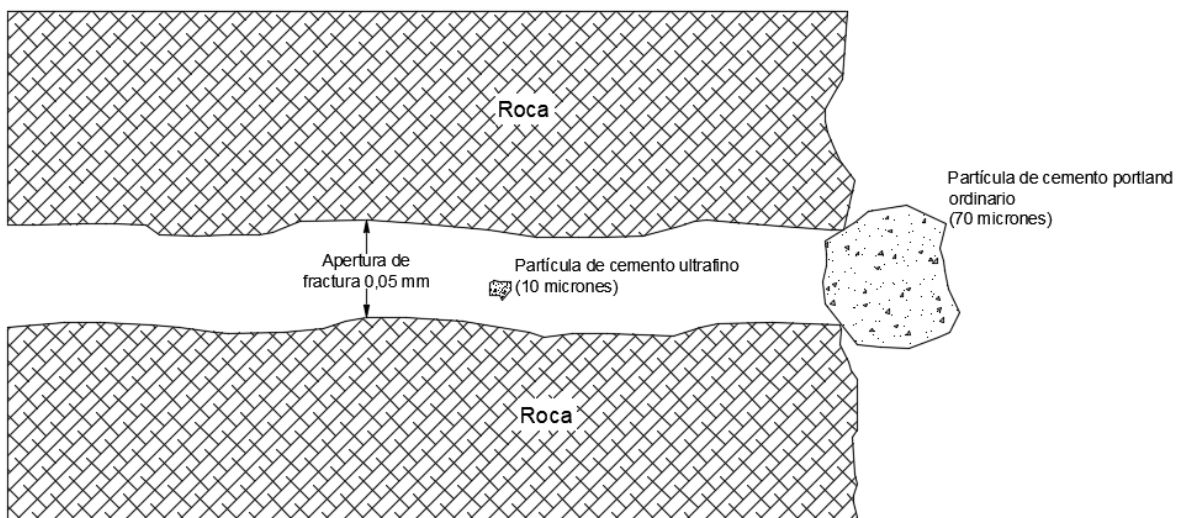


Figura 4.3. Tamaños relativos del cemento ultrafino versus el cemento portland ordinario, en el contexto de penetrabilidad en discontinuidades.

Adaptado de "*Ultrafine Cement in Pressure Grouting*". Henn y Soule (2010).

Las lechadas de las categorías 2 y 3 se suelen denominar lechadas de solución y, por lo general, se subdividen en función de sus componentes químicos, por ejemplo, a base de silicato de sodio (Categoría 2) o a base de resina (Categoría 3). Las propiedades reológicas sobresalientes de las lechadas de Categoría 3, junto con sus bajas viscosidades iniciales, facilitan la permeación de suelos tan finos como las arenas limosas ($k \leq 10^{-5}$ m/s).

La categoría 4 comprende una amplia gama de materiales de lechada que se usan con poca frecuencia y solo en ciertas aplicaciones que se requieren en condiciones especiales.

4.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES PARA INYECCIÓN

En este numeral se describe las propiedades de los materiales para inyección para su óptimo desempeño en el tratamiento. También se proporcionan métodos para lograr la mezcla apropiada para alcanzar estas propiedades.

4.2.1 Reología

La reología es el estudio de la deformación y el flujo de materiales. Las propiedades reológicas satisfactorias de una lechada tanto en el estado fluida como en el endurecido son fundamentales para un tratamiento exitoso. La mezcla debe proporcionar las propiedades adecuadas para permitir la inyección y el desplazamiento adecuados dentro de las discontinuidades.

La reología de una lechada de partículas se caracteriza, según Houlsby (1990), por tres parámetros: viscosidad, cohesión y fricción interna. Durante la inyección, la viscosidad controla la tasa de penetración en el macizo rocoso (y, por lo tanto, el tiempo de inyección) y la cohesión controla la presión interna requerida para iniciar o reiniciar el flujo de lechada. La cohesión también controla la máxima distancia de penetración. La fricción interna entre los componentes sólidos, cuando sea lo suficientemente alta, causará bloqueos en la fisura que se inyecta debido al aumento exponencial de presión que requiere para el movilizar la lechada a través de las discontinuidades. Para el manejo de esta situación se requiere controlar la reología reduciendo la cohesión inicial y retrasando su aumento con el tiempo, esto mejorará significativamente la penetrabilidad de la lechada en el macizo.

Sin embargo, las lechadas de cemento tienen muchos controles complejos sobre la penetrabilidad. Dependiendo de su composición, las lechadas pueden comportarse como fluidos Newtonianos o No Newtonianos, cuyo comportamiento se muestra en la Figura 4.4.

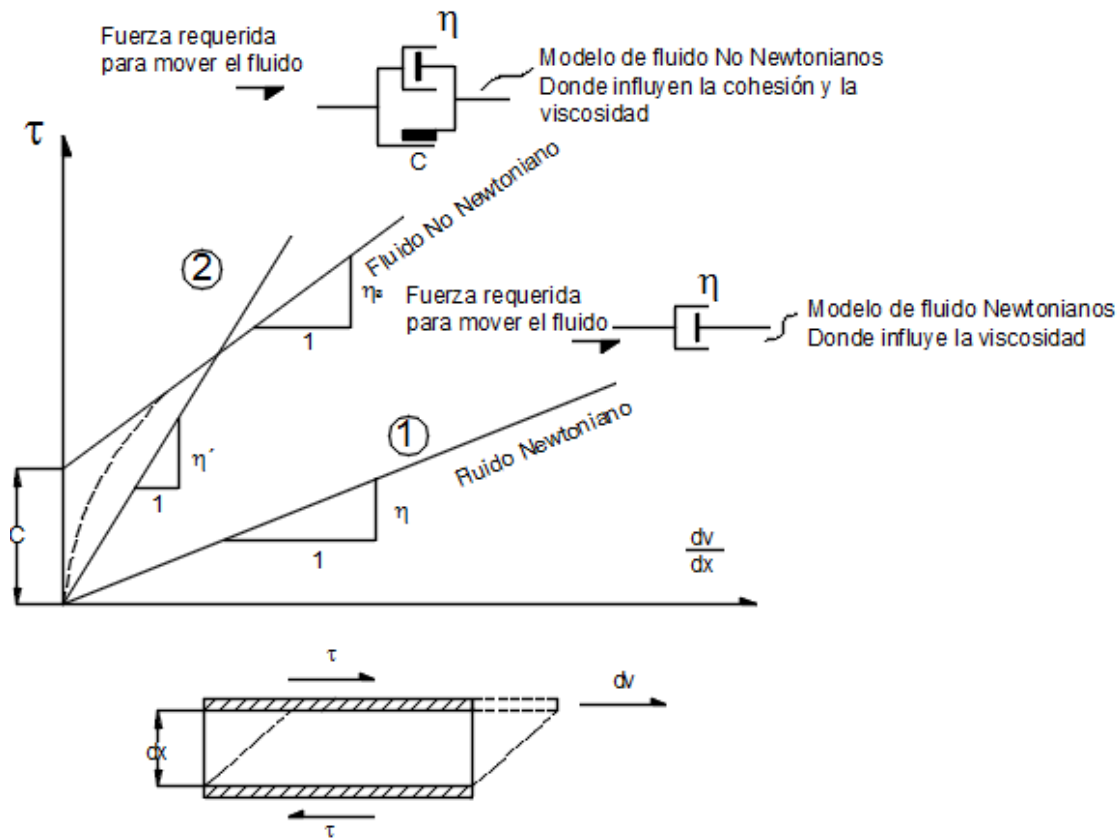


Figura 4.4. Modelos de fluidos Newtonianos (1) y fluidos No Newtonianos (2). Adaptado de "Dam foundation grouting". Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

De la Figura 4.4, se explican los símbolos a continuación:

τ = Esfuerzo cortante; dv/dx = Velocidad de corte; (1) Viscosidad; (2) Cohesión y viscosidad; $\tau = c + \eta_B * dv/dx$ (aproximación para la mezcla de la lechada de cemento); Las líneas discontinúan representan una mezcla estable (<5% de exudación); c = Cohesión (*yield point*); η = viscosidad dinámica; η_B = viscosidad plástica; y η' = viscosidad aparente.

Con los modelos mostrados en la Figura 4.4, se muestra que se requiere una fuerza para movilizar el fluido a través de las discontinuidades. Para fluidos Newtonianos, la fuerza está relacionada directamente con la viscosidad del fluido. Mientras que los fluidos No Newtonianos requieren vencer o superar la viscosidad y la cohesión del fluido para poder movilizarse a través de las discontinuidades. Un ejemplo de fluido Newtonianos es el agua

y de fluido No Newtonianos es la mezcla de inyección de alta viscosidad (Mezclas de inyección de bentonita-cemento).

La viscosidad (es decir, la relación entre la tensión de corte y la velocidad de corte) en los fluidos No Newtonianos puede permanecer constante a una velocidad de corte constante, pero puede cambiar en respuesta a la tendencia de un material al cambiar sus propiedades, al aumentar la velocidad de corte. Este cambio se conoce como engrosamiento por corte.

Desde el punto de vista de inyecciones, el anterior modelo de fluidos se entiende cuando una lechada ingresa a una discontinuidad y para poder movilizarse a través de ella se requiere superar el esfuerzo cortante, para esto se adiciona una presión exterior para pasar por la diferentes aperturas que tiene la discontinuidad, tal como se muestra en la Figura 4.5.

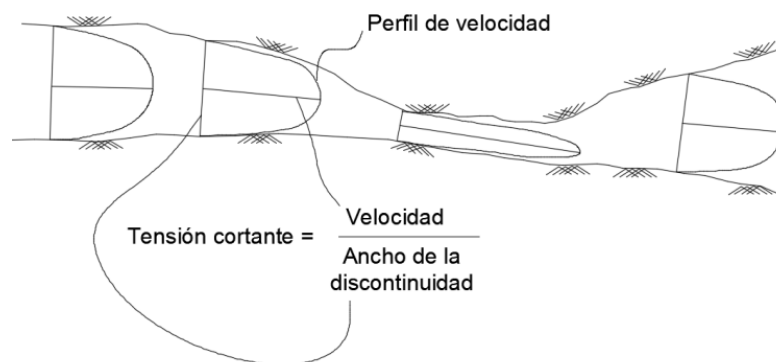


Figura 4.5. Perfiles de velocidad de una lechada a través de una discontinuidad.
Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houlsby, A.C. (1990).

En fluidos newtonianos, el esfuerzo cortante (es decir, la fuerza requerida para mover el fluido) está relacionado con la viscosidad dinámica. Mientras que en los fluidos no newtonianos el esfuerzo está relacionado con la cohesión o resistencia al corte y la viscosidad dinámica.

En mezclas de inyección de cemento cuando se disminuye la relación de agua: cemento la cohesión de la lechada aumenta, esta condición dominará el rendimiento reológico de la mezcla, tal como se observa en la Figura 4.6.

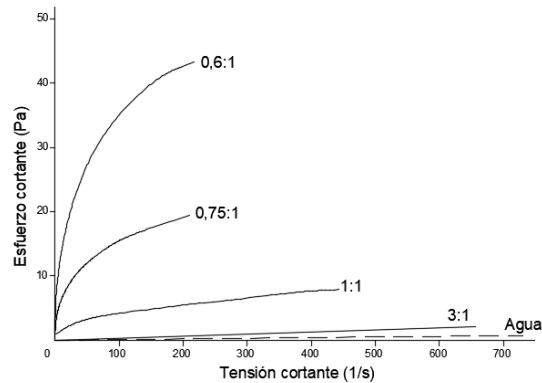


Figura 4.6. Comparación del comportamiento de lechadas de cemento.
Adaptado de “*Construction and design of cement grouting*” de Housby, A.C. (1990).

La Figura 4.6, fue elaborada a partir de ensayos simulando el modelo mostrado en la Figura 4.4, donde se colocó una fuerza requerida para movilizar la mezcla o un esfuerzo cortante, se observa que mezcla a base de cemento con menor contenido de agua requieren mayor esfuerzo cortante, por lo tanto estas mezclas requieren de mayores fuerzas para moverse a través de las discontinuidades. Para evitar presiones altas, es necesaria la adición de plastificantes a la mezcla para que pueda moverse fácilmente con presiones apropiadas.

4.2.2 Exudación

La exudación de una lechada ocurre debido a que las partículas sólidas individuales que se encuentra en reposo, tienden a asentarse debido a la gravedad, a una velocidad que está relacionada con su tamaño de grano, forma y densidad. La exudación en las lechadas de cemento se evita utilizando equipos mezcladores coloidales de alta velocidad.

El potencial desarrollo de la exudación en mezclas de cemento se relaciona con la finura del grano de cemento y la relación de agua: cemento. Según Bruce D. A. (2007), la velocidad de exudación incrementa al aumentar la relación de agua: cemento, esta situación se detalla en la Figura 4.7. En la misma se observa que el tiempo de exudación aumenta al disminuir la relación agua: cemento. El porcentaje de exudación es crucial para el tratamiento con inyecciones debido a que el agua que expulsa la mezcla durante el fraguado de la mezcla, crea espacios o caminos preferenciales, formando un tratamiento deficiente debido a los altos porcentajes de exudación.

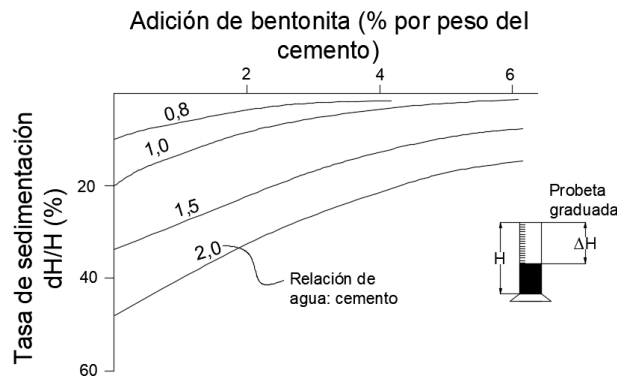


Figura 4.7. Tasa media de sedimentación de lechadas de cemento.
Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

Estos vacíos hacen que la lechada endurecida sea relativamente porosa, permeable y susceptible de erosión y disolución. Las lechadas que se consideran relativamente estables tienen una exudación menor del 5%.

4.2.3 Movilidad

La movilidad es la capacidad de una mezcla de inyección para viajar a través de un medio hacia el espacio que se va a rellenar. Igualmente, es la capacidad de limitar la mezcla para que no recorra una distancia más allá de la especificada. Por lo tanto, para obtener un procedimiento adecuado de inyección, la mezcla de inyección debe tener la suficiente movilidad para viajar dentro del medio y rellenar completamente el sector deseado, pero debe tener la movilidad suficiente para que no fluya más allá de la zona de inyección deseada.

Un concepto erróneo del diseño de mezclas de inyección, es que una mezcla “gruesa” es de baja o poca movilidad, mientras que una mezcla “más delgada” es de alta movilidad. En el diseño de la mezcla para inyección, la movilidad depende de los componentes o “ingredientes” que componen a la mezcla, para que una mezcla “delgada” sea de baja movilidad y una muestra “gruesa” tenga una alta movilidad.

4.2.4 Penetrabilidad

La penetrabilidad define la capacidad de una mezcla de inyección de impregnar una masa porosa, en las fracturas en el macizo rocoso o en pequeñas oquedades. En algunos casos se tiene a confundir la viscosidad de la mezcla con la penetrabilidad de una mezcla

de inyección. Sin embargo, la penetrabilidad de una mezcla determinada, depende de una combinación de viscosidad y humectabilidad. La humectabilidad de la mezcla se mide y se define por el ángulo de contacto de una gota de fluido con la superficie receptora. La humectabilidad es función de la tensión superficial entre el macizo rocoso y la mezcla de inyección.

La tensión superficial de la mezcla depende de la composición química de la mezcla de inyección que se está utilizando y las condiciones químicas y físicas del macizo rocoso. La afinidad de la mezcla, que resulta de su comportamiento de humectabilidad en el contacto entre la superficie del macizo rocoso y la mezcla de inyección, incluye las propiedades de tensión superficial, es fundamental para la penetrabilidad dentro del macizo rocoso.

Las mezclas de inyección de baja viscosidad pueden tener poca capacidad de penetración, mientras que las mezclas de inyección muy viscosas pueden ser muy penetrantes en la inyección de la mezcla.

4.2.5 Cohesión (Bingham yield point)

Tal como se describió en el numeral 4.2.1, la cohesión está relacionada con los fluidos no newtonianos. En la Figura 4.4, se observa que la cohesión es la intersección con el esfuerzo cortante y la viscosidad del fluido.

No existe un ensayo establecido por la ASTM para medir la cohesión de las mezclas. No obstante, existen varios métodos disponibles para determinar la cohesión. Uno de estos ensayos, es el sugerido por Deere y Lombardi (1985), la explicación del ensayo se muestra en el numeral 0.

4.2.6 Bombeabilidad

La capacidad de bombeo de una mezcla de inyección, se requiere para transportar la mezcla de desde una planta donde se genera la mezcla hasta el sitio del tratamiento a través de líneas o tuberías de inyección, para esto se requiere que la mezcla tenga la menor resistencia en la línea para evitar taponamiento de la misma. Así mismo, en caso de que la mezcla contenga arenas y/o agregados gruesos, se requiere que durante el bombeo de la mezcla hacia el sitio del tratamiento, tenga la menor segregación de la porción líquida de la mezcla, para evitar taponamientos en la línea de inyección.

Ciertos aditivos en la mezcla pueden mejorar la capacidad de bombeo de una mezcla de inyección, lo cual debe definirse en el diseño de la mezcla.

4.2.6.1 Mezclas de lechadas para inyección

Los componentes utilizados para las mezclas de lechadas para inyección en diferentes proporciones son los siguientes: cemento portland, cemento ultrafino, bentonita, *flyash*, escoria de alto horno, piedra pómez, humo de sílice o polvo de piedra caliza. Estos componentes son necesarios para mejorar la estabilidad de la mezcla (por ejemplo, para reducir el porcentaje de exudación) y reducir la proporción de agua y los materiales de cemento. En determinados proyectos es necesario disminuir las relaciones de agua: cemento, lo cual genera un mezcla espesa que al ser bombeada distancias largas al sitio de inyección, puede requerir bombas más potentes y tuberías más grandes y resistentes. Para optimizar el bombeo de las mezclas y reducir las presiones de bombeo, se sugiere utilizar superplastificante en la mezcla. Esto reducirá la viscosidad y la cohesión de la mezcla, permitiendo que las mezclas sean bombeadas distancias más largas.

En la Figura 4.8, se muestra el comportamiento de la viscosidad (en función del tiempo de la prueba del Cono de Marsh) y las relaciones de agua: cemento de la mezcla de lechadas de cemento con adición y sin adición del superplastificante.

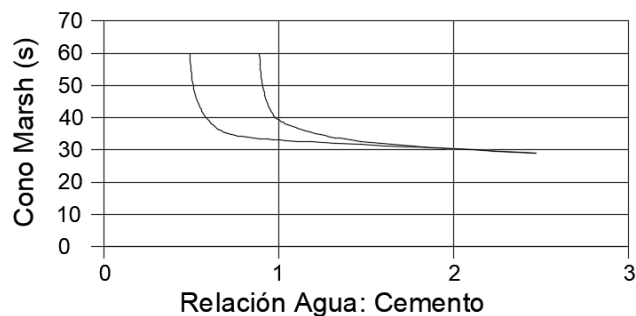


Figura 4.8. Relación de Viscosidad de las mezclas con la relación de agua: cemento.
Adaptado de "Rock grouting with Emphasis on Dam sites" de Ewert F-K. (1985).

4.2.7 **Tiempo de fraguado de la mezcla**

El tiempo de fraguado de la mezcla para el tratamiento con inyecciones es importante dependiendo los requerimientos del tratamiento. Por ejemplo, en caso de tratar un sector con flujo de agua en un túnel, requiere que la mezcla de inyección fragüe rápidamente antes de que sea lavada por el flujo del agua, para estos casos se utilizan aditivos de anti-

lavado. Otro ejemplo de fraguado rápido, es cuando se requiere rellenar los vacíos detrás de los revestimientos o dovelas en túneles excavados con TBM (*Tunnel Boring Machine*), para dar estabilidad al sistema de dovelas. En caso contrario, cuando se requiere que la mezcla de inyección fragüe en un tiempo extendido al normal, para rellenar espacios o vacíos grandes en el macizo rocoso y evitando el fraguado normal de la mezcla antes de rellenar completamente los vacíos.

Para ajustar los tiempos de fraguado existe una variedad comercial de aditivos que aceleran o retrasan el tiempo de fraguado de una determinada mezcla para inyección.

4.2.8 Peso específico

El peso específico de una mezcla de lechada se mide de acuerdo con la recomendación de la API (2009), utilizando una balanza de lodos de Baroid.

La balanza de lodos de Baroid es una balanza calibrada que mide la densidad de la mezcla requerida para la mezcla, cuando el resultado es mayor o menor a lo especificado en el diseño, significa que la proporción de cemento en la mezcla no es la adecuada, posiblemente por un error en la dosificación de sacos de cemento en la mezcla. La balanza de lodos tiene un precisión del 1% en la medición de la gravedad específica.

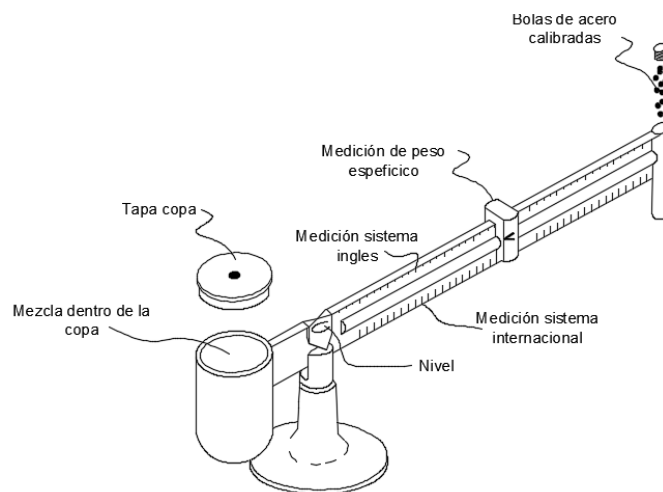


Figura 4.9. Balanza de lodos.

Adaptado de “*Rock grouting with Emphasis on Dam sites*” de Ewert F-K. (1985).

La descripción del ensayo para determinar el peso específico de la mezcla se muestra en el numeral 5.2.3.

4.2.9 Presión de filtración

Durante el proceso de inyección, la presión utilizada suele expulsar parte del agua en las mezclas inestables. Para verificar esta situación, se deben realizar pruebas de filtración a presión en las muestras que se utilizaran en el tratamiento. La descripción de la prueba para verificar la presión de filtración por la presión del proceso de inyección, se muestra en el numeral 5.1.2.

Esta tendencia de la mezcla de perder agua durante el proceso de inyección se cuantifica por el término coeficiente de presión de filtración.

En la Figura 4.10, se detallan las pruebas realizadas de la presión de filtración para mezclas estables e inestables, mostrando la relación entre el coeficiente de presión de filtración y la cohesión de la mezcla.

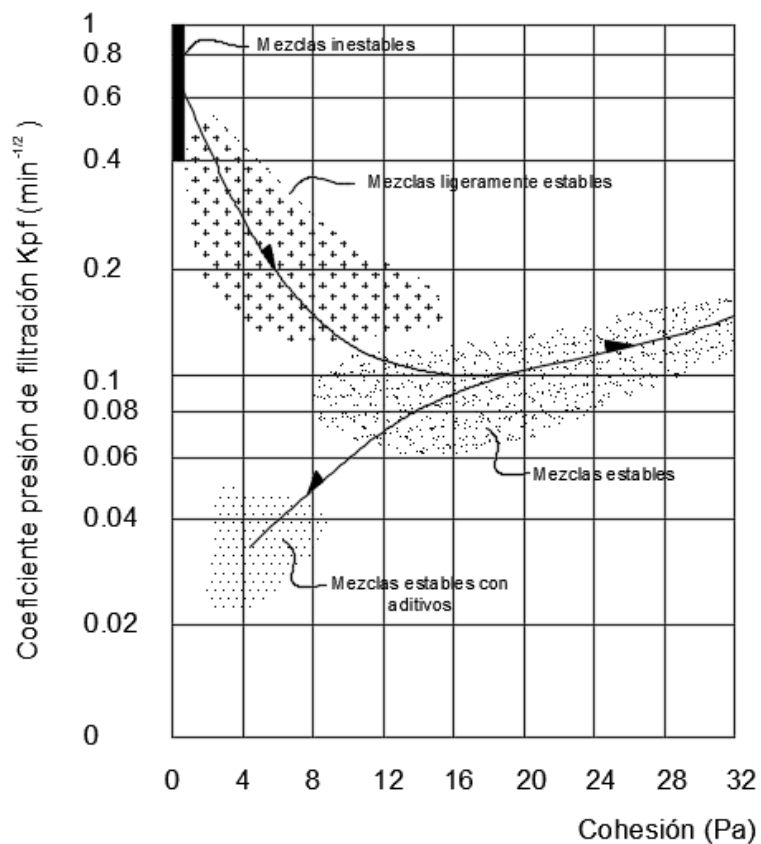


Figura 4.10. Coeficiente de presión de filtración.
Adaptado de "Rock grouting with Emphasis on Dam sites" de Ewert F-K. (1985).

Cuando las relaciones de agua: cemento son altas, la cohesión se reduce. No obstante, en este tipo de mezclas el coeficiente de presión de filtración (K_{pf}) es alto, lo cual reduciría drásticamente la penetrabilidad en el macizo rocoso.

De la Figura 4.10, se entiende que las mezclas bajas relaciones de A: C con aditivos estabilizadores y plastificantes, generan mezclas de baja viscosidad (tiempo menor de 50 segundos, en el ensayo de viscosidad del Cono de Marsh, véase numeral 5.2.1). Estas mezclas con aditivos son de cohesión baja, con poca exudación (<5%) y con bajos coeficientes de presión de filtración (<0.02), se pueden utilizar altas presiones de inyección sin tener pérdida de agua en la mezcla. Por lo tanto, este tipo de mezclas son las más utilizadas en los tratamientos con inyecciones.

4.2.10 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de la mezcla utilizada para el tratamiento con inyecciones es necesaria para el tratamiento en macizos rocosos, debido a que una resistencia a la compresión alta de la mezcla, reduce el efecto del lavado (también llamado "*Leaching*") de la mezcla dentro del macizo, por efecto de presiones hidráulicas o exposiciones a soluciones agresivas. El "*leaching*" no solo se presenta en los tratamientos de fundaciones para presas, sino también se puede presentar en tratamientos en túneles con anillos radiales o de consolidación, por ejemplo en tratamientos con inyecciones en la zona de los portales de entrada y salida en túneles de desviación. La resistencia a la compresión es primordial en las zonas kársticas las cuales serán rellenadas con la mezcla de inyección.

En la Figura 4.11, se muestra que la resistencia a la compresión de una mezcla de inyección mejora de acuerdo con las condiciones de curado de la mezcla.

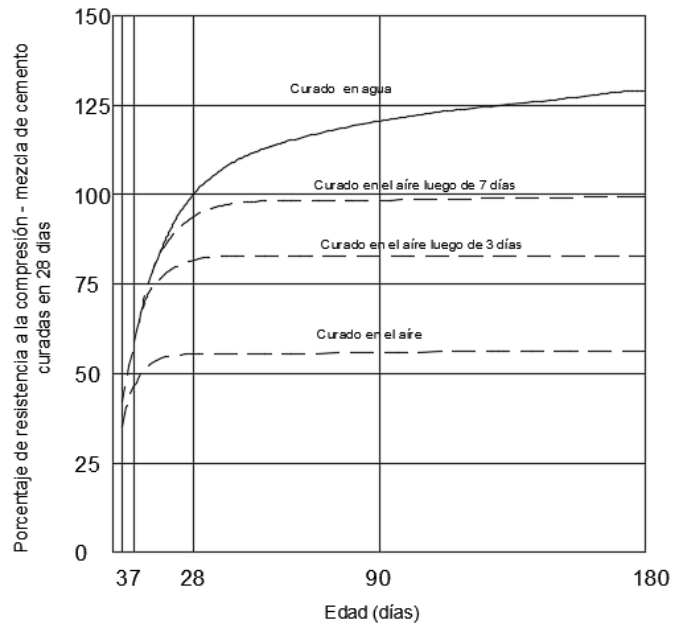


Figura 4.11. Relación entre la resistencia a la compresión, la edad y el curado del concreto.

Adaptado de "Dam foundation grouting". Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

Una aproximación de la relación entre la resistencia y la relación de agua: cemento es proporcionada por la Ley Abrams, que establece que:

$$\sigma = A/B^{(A:C)*1.5} \quad (4.1)$$

Donde, σ =resistencia a la compresión
 A = 14.000 lb/pul²
 B= 4 (Varia con el tipo de cemento)
 A: C= Relación agua: cemento, por peso

Se pueden alcanzar resistencias a la compresión de mezclas para inyección de 70 a 85 MPa, en mezclas de cemento, agua y aditivos, en algunos casos se pueden alcanzar resistencias superiores a 100 MPa, pero requiere un diseño de mezcla especializado. Por otro lado, cuando a la mezcla de inyección se le adiciona bentonita o espumas, la resistencia se reducirá. No obstante, en tratamientos con inyecciones no se requieren resistencias tan altas.

Los rangos típicos de resistencia a la compresión de mezclas con cemento son generalmente de 21 a 35 MPa. Con mezclas compuestas de otros materiales tienen resistencia a la compresión desde 0,7 a 21 MPa. Las mezclas usualmente usadas en los

tratamientos con inyecciones son mezclas de cemento portland y agua en una relación de A: C de 1: 1, las resistencias a la compresión varían de 14 a 25 MPa. Si se requiere aumentar la resistencia a la compresión de la mezcla para el tratamiento, aumentara proporcional el costo con la resistencia deseada. Por lo que se debe, estipular una resistencia a la compresión mínima de acuerdo a las condiciones del proyecto o del sitio donde se realizara el tratamiento con inyecciones.

4.2.11 Contracción de la mezcla

Las mezcla de inyección a base de cemento se expanden ligeramente con la ingreso humedad y se contraen con la pérdida de humedad. La contracción ocurre proporcionalmente a la cantidad de agua utilizada en la mezcla. En la Figura 4.12, se muestra la contracción en varias muestras con diferentes contenidos de agua (litros por metro cubico), en micrómetros. Los detalles de los ensayos de contracción de mezclas se muestran en la norma ASTM C157.

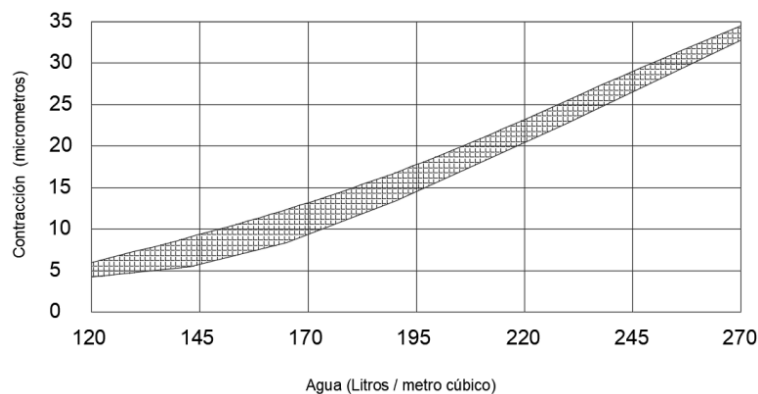


Figura 4.12. Contracción de las mezclas en función del agua.
Adaptado de “*Rock grouting with Emphasis on Dam sites*” de Ewert F-K. (1985).

El uso de mezclas para inyecciones de contacto entre un revestimiento de un túnel y la superficie de roca, usualmente se usan relaciones A: C de 1: 1 por su baja contracción. Sin embargo, si se requieren mezclas con relaciones A: C menores, se pueden utilizar aditivos en la mezcla para reducir los efectos de contracción en la mezcla hasta en un 40%.



Fotografía 4.1. Inyecciones de contacto para rellenar espacios detrás de blindajes.
Fuente del autor.



Fotografía 4.2. Inyecciones de contacto para rellenar espacios entre roca y revestimiento.
Fuente del autor.

4.2.12 Durabilidad de la mezcla

La durabilidad mezcla al igual que la resistencia a la compresión es función de la relación A: C. Una mezcla más gruesa o relaciones de A: C altas no permitirá la penetración de agua o de sustancias nocivas.

Durante el diseño de las mezclas se deben considerar tres condiciones que pueden afectar la durabilidad del tratamiento: (1) Condiciones de congelación y descongelación; (2) Ataque de cloruros si hay metales ferrosos; y (3) Ataque de sulfatos u otros agentes químicos sobre el tratamiento con mezclas a base de cemento.

Así mismo, se deben realizar ensayos de laboratorio en la mezcla con los fluidos potencialmente agresivos y/o perjudiciales con los que podría entrar en contacto el tratamiento durante y/o después del tratamiento con inyecciones. Durante estos ensayos se debe observar como es el comportamiento de las muestras con los fluidos perjudiciales para inspeccionar visualmente algún indicio de deterioro. Estas pruebas son importantes para diseñar una mezcla para inyección adecuada para tratamientos en macizos rocosos donde se depositaran depósitos peligroso, por ejemplo una cortina profunda de una presa de relaves de una mina que pueden retener lixiviados ácidos.

También es importante revisar el contenido de las filtraciones existentes en el macizo rocoso que pueden contener ácidos orgánicos o encontrar filtraciones de fluidos geotérmicos.

Ensayos mostrados por Bruce (2007), detallan que mezclas de relación A: C bajas dan como resultado una permeabilidad baja, tal como se muestra en la siguiente figura.

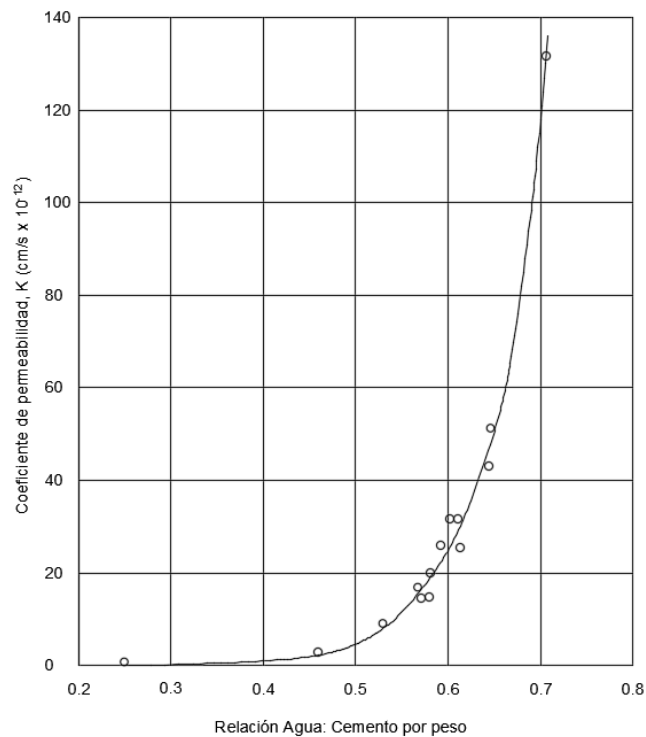


Figura 4.13. Relación entre la relación A: C y permeabilidad de la mezcla de inyección a base de cemento.

Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

4.3 AGUA

Para las mezclas para inyección se utiliza agua que sea potable que no tenga sabor u olor. Sin embargo, el agua no potable se puede utilizar para algunas mezclas. Estas mezclas deben cumplir con los ensayos de laboratorio que se explican en el numeral 5.1, como lo son los ensayos de resistencia a la compresión (ASTM C109), la calidad del agua no debería reducir la resistencia mínima requerida de diseño y el ensayo de la aguja Vicat (ASTM C191), verificara que las impurezas en el agua de la mezcla de inyección no reduzcan ni extiendan el tiempo de fraguado de la mezcla.

Los criterios aceptables para el uso del agua en las mezclas se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 4.1. Criterios de aceptación para fuentes de agua

	Límites	Método de ensayo
Resistencia a la compresión, mín. % control a los 7 días	90	C109 / C109 M ^A
Tiempo de fraguado, desviación del control, h:mín	Desde 1:00 más temprano Hasta 1:30 más tarde	C191 ^A

^A Las comparaciones deben basarse en dosificaciones fijas y el mismo volumen de agua de ensayo comparado con la mezcla de control usando agua potable o agua destilada.

Adoptado de "Standard Specification for Ready-Mixed Concrete" ASTM C94. (2018a).

Tabla 4.2. Límites químicos opcionales para el agua

	Límites	Método de ensayo ^A
Requisitos químicos, concentración máxima en agua de mezclado, ppm ^B		
Cloruro como Cl, ppm:		D 512
Concreto pretensado o en cubiertas de puentes	500 ^C	
Otros concretos reforzados en ambientes húmedos o con formaletas de aluminio o metal similar o con moldes metálicos galvanizados permanentes	1000 ^C	
Sulfato como SO ₄ , ppm	3000	D 516
Álcalis como (Na ₂ O+0,658 K ₂ O), ppm	600	
Sólidos totales, ppm	50000	ASSHTO T26

^A Se permite usar otros métodos de ensayo que hayan demostrado entregar resultados comparables.

^B Se permite que el agua reutilizada como agua de mezclado en el concreto exceda las concentraciones mencionadas si se puede demostrar que la concentración calculada en el agua total de mezclado, incluida el agua de mezclado en los áridos y otras fuentes, no excede los límites establecidos.

^C Para condiciones que permiten el uso de acelerador CaCl₂ como un aditivo, se permite que el comprador descarte el límite de cloro.

Adoptado de "Standard Specification for Ready-Mixed Concrete" ASTM C94. (2018a).

Las impurezas en el agua pueden afectar el tiempo fraguado de la mezcla de inyección y la resistencia de compresión, sino que también pueden causar eflorescencias en el macizo rocoso, manchas, corrosión en el refuerzo del concreto y menor durabilidad de la mezcla. Por lo tanto, se requiere unos límites óptimos de cantidades de cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de la mezcla, por lo que se requiere realizar pruebas con el agua que se usará en la mezcla para verificar que dichas impurezas afecten la resistencia a la compresión y el tiempo de fraguado.

Por las anteriores aclaraciones, durante la etapa de diseño del programa de inyección se debe estipular los requisitos específicos del proyecto para la aceptación del agua para la mezcla de inyección.

4.4 CEMENTO

En general, las mezclas utilizadas para tratamientos de macizos rocosos con inyecciones se utilizan dos materiales: cementos Portland y cementos ultrafinos. Los cementos Portland se fabrican de diferentes tipos para cumplir con diversos requerimientos físicos y químicos según lo requerido para el proyecto.

El cemento Portland consiste en una mezcla de materiales calcáreos como calizas y materiales arcillosos como arcillas o pizarras. Estos materiales o materia primas se combinan, trituran y se queman en un horno rotatorio a temperaturas elevadas (1430°C a 1650°C). El material resultante, Clinker, se pulveriza al enfriarse. Este material contiene cuatro componentes principales: C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF . Las proporciones de estos cuatro componentes variaran según la variación de materiales minerales de los que se compone el Clinker. En la Tabla 4.3, se muestra un ejemplo de proporciones típicas de estos componentes en el cemento Portland.

Tabla 4.3. Valores típicos de los compuestos químicos principales en el cemento Portland

Tipo de cemento	Descripción	Rangos típicos de compuestos químicos en el Cemento Portland (%)			
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
I	Para uso de propósitos generales	45 – 55	20 – 30	8 – 12	6 – 10
II	Resistencia moderada a los sulfatos	40 – 50	25 – 35	5 – 7	6 – 10
III	Resistencia a la compresión alta en edades iniciales	50 – 65	15 – 25	8 – 14	6 – 10
V	Resistencia a sulfatos	40 – 50	25 – 35	0 – 4	10 – 20

Adoptado de “*Practical handbook of grouting. Soil, Rock, and Structures*” de James Warner (2004).

El cemento Portland es muy activo, debido a que se produce una reacción química al entrar en contacto con el agua. Esta reacción se conoce como hidratación, la cual es exotérmica, es decir, que produce calor por la reacción, esta es la responsable de endurecer la composición cementosa.

4.4.1 Tipos de Cemento Portland

La norma ASTM C150 (2018c), especifica varios tipos de cemento Portland. Sin Embargo, las mezclas a base de cemento Portland utilizadas para los tratamientos con inyecciones en general se utilizan cementos tipos I, II, III, IV y V.

4.4.1.1 Cemento Tipo I

Es el tipo de cemento de uso general para la mayoría de mezclas para tratamientos con inyecciones donde no se requiera propiedades especiales de otros tipos, como lo es la resistencia al sulfato.

4.4.1.2 Cemento Tipo IA

Es similar al cemento Tipo I, pero incluye incorporadores de aire.

4.4.1.3 Cemento Tipo II

Se fabrica para resistir ataques moderados de sulfatos y tener mayor tiempo de fraguado que la del tipo I.

4.4.1.4 Cemento Tipo IIA

Es similar al cemento Tipo II, pero incluye incorporadores de aire.

4.4.1.5 Cemento Tipo III

Este cemento se utiliza cuando se desean altas resistencias a la compresión en edades tempranas, esta propiedad hace que estos cementos sean adecuados para proyectos donde el espacio sea limitado. El tamaño de las partículas del cemento Tipo III, con una finura de Blaine del orden de $5.400 \text{ cm}^2/\text{g}$. Debido a este tamaño de partícula facilita la penetración de la mezcla en discontinuidades muy cerradas y tratar adecuadamente el macizo rocoso.

4.4.1.6 Cemento Tipo IIIA

Es similar al cemento Tipo III, pero incluye incorporadores de aire.

4.4.1.7 Cemento Tipo IV

Este tipo de cemento genera menor calor de hidratación que el cemento tipo II. Sin embargo, su resistencia de diseño se desarrolla a mayores edades que el cemento tipo I. Este tipo de cemento, es utilizado cuando se requiere que la mezcla no genere temperaturas altas por el calor de hidratación de la reacción química entre el agua y el cemento. Aunque, este objetivo también se logra incluyendo puzolanas a mezclas con cemento Tipo I o II.

4.4.1.8 Cemento Tipo V

Es cemento se fabrica para tratamientos que estarán expuestos a una acción severa o agresiva de sulfatos. Sin embargo, el tamaño de partícula es más grueso que la partícula del cemento Tipo III, lo cual reduciría la penetrabilidad en el macizo rocoso.

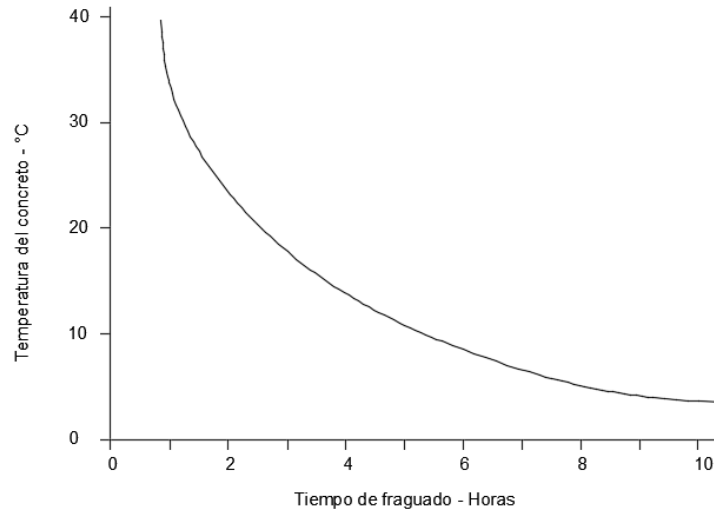


Figura 4.14. Temperatura del concreto conforme fragua.
Adoptado de "Practical handbook of grouting. Soil, Rock, and Structures" de James Warner (2004).

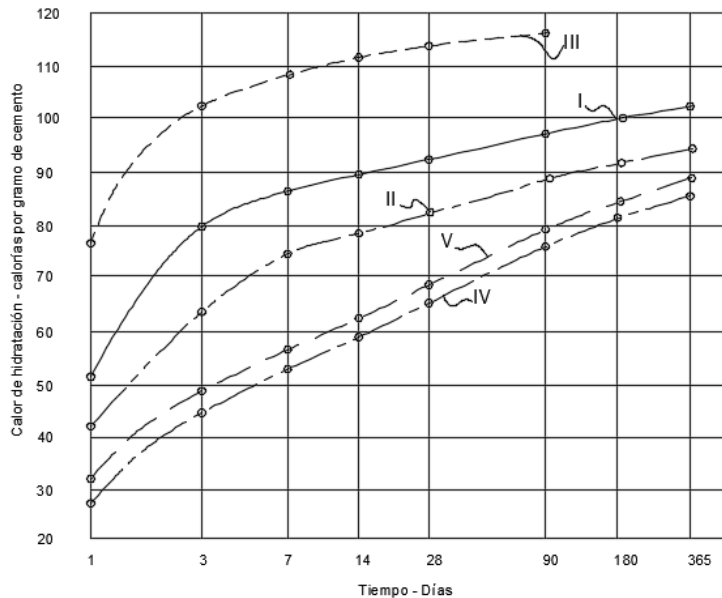


Figura 4.15. Efectos de la reacción exotérmica para diferentes tipos de cemento.
Adoptado de "Practical handbook of grouting. Soil, Rock, and Structures" de James Warner (2004).

4.4.2 Otros cementos

No usual que en la ingeniería geotécnica el uso de otros cementos a parte del Portland. Sin embargo, existen otros cementos especiales disponibles en el mercado, por lo que a continuación se realiza una descripción breve de estos cementos.

4.4.2.1 Cementos para pozos de petróleo

Estos cementos se utilizan para impermeabilizar el macizo rocoso alrededor de pozos de petróleo y gas. Los cementos se requieren dentro del pozo de petróleo para tratar el macizo a grandes profundidades, con temperaturas y presiones altas y ambientes de sulfatos. La clasificación de estos cementos se describe en las especificaciones API 10 (2005).

4.4.2.2 Cemento de aluminato de calcio (CAC)

El cemento de aluminato de calcio (CAC), se desarrolló en Francia a principio del siglo XX debido a varias condiciones por su endurecimiento rápido, hormigonado en condiciones de frío y resistencia al agua de mar. Estos cementos pueden requerirse en condiciones de ambientes ácidos donde se presenten pH del rango de 3.5 a 6. Por lo tanto el uso de estos cementos en mezclas para tratamientos con inyecciones debería considerarse para su uso en estos ambientes.

4.4.2.3 Cementos de alumino-silicato y escoria activada por álcali

Estos cementos reaccionan con álcali, cal y una amplia gama de escorias silíceas de las industrias metalúrgicas y productoras de fósforo. Sus ventajas son:

- Bajo costos por ser desperdicio de las industrias metalúrgicas.
- Alta resistencia a la compresión en edades tempranas.
- Bajo calor de hidratación
- Resistencia al ataque de sulfatos y cloruros

4.4.2.4 Cementos de sulfo-aluminato de calcio

El sulfo-aluminato de calcio C_4A_3S , es la propiedad de este cemento requerido para proyectos específicos. En ambientes con presencia de cal y sulfato de calcio, hidratándose rápidamente formado etringita, formando un sistema cristalino con forma trigonal o prismático. Su principal uso es por su desarrollo de altas resistencia a edades

tempranas, por ejemplo es posible obtener resistencias a la compresión de más de 50 MPa en 12 a 24 horas. Otra ventana es la capacidad de solidificar lechadas con alto contenido de agua.

4.4.2.5 Cementos adicionados hidráulicos

Según la norma ASTM C595 (2018d), estos cementos están en una categoría diferente que contienen cemento Portland y cualquier de los tipos de puzolanas.

4.4.3 Cementos ultrafinos

Las mezclas utilizadas a base de cemento ultrafino se utilizan principalmente para el tratamiento de suelos o estratos de arenas finas y para microfisuras que no podrían ser tratadas con mezclas a base de cemento portland. Las razones de utilizar estos cementos son: (1) reducir la permeabilidad del macizo rocoso y (2) mejorar las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso.

El objetivo del tratamiento con inyecciones en un macizo rocoso puede ser uno o ambos dependiendo las necesidades del proyecto. Los tratamientos con mezclas a base de cemento ultrafino se han utilizado en excavaciones subterráneas (túneles, pozos, cámaras y operaciones de minería subterránea), en tratamientos para mejoramiento de cimentaciones de estructuras para impregnar el suelo y/o la roca y mejorar las propiedades mecánicas de la fundación.

Tal como se muestra en la Figura 4.2, el tamaño de la partícula de los cementos ultrafinos es de 10 micras. Otra comparación del tamaño de partícula del cemento ultrafino se muestra en la Figura 4.16, donde se muestran las curvas de gradación típica para el cemento ultrafino en comparación con el cemento portland de los tipos I y III.

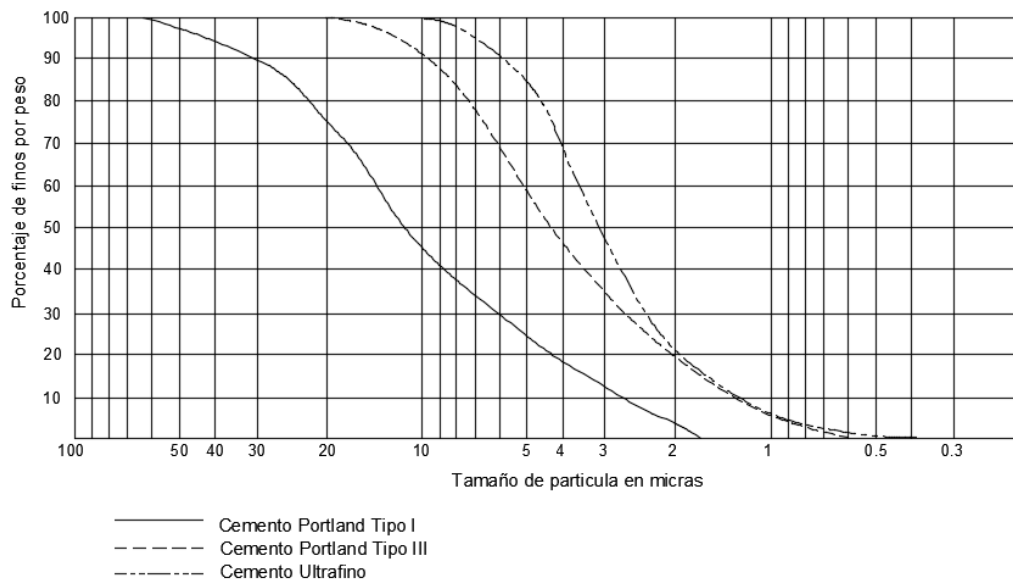


Figura 4.16. Curvas típicas de gradación comparando el cemento ultrafino con el cemento Portland Tipo I y III.

Adaptado de “*Ultrafine Cement in Pressure Grouting*”. Henn y Soule (2010).

4.5 PUZOLANAS

Las puzolanas son el resultado de desechos industriales que se agregan al cemento Portland, esta mezcla es más económica que el cemento Portland puro, debido a que estos desechos tienen costos bajos o nulos. Las puzolanas proporcionan ciertas propiedades a la mezcla ya que contienen sílice o compuestos de sílice que se disuelve en el proceso de hidratación del cemento Portland, lo que genera un hidrato de silicato de calcio más fino que el normal. Esta mezcla de puzolanas y cemento Portland, reacciona más lento que el cemento Portland, lo que aumenta la resistencia a la compresión de la mezcla y reduce su permeabilidad.

En la Figura 4.17, se detalla la composición química de los tres tipos principales de puzolanas.



Figura 4.17. Aditivos minerales y composiciones de cemento.
 Adoptado de “*Practical handbook of grouting. Soil, Rock, and Structures*” de James Warner (2004).

4.5.1 Cenizas volantes

Las cenizas volantes (*Fly Ash*), son un polvo de grano fino precipitado eléctricamente, formado a partir de material mineral del carbón pulverizado durante el proceso de combustión en las termoeléctricas de carbón. En la norma ASTM C618 (2019), se detallan los tipos de cenizas volantes

Las clases de cenizas volantes se describen brevemente a continuación:

Clase F: Son cenizas de uso frecuente con características puzolánicas, pero no son cementosas, por lo que requieren una fuente de calcio para hidratarse. Esta fuente es el hidróxido de calcio (o cal libre), lo cual reacciona en el contacto con el agua y el cemento. Las mezclas de inyección que tienen cenizas clase F tienen un tiempo de curado extenso.

Clase C: Son cenizas que son puzolánicas y cementosas a la vez, por lo que reaccionara cuando se hidrate. Estas cenizas tienen la desventaja en las mezclas para inyección de tener resistencias bajas si su concentración es mayor del 15% del peso del cemento, lo que se debe revisar en el diseño de la mezcla cuidadosamente para evitar esta situación.

4.5.2 Material de escoria de horno

La escoria de horno, se describe en la norma ASTM C989 (2018e), es un subproducto de la producción de hierro. Está compuesto de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases. Cuando se utiliza material de escoria de horno en la mezcla de inyección, la resistencia, la permeabilidad, bombeabilidad y cohesión mejoran. Debido a que el material de escoria no reacciona rápidamente con el agua. Así mismo, cuando el contenido de material de escoria es mayor al 50% en la mezcla para inyección, la resistencia al sulfato es comparable cuando se utiliza Cemento Portland Tipo V.

Cuando se utiliza material de escoria de horno en la mezcla de inyección, se mejoran las siguientes propiedades de la mezcla:

Se mejoran las propiedades reológicas, se obtiene una alta resistencia, la resistencia contra la acción corrosiva de agentes químicos y biológicos es alta, el tiempo de fraguado inicial y final es controlable, se pueden utilizar relaciones agua: cemento altas, se reduce la permeabilidad de la mezcla, la penetrabilidad de la mezcla mejora, bajo costo y no tiene efectos nocivos en el medio ambiente.

4.5.3 Humo de sílice

El humo de sílice es un subproducto de la extracción de silicio o la fabricación de ferrosilicio. Esta puzolana se utiliza cuando se desea mezclas de alta resistencia. Este material está formado por SiO_2 casi puro, con un diámetro de grano equivalente a un 1% del diámetro de grano del cemento Portland, lo cual general una densidad menor a la del cemento Portland.

La adición de humo de sílice en las mezclas de cemento para inyección, reduce la exudación, mejora la estabilidad y la capacidad de penetración de la mezcla y también reduce la permeabilidad de la mezcla fraguada, lo que mejora la durabilidad. También mejora la resistencia a la filtración a presión.

4.5.4 Puzolanas naturales

Estas puzolanas son aquellas que se encuentran en depósitos no consolidados de erupciones volcánicas explosivas. Por lo que, sus partículas son pequeñas y están compuestas de minerales de cuarzo y feldespatos, estas se transportan en el aire y se

enfrian en cuerpos de agua cercanos. Las puzolanas naturales son extremadamente reactivas y contribuyen con el comportamiento puzolánico.

En general, las puzolanas naturales son más reactivas que las cenizas volantes, aunque producen productos de hidratación similares. Su uso es poco utilizado en las mezclas para inyección, debido a su disponibilidad y variabilidad química. Aunque, estas ofrecen las mismas ventajas que las demás puzolanas, si son utilizadas en las mezclas para inyección.

4.6 ARCILLAS

En la historia del uso de inyecciones, como se describió en el numeral 2.8, en Europa se utilizó una amplia gama de minerales de arcillas como tratamiento, para reducir costos y consumos de cemento. Las arcillas utilizadas reducían la exudación de la mezcla y modificaban su cohesión.

A continuación se explica una breve descripción de las arcillas:

Son partículas cristalinas que consisten en uno o más grupos de aluminosilicatos con iones de magnesio o hierro en una red cristalina, estos grupos también pueden contener otros iones alcalinos.

Los minerales de la arcilla son tetraedros de sílice ensamblados en láminas en una estructura hexagonal en la que cada tres de los cuatro átomos de oxígeno se ensamblan alrededor de un átomo de sílice, como se detalla en la Figura 4.18.

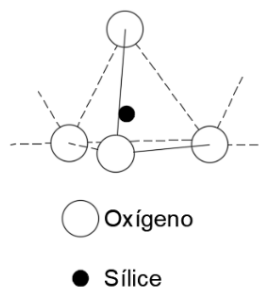


Figura 4.18. Mineral de arcilla. Tetraedro de sílice.
Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

Así mismo, existen octaedros de aluminio o magnesio ensamblados en láminas con un átomo de oxígeno común o un grupo hidroxilo alrededor de los átomos de aluminio o magnesio.

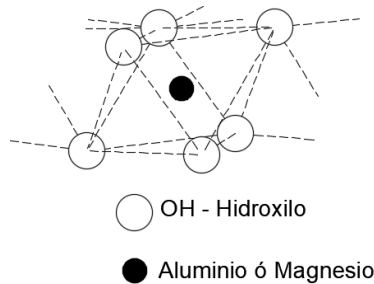


Figura 4.19. Mineral de arcilla. Octaedro de aluminio o de magnesio.
Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

En la Figura 4.20, se detalla una representación esquemática de los cristales que conforman la arcilla como unidades de sección trapezoidal sobre láminas de sílice, el lado más estrecho representa el plano de la parte superior de los tetraedros con átomos de oxígeno, los rectángulos representan los elementos octaédricos de aluminio o magnesio.

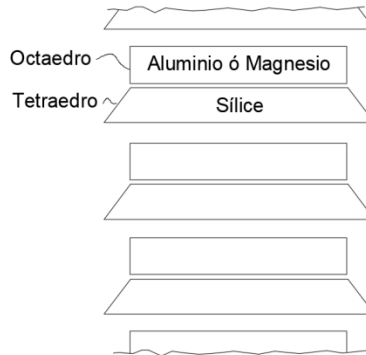


Figura 4.20. Representación esquemática de los cristales que conforman la arcilla.
Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

4.6.1 Montmorillonita y Bentonita

La montmorillonita consiste en tres bloques en la disposición Sílice: Octaedro de Aluminio: Sílice con átomos de oxígeno comunes y grupos hidroxilo (Aluminio) en ambos planos adyacentes y en la parte superior de los tetraedros de Sílice que forman grandes planos. Los enlaces en estos planos son el resultado de las fuerzas de Van Der Waals que están presentes para equilibrar los iones faltantes en la estructura. Estos enlaces débiles se

rompen fácilmente mediante la división o la absorción de las moléculas de agua, lo que produce un alto potencial de hinchamiento al humedecerse (material hidrófilo). Esta propiedad de hinchamiento es importante para las mezclas de inyección.

La bentonita es una arcilla montmorillonita que contiene pequeñas cantidades de granos inertes, como lo son el cuarzo o la calcita.

Según Deere y Lombardi (1985), explicaron que la bentonita limita la distancia de viaje de la mezcla de inyección, debido a su aumento de cohesión y viscosidad. Sin embargo, la bentonita es un material utilizado en las mezclas de inyección, debido a que reduce la exudación de la mezcla y mejora la estabilidad de la mezcla. Por lo tanto, es un material esencial cuando el objetivo del tratamiento no requiera una resistencia alta.

De acuerdo con Bruce (2007), sugiere mezclas con bentonita en una proporción en peso del cemento del 2% al 5%, aunque se pueden utilizar proporciones más altas que dependen del tipo de tratamiento.

4.6.2 Otras arcillas

Existen otros minerales arcillosos, como lo son la caolinita (sin impurezas indeseables como el yeso), la illita, la biedelita y la halloysita que es inusual utilizar en mezclas para inyecciones. Sin embargo, si se utilizan arcillas con estos minerales pueden utilizarse si están disponibles en el sitio del tratamiento.

Según Bruce (2007), las arcillas seleccionadas para agregar a la mezcla de inyección deben tener un límite de líquido superior a 60. Los aditivos químicos que se adicionaran a la mezcla de inyección con arcillas deben ajustar el pH de la mezcla, también se pueden adicionar silicatos, agentes cementantes. Al adicionar dichos aditivos las mezclas de inyección pueden alcanzar relaciones de Agua: Cemento de hasta 1: 10.

4.7 MATERIALES INERTES

Las materiales inertes que se pueden adicionar a las mezclas de inyección para reducir el costo de la mezcla o mejorar las propiedades reológicas de la mezcla. Con la proporción adecuada de materiales inertes en la mezcla se puede reducir la permeabilidad y mejorar la estabilidad de la misma.

Uno de los materiales inertes más utilizados en las mezclas de inyección, es la arena. La cual no reacciona químicamente con los componentes de la mezcla. Para el uso de la arena en la mezcla Bruce (2007), sugiere utilizar arenas finas o arenas limosas con partículas bien redondeadas. El uso de la arena en la mezcla para inyección, es cuando las discontinuidades del macizo rocoso son abiertas, debido a que las partículas de arena pueden bloquear rápidamente las discontinuidades y no viajar lo suficiente para obtener un tratamiento adecuado. Por eso, el uso de arena en la mezcla de inyección se utiliza para relleno de oquedades o de cavidades.

La arena que cumple los anteriores requerimientos, es la que esta descrita en la norma ASTM C33 (2018f), que corresponde con la norma para agregados de concreto, la arena que esta descrita en esta norma debe utilizar con cuidado en las mezclas para inyección. Los límites de gradación utilizados en las mezclas para inyección se describen en la siguiente tabla.

Tabla 4.4. Límites de gradación para arenas utilizadas para concreto según la norma ASTM C33.

Tamaño del tamiz	Porcentaje que pasa por peso
N° 2 (9.5 mm)	100
N° 4 (4.75 mm)	95 – 100
N° 8 (2.36 mm)	80 – 100
N° 16 (1.18 mm)	50 – 85
N° 30 (600 µm)	25 – 60
N° 50 (300 µm)	10 – 30
N° 100 (150 µm)	2 – 10

Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

La gradación y el tamaño máximo del grano de arena deben ser compatibles con las condiciones geológicas y de los equipos utilizados para la mezcla y bombeo.

La arena en las mezcla para inyecciones tienen sedimentarse y por lo tanto, tienen a obstruir los equipos utilizados de en el tratamiento. Además, la arena es abrasiva por lo que tiende a desgastar más rápido los equipos y las tuberías donde pasará la mezcla

Otros materiales inertes utilizados para las mezclas de inyección, son los relaves de las minas, polvo de horno, piedra pómez, entre otros. El uso de estos materiales, deben evaluarse para revisar la compatibilidad con los otros componentes de la mezcla.

De acuerdo a lo explicado por Bruce (2007), se han utilizado una diversidad de materiales inertes en las mezclas para inyecciones según la disponibilidad en el sitio. Alguno de estos materiales son: aserrín, bolsas de cemento, virutas de madera, plástico triturado, cascara de coco, avena, entre otros materiales particulares que se utilizaron para el relleno de oquedades. El uso de estos materiales es inusual y hoy en día, no se utilizan debido a la gran gama de materiales y aditivos existentes para realizar tratamientos con inyecciones adecuados.

4.8 ADITIVOS QUÍMICOS

Los aditivos químicos se utilizan en las mezclas para inyección para complementar y modificar las propiedades de la mezcla, por lo general la adición de estos aditivos se realiza antes del fraguado. Para proporcionar propiedades específicas a la mezcla según los requerimientos del tratamiento. La adición de estos aditivos a la mezcla debe ser químicamente compatible con los otros componentes de la mezcla.

Diferentes autores (Bruce, Warner, Houlsby, Baker, entre otros), recomiendan que el uso de aditivos químicos en la mezcla sea de un mismo proveedor desde el inicio del proyecto. Debido a que los fabricantes de estos aditivos varían los componentes de la mezcla. El proveedor de los aditivos químicos debe informar y capacitar al diseñador del tratamiento y al personal en obra en el inicio y durante el tratamiento para utilizar adecuadamente dichos aditivos. Por ejemplo el proveedor debe informar cuando y como se debe incorporar el aditivo en la mezcla.

La norma ASTM C494 (2017b), explica las diferentes propiedades de los aditivos utilizados para las mezclas. La ASTM enumera siete tipos de aditivos químicos:

- Tipo A (reductor de agua): Reduce el porcentaje de agua en la mezcla del orden de 5% al 12%, aumenta la resistencia a la compresión de la mezcla en un 10% y no influye en el tiempo de fraguado.
- Tipo B (retardante): Aumenta el tiempo de fraguado de 1 a 3.5 horas.
- Tipo C (acelerante): Disminuye el tiempo de fraguado de 1 a 3.5 horas.
- Tipo D (reductor de agua y acelerante): Aumenta el tiempo de fraguado de 1 a 3.5 horas e incrementa la resistencia a la compresión de la mezcla por lo menos un 10%.

- Tipo E (reductor de agua y acelerante): Aumenta el tiempo de fraguado de 1 a 3.5 horas e incrementa la resistencia a la compresión de la mezcla por lo menos un 10%.
- Tipo F (reductor de agua de alto rango): reduce el porcentaje de agua en la mezcla del orden de 10% al 40%. Así mismo, se incrementa la resistencia a la compresión de la mezcla en un 40%.
- Tipo G (reductor de agua de alto rango y retardante): reduce el porcentaje de agua en la mezcla del orden de 10% al 40%. Así mismo, se incrementa la resistencia a la compresión de la mezcla en un 25% y aumenta el tiempo de fraguado de 1 a 3.5 horas.

Los aditivos químicos tipo F y G se denominan como superplastificantes

4.8.1 Aditivos para modificar las propiedades de la mezcla

Las propiedades de la mezcla se explican en el numeral 4.2. Estas propiedades están controladas por varios factores, como la relación Agua: cemento, la composición del cemento y el área de superficie específica. Para modificar dichas propiedades se utilizan diferentes aditivos, descritos a continuación.

4.8.1.1 Acelerantes

Los aceleradores se utilizan para reducir los tiempos de fraguado de las mezclas y endureciendo rápidamente las mezclas en el tratamiento. Este aditivo cambia las etapas de hidratación del silicato.

El fraguado rápido de la mezcla, sirve para tratamientos donde se requiera controlar flujos de agua en excavaciones subterránea que sean de caudales y volúmenes altos. El inyectar la mezcla con Acelerantes hace que la mezcla no viaje o recorra distancias largas en el macizo para crear un tapón o reducir dichos flujos de agua.

Los acelerantes más utilizados son cloruro de calcio, Hidróxido de sodio, silicato de sodio, yeso blanco, carbonato de sodio y otros. Todos aumentan la velocidad de hidratación del componente C_3S cuando se agregan.

Cloruro de calcio

Este acelerante es el más utilizado en las mezcla de inyección a base de cemento, el cual se agrega en una proporción de 1% al 6% en peso de cemento.

Hidróxido de sodio

El hidróxido de sodio se usa cuando se requiere un fraguado rápido en mezclas a base de cemento Portland y mezclas con cenizas volantes. El fraguado de la mezcla puede llegar en una (1) hora o menos, utilizando una proporción de 50% de hidróxido de sodio en una proporción de 2% en peso de cemento.

Silicato de sodio

Es un acelerante que es altamente cohesivo, debido a la rápida reacción de los iones de calcio liberados durante el fraguado inicial formando silicato de calcio. Al usarse proporciones altas (>20% del peso de cemento) puede ocurrir un fraguado rápido, pero se reducirá proporcionalmente la resistencia a la compresión de la mezcla.

Yeso blanco

Es un acelerante de mezcla de inyección a base de cemento extremadamente rápido, solo se utiliza cuando las condiciones del proyecto lo requieran, debido a que el fraguado de la mezcla puede ocurrir dentro de los equipos y los conductos de inyección, generando daños irreparables. Por las anteriores razones, las mezclas de inyección aceleradas con yeso blanco son difíciles de controlar y solo se utiliza en tratamientos particulares.

Carbonato de sodio

Se utiliza para acelerar la mezcla de inyección a base de cemento, en una proporción del 25% del peso del cemento.

4.8.1.2 Aditivos de control de consistencia

Estos aditivos se utilizan para controlar la consistencia de la mezcla, estas mezclas se utilizan para tratamientos de inyecciones de contacto para relleno de oquedades entre el concreto y la roca.

El fraguado de la mezcla es rápido y la resistencia a la compresión de la mezcla varía con el tiempo desde 1 MPa a una hora de fraguado y 30 MPa a los 28 días. La contracción y la exudación es baja debido a las bajas relaciones de Agua: Cemento.

4.8.1.3 Retardantes

Los retardantes actúan por la absorción de los productos de hidratación C_3S y C_3A para extender el tiempo de fraguado y controlar los tiempos de bombeo de una mezcla de inyección desde la planta de producción hasta el punto donde se requiere el tratamiento.

Los retardantes típicos contienen moléculas orgánicas, como los ácidos hidroxicarboxílicos (ácido cítrico y ácido glucónico), o sales, como los citratos y lignosulfonatos, o azúcares en sí mismos.

4.8.1.4 Plastificantes y superplastificantes

Las plastificantes y superplastificantes permiten lograr una manejabilidad de mezclas con relación Agua: Cemento bajas, logrando una mezcla de inyección de alta resistencia, buena durabilidad, baja exudación y baja contracción. Los plastificantes comunes incrementan la bombeabilidad entre un 5% y 10% y los superplastificantes incrementan la bombeabilidad entre 15% y 30%.

Las proporciones más comunes de plastificantes y superplastificantes en las mezclas para inyección es de hasta 2% del peso del cemento.

4.8.1.5 Inhibidores

Los inhibidores se utilizan para aumentar los tiempos de bombeabilidad, controlando el fraguado de la mezcla hasta 72 horas. El aditivo estabiliza los minerales de cemento e incrementa la fluidez.

4.8.2 Agentes estabilizantes y anti-lavado

Estos agentes estabilizantes se utilizan para reducir la exudación de la mezcla e incrementar la durabilidad del tratamiento. Se incrementa la resistencia al lavado de la mezcla, se mejoran las propiedades reológicas de la mezcla y la estabilidad de las partículas.

En la Tabla 4.5, se detalla un ejemplo presentado por Bruce (2007) del uso de agentes anti-lavado en las mezclas para inyección.

Tabla 4.5. Resultados de pruebas de mezclas de inyección con aditivos de anti-lavado

Mezcla	1	2	3
Relación A:C por volumen	0.80	0.80	0.80
Porcentaje de aditivo por peso de cemento	0%	0.45%	1.0%
Cono de Marsh (s)	10.7	20.2	25.9
Exudación	5%	0%	0%
Presión de filtración (30 psi)			
Tiempo de inicio	Inmediato	27 s	30 s
Después de 35 minutos	66%	21%	13%

Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

4.8.3 Látex

El látex, las emulsiones de polivinilo, acetato de polivinilo y butadieno estireno, se mezclan con el cemento para mejorar la resistencia y mejorar la durabilidad mezcla, para reducir la exudación de la mezcla. Esto reduce los flujos de filtración en el macizo rocoso. Las mezclas de inyección con este aditivo, son utilizadas para reducir las filtraciones de aguas ácidas en tratamientos de fundaciones para presas de relaves de minas.

4.8.4 Agentes productores de gas y espuma

4.8.4.1 Generadores de gas

Los generadores de gas, reaccionan con la solución de alcalina durante la hidratación. Esta reacción mejora la capacidad de la mezcla para rellenar discontinuidades muy finas hasta el relleno de huecos más grandes. Así mismo, estos generadores de gas disminuyen la exudación y la segregación de la mezcla. El generador de gas más usado es el polvo de aluminio, agregado a la mezcla en proporciones de 0,005% a 0,04% de peso de cemento.

4.8.4.2 Incorporadores de aire

En la norma ASTM C260 (2016c), se explican sobre los aditivos incorporadores de aire, estos se utilizan para combatir el daño causado por las condiciones de congelación y descongelación y promover la resistencia al ataque químico. El aire atrapado en la mezcla reducirá la resistencia a la compresión de la mezcla, pero aumentará la durabilidad a largo plazo del tratamiento.

4.8.4.3 Agentes productores de espuma

Las mezclas de inyección a base de espuma se generan creando una espuma estable en un generador de espuma y luego se mezclan con mezcla a base de cemento. Creando

una relación de espuma y cemento que determina la densidad y la resistencia de la mezcla expandida. Estas mezclas de espuma son utilizadas para el relleno de minas subterráneas abandonadas e inyecciones de contacto.

4.9 MEZCLAS NO CEMENTOSAS

A pesar de que las mezclas de inyección a base de cemento son las más utilizadas, existen otras mezclas las cuales se utilizan para tratamientos particulares, con tiempos de fraguado muy rápidos y con capacidad para resistir la disolución o el lavado del tratamiento.

4.9.1 Mezclas químicas

Como se describió en el numeral 4.9.1, las mezclas químicas se utilizan para realizar dos funciones diferentes. La primera es la reducción de la permeabilidad del macizo, donde se requiere que la resistencia a la dilución de mezcla sea alta. La otra es la aglutinación de las partículas sueltas en macizos rocosos muy fracturados para mejorar sus propiedades mecánicas como por ejemplo incrementar su resistencia.

4.9.2 Inyecciones químicas

Existen tres clases genéricas de inyecciones químicas que son particularmente adecuadas para reducir la permeabilidad del macizo:

- Polímeros
- Poliuretano
- Silicato de sodio (combinado con cemento)

4.9.2.1 Polímeros

Un polímero está constituido por monómeros, que son pequeñas moléculas simples, que pueden unirse químicamente entre sí para formar una cadena molecular continua. Los polímeros son cadenas de muchas moléculas y contienen varios de miles de unidades monoméricas. Al unir varias cadenas se forma una cuerda continua formando así un polímero. Este proceso químico se le conoce como polimerización. Desde el punto de vista de mezclas de inyección, sería similar al fraguado en mezclas de inyección a base de cemento, que puede ocurrir rápidamente o en un tiempo prolongado, el tiempo de

reacción estará influenciado por la temperatura, por lo que muchos polímeros requieren de fuentes externas de calor para fraguar.

El proceso de polimerización se puede alterar mediante el uso de varios compuestos diferentes. Estos se clasifican de la siguiente manera: (1) Iniciadores; (2) Aceleradores; (3) Inhibidores y (4) Aditivos varios.

Iniciadores

Los iniciadores son productos químicos que se agregan a los monómeros para iniciar o iniciar el proceso de polimerización. Estos son productos químicos que inician la polimerización sin la necesidad de calor externo.

Aceleradores

Pueden controlar la velocidad de la reacción. Los aceleradores también pueden usarse para acelerar la polimerización y/o permitir que tenga lugar a temperaturas relativamente bajas.

Por esta razón, la mayoría de las mezclas a base de polímero se suministran en dos o más partes que se mezclan inmediatamente antes o durante el proceso de inyección.

Inhibidores

Los inhibidores son compuestos agregados a los monómeros para posponer la polimerización o prevenir una reacción prematura.

Aditivos varios

Se utilizan diversos aditivos para variar las propiedades finales de un compuesto polimérico. Los diluyentes se utilizan para mejorar la capacidad de penetración del polímero, mientras que los rellenos lo espesarán hasta lograr una consistencia similar al mortero. También ampliarán el volumen y, por lo tanto, reducirán el costo.

4.9.2.2 Poliuretano

El poliuretano es una de las mezclas más utilizadas a parte de las inyecciones a base de cemento para tratamientos en macizos rocosos donde requiere controlar el flujo de agua. Principalmente para el relleno de discontinuidades

Igualmente, el poliuretano es utilizado para rellenar las grietas y juntas de estructuras hidráulicas en concreto.

Los poliuretanos reaccionan al entrar en contacto con el agua o humedad.

Las mezclas de inyección de poliuretano se pueden dividir en dos clases principales, hidrófobas e hidrófilas.

Poliuretano hidrofóbicos

Las formulaciones hidrófobas reaccionan con el agua, pero solo se requiere una cantidad muy pequeña para su adecuado fraguado.

Una vez que se ha combinado la cantidad requerida de agua, repelen la humedad adicional a la que están expuestos. Debido a que solo se permite que una cantidad limitada de agua durante la reacción, el gas que queda atrapado en la matriz polimerizada, se desarrolla como una espuma en una forma no restringida.

Poliuretanos hidrofílicos

Los poliuretanos hidrofílicos también reaccionan con el agua, pero continúan atrayendo agua después de completar la reacción inicial. Estos poliuretanos continúan expandiéndose, forzando que la mezcla viaje hacia espacios porosos y vacíos más allá de los rellenos originalmente.

Debido a que las formulaciones hidrófilas atraen y retienen grandes cantidades de agua, son especialmente propensas a una contracción significativa, si se dejan secar. Por lo tanto, estas mezclas se evitan utilizar en proyectos donde se presenten temporadas secas.

4.9.2.3 Polímeros acrílicos

Los polímeros acrílicos, son mezclas mixtas, similares al agua que son altamente penetrables tanto en el suelo como en las discontinuidades del macizo rocoso y concreto. Estos reaccionarán en geles flexibles, que tienden a hincharse con la exposición continua al agua. Pese a sus ventajas, los polímeros acrílicos también se encogen considerablemente si se dejan secar, y aunque se expanden al humedecerse nuevamente, las propiedades originales del gel nunca se recuperarán por completo.

Estas mezclas de polímeros acrílicos se preparan mezclando primero dos soluciones base diferente, que luego se incorporaran en el procedimiento de inyección antes de inyectar la mezcla en el macizo. Habitualmente, las dos soluciones diferentes no requieren mezcla física, pero se combinan de forma automática durante el procedimiento de inyección.

Según Bruce (2007), las mezclas de polímeros acrílicos requieren cantidades importantes de agua, para que reaccione se sugiere preparar proporciones de 1: 1.

Mezclas de inyección de acrilamida

Las mezclas de inyección de acrilamida son soluciones acuosas similares al agua, que son altamente penetrables. La solución base consiste en dos monómeros básicos, acrilamida y metileno-bis-acrilamida, que son proporcionados por el fabricante para proporcionar la mezcla deseada. Según Bruce (2007), las proporciones sugerida son de 95: 5, lo que producirá una mezcla clara y firme, pero la proporción puede variar de cualquier manera. Si se aumenta a 97: 3, se producirá una mezcla pegajosa y elástica con una resistencia relativamente baja, mientras que reducir la proporción a aproximadamente 90: 10 producirá una mezcla blanca y opaca más resistente.

Mezclas de inyección de acrilato

Las mezclas de inyección de acrilato son mezclas similares a las mezclas de acrilamida. Sin embargo, la mezcla de las soluciones se realiza de forma distinta. Los acrilatos generalmente no son tan estables en solución como las acrilamidas. Su disposición en obra se debe manejar con precaución debido a que emiten un olor desagradable y pueden ser difíciles de manejar, si no se toman las medidas adecuadas para su manejo durante el proceso de inyección

Lechadas de N-Metilolacrilamida

Las lechadas de N-metilolacrilamida se encuentran en una posición intermedia entre los otros acrílicos en su composición y rendimiento. Su tiempo de fraguado puede variar desde unos pocos segundos hasta una hora o más, y el resultado es una mezcla flexible. Una vez reaccionado por completo, la mezcla será estable e irreversible. Sin embargo, absorberá agua hasta aproximadamente el 200 por ciento de su volumen original.

Normalmente, el uso de estas mezclas debe restringirse a aplicaciones que eviten que se inflame.

4.9.3 Resinas

El uso de resinas para tratamientos de macizos rocosos, es un tratamiento de alta resistencia y durabilidad. Teniendo en cuenta que, las resinas tienden a fluir cuando están bajo carga continua y/o temperaturas elevadas, lo cual reduce de manera significativa su módulo elástico.

Los compuestos resinosos utilizados en las mezclas de inyección son: (1) Epóxicos; (2) Poliuretanos; (3) Espumas fenólicas y (4) Poliéster.

4.9.3.1 Epóxicos

Los epóxicos se suministran como materiales de dos componentes, un epóxico básico y un endurecedor. Estos materiales están disponibles en una amplia variedad de tipos y consistencias y pueden formularse para proporcionar una gama variada de propiedades físicas cuando se endurecen. Las masas endurecidas varían desde composiciones suaves, a composiciones gomosas a duras, a composiciones rígidas e incluso quebradizas. Igualmente, algunas formulaciones de epóxicos trabajan en ambientes secos, otras son compatibles con la humedad y muchas incluso se endurecen bajo el agua. Los epóxicos son muy sensibles a la temperatura. Sin embargo, existen formulaciones para su uso en ambientes muy calurosos y muy fríos, incluso a temperaturas bajo cero.

Las mezclas epóxicas pueden estar compuestas por 100% de sólidos y/o pueden contener diluyentes o rellenos divididos. Para mejorar su penetrabilidad en el macizo rocoso, los diluyentes en la mezcla se adicionan para reducir la viscosidad de la mezcla. Según los fabricantes de epóxicos las proporciones de los componentes de la mezcla, pueden varias de 1: 1 a 100: 1 o más. Para tratamientos de inyección se utilizan proporciones de 1: 1; 1.5: 1 o 2: 1. Debido a que es más fácil trabajar con partes iguales en el sitio de obra.

El uso de mezclas epóxicas proporciona un tratamiento de relleno de discontinuidades con resistencias a la compresión y tensión muy altas, por lo que también se utiliza en la reparación de estructuras de concreto y de mampostería. Así mismo, los tratamientos con

mezclas epóxicas proporcionan mayor resistencia a las exposiciones químicas (álcalis). En la Tabla 4.6, se muestran valores típicos de resistencia de las mezclas epóxicas.

Tabla 4.6. Valores típicos de resistencia de las mezclas epóxicas

	Resistencia (MPa)
Compresión	27.6 – 103.4
Tensión	20.7 – 55.2

Adoptado de “*Practical handbook of grouting. Soil, Rock, and Structures*” de James Warner (2004).

4.9.3.2 Poliuretanos

Tal como se describió en el numeral 4.9.2.2, los poliuretanos se pueden formular de diferentes formas y propiedades para utilizarse en variedad de aplicaciones. Los poliuretanos se utilizan en los tratamientos con inyecciones para controlar las filtraciones de agua, en macizos rocosos para fundaciones para presas y para filtraciones en excavaciones subterráneas.

Se pueden combinar para tener una buena resistencia tanto a los ácidos como a los álcalis y, de hecho, se usan con frecuencia para tratamientos de alta durabilidad.

4.9.3.3 Espumas fenólicas

Las espumas de resina fenólica son sistemas de dos componentes que se convierten en masas de espuma rígida con costra al endurecerse. Se comportan de manera muy parecida a las mezclas de uretano hidrófobas (4.9.2.2), pero se distinguen por su relación alta de resistencia – peso y su capacidad de autoextinguirse para soportar las llamas. Al igual que mezclas similares, su potencial de resistencia es proporcional a la densidad, aunque las espumas de estos materiales ofrecen algunas de las relaciones de resistencia a peso más altas disponibles, como se muestra en la Figura 4.21.

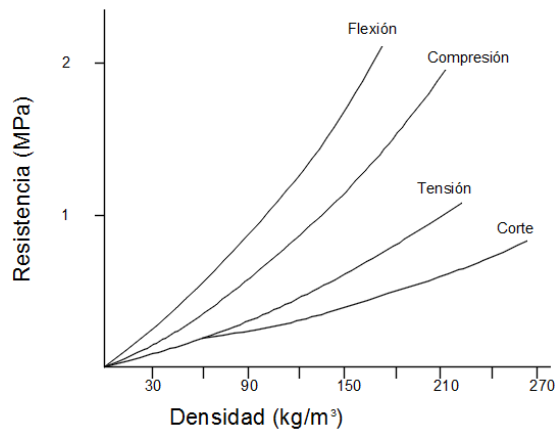


Figura 4.21. Propiedades de mezclas de espumas fenólicas.
Adoptado de “*Practical handbook of grouting. Soil, Rock, and Structures*” de James Warner (2004).

4.9.3.4 Poliéster

Las resinas de poliéster pueden ser similares a las resinas epóxicas, pero tienen varias diferencias. Están sujetos a una contracción durante el endurecimiento, y esto resulta en una resistencia menor.

Para minimizar el la reducción de volumen potencial, el tratamiento debe llenar completamente las oquedades para obtener un mejor resultado del tratamiento. Pese a la desventaja de su reducción de volumen potencial, las resinas de poliéster son muy fáciles de usar. Debido a, que la velocidad de fraguado se puede ajustar desde minutos hasta horas y proporcionan una buena resistencia a agentes químicos.

4.10 MEZCLAS DE INYECCIÓN CON OTROS MATERIALES

Existen otros materiales utilizados en las mezclas para inyección que no están descritos en las clasificaciones mencionadas anteriormente.

4.10.1 **Asfalto**

Los materiales asfálticos se emplean usualmente para pavimentos flexibles de carpetas asfálticas. Estos se derivan de los residuos de la destilación del petróleo, los cuales vienen en dos estados: sólidos de asfalto duro, deben calentarse para que sea fluido; y emulsiones de asfalto catiónicas. Aunque estos materiales asfálticos no se utilizan con

frecuencia para el tratamiento de con inyecciones, los asfaltos en ambos estados se han utilizado en varios proyectos que requieren la inyección de estos materiales particulares

4.10.1.1 Asfaltos calientes

El uso de los asfaltos en forma sólida, que debe calentarse para que puedan fluir, se ha utilizado en proyectos donde se requiere controlar o disminuir filtraciones de agua con caudales altos. El asfalto caliente fluye dentro del macizo rocoso hasta que espesa rápidamente y se vuelve relativamente inmóvil al enfriarse. Cuando se inyecta este material en el agua, se enfría según la temperatura y el caudal del agua. La resistencia de los asfaltos incluso fríos es baja por lo que se sugiere combinar el asfalto con mezclas a base de cemento para ser inyectado simultáneamente con el asfalto, esta inyección puede ser coaxial o a través de cortinas de inyección adyacentes que alcancen el área donde se requiere el tratamiento.

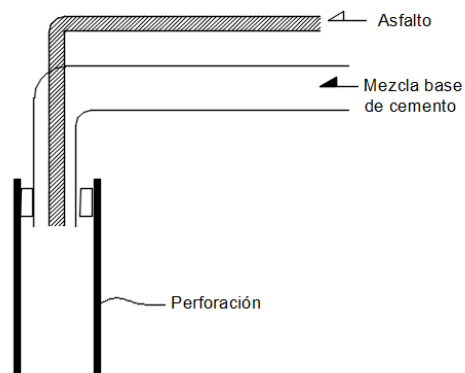


Figura 4.22. Inyección coaxial asfalto y mezclas de cemento en la boca de la perforación. Adoptado de "*Practical handbook of grouting. Soil, Rock, and Structures*" de James Warner (2004).

4.10.1.2 Emulsión de asfaltos

El asfalto está comúnmente disponible en las plantas de pavimento como una emulsión catiónica, en la que todas las partículas están cargadas positivamente. Debido a que la mayoría de las superficies minerales están cargadas negativamente, las partículas de asfalto son atraídas y adheridas a la mayoría de las superficies de suelo y roca. Una emulsión asfáltica típica tiene alrededor del 35% de agua que cuando se evapora deja solo el asfalto. El tiempo requerido para que el agua se evapore y quede el asfalto dependen de la relación del álcali al asfalto.

5. ENSAYOS

Los ensayos requeridos para las mezclas utilizadas en el tratamiento con inyecciones, se requieren como un procedimiento de control de calidad y verificación de la efectividad del tratamiento. Por lo tanto, las mezclas para tratamientos con inyecciones se prueban en el laboratorio y en campo para verificar las calidades adecuadas antes de inicio el tratamiento y durante el tratamiento para aprobación. Dichas pruebas verifican que la mezcla utilizada para el tratamiento se formule, proporcione y se mezcle adecuadamente, para que las propiedades de los materiales para inyecciones, que se explicaron en el numeral 4.2 , no sean diferentes en un rango a las establecidas en el diseño de la mezcla. Para la toma de estas muestras para los ensayos necesarios deben realizarse cerca del punto del tratamiento, para que la muestra sea representativa a la mezcla que se inyectara en el macizo rocoso. En caso que los resultados de estos ensayos obtenidos de pruebas en el laboratorio o de ensayos realizados en el sitio, son diferentes a los establecidos en el diseño, se deben tomar las medidas correctivas apropiadas para asegurar un tratamiento adecuado en el macizo rocoso.

Estos ensayos en general, no serán necesarios utilizarlos en su totalidad ya que algunos se usaran frecuentemente y otros solo se requerirán si es necesario, esto dependerá del tipo de mezclas utilizadas y los objetivos requeridos para el tratamiento. En la Tabla 5.1, se muestran los tipos de ensayos requeridos para las mezclas de inyección, según su propiedad, el nombre del ensayo, la norma o autor que se utiliza o se explica en detalle, la ubicación donde se realiza y la frecuencia que se realiza el ensayo.

5.1 ENSAYOS EN LABORATORIO

Los ensayos de laboratorio se utilizan para evaluar las mezclas que se utilizaran en los tratamientos con inyecciones propuestas, así como sus propiedades físicas y químicas.

Estos ensayos se utilizan para calibrar una proporción de mezcla que se utilizara en el proyecto, para que la mezcla utilizada sea acorde a los parámetros de diseño establecidos y así lograr el objetivo del tratamiento. Para lograr una combinación adecuada de penetrabilidad, durabilidad, economía y resistencia para reducir la permeabilidad y/o aumentar la resistencia del macizo rocoso

Tabla 5.1. Ensayos utilizados para mezclas de inyección, ubicación y frecuencia

Propiedad	Ensayo	Norma u autor	Equipo	Ubicación ensayo	Frecuencia
Cohesión	Cohesión de la mezcla	Deere y Lombardi (1985)	Plato de Lombardi	Laboratorio	Poco frecuente
Viscosidad	Viscosidad de la mezcla	ASTM C939	Cono de Marsh	Campo	Muy frecuente
Exudación	Exudación	ASTM C940	Probeta graduada	Campo	Frecuente
Presión de filtración	Presión de filtración	API 13B-1	Filtro de presión	Laboratorio	Poco frecuente
Resistencia al lavado	Resistencia al lavado	Khayat, K. and Yahia, A. (1998)	Equipos especiales	Laboratorio especializado	No se realiza (En pocos casos se requiere)
Peso específico	Peso específico	API (2009)	Balanza de lodos	Campo	Muy frecuente
Fraguado	Prueba de aguja de Vicat	ASTM C191	Aguja de Vicat	Laboratorio	Poco frecuente
Resistencia a la compresión	Resistencia a la compresión	ASTM C109	Formaleta de acero	Laboratorio (se toman las muestras en campo)	Poco frecuente (según proyecto es frecuente)

Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

Al realizar los ensayos en diferentes etapas del proyecto, se deben repetir los ensayos para investigar los cambios de las propiedades de la mezcla que surja de las diferencias en los materiales, en los equipos de mezcla o en los procedimientos de las pruebas. También se establecen datos de referencia para el control de calidad de las mezclas.

5.1.1 Cohesión de la mezcla

Como se explicó en el numeral 4.2.5, la prueba de cohesión de la mezcla no existe, por lo tanto se utiliza un método disponible para determinar la cohesión, por medio del ensayo sugerido por Deere y Lombardi (1985), el plato de Lombardi. El cual consiste que en una placa de acero de 10 cm x 10 cm y aproximadamente de 3,2 mm de espesor, con una marca en patrón de cuadrículas de 1,6 mm diagonales, se vierta la mezcla sobre esta placa para determinar la cohesión. Para facilitar la distribución de la mezcla sobre la placa de acero, se tiene una varilla de acero que esta soldada al borde de la placa de acero.



Figura 5.1. Plato de Lombardi para medir la cohesión de la mezcla
Tomado de “*Cohesion Testing System*” de ChemGrout (2019a).

Para determinar el peso de la mezcla que se adhiere a la placa, se mide el peso de la placa antes y después de la distribución de la mezcla. Luego este peso de mezcla se divide en el área de los dos lados de la placa, este resultado se mide en gramos por centímetro cuadrado, luego este resultado se divide por el peso unitario de la mezcla. Este resultado, convertido a milímetros, es la cohesión (*yield point*) definido por Deere y Lombardi (1985).

5.1.2 Presión de filtración

Durante el procedimiento de inyección la mezcla de inyección a base de cemento tiende a expulsar parte del agua, debido a altas presiones para movilizar la mezcla a través del macizo rocoso.

Por lo tanto, para verificar que la mezcla diseñada para el tratamiento, resista las altas presiones se deben realizar pruebas de presión de filtración. La prueba se describe en la norma API 13B-1 (1990), la cual consiste en forzar la mezcla a través de una cámara especial, donde se coloca una muestra de 400 ml en la parte superior de una prensa de filtro API y sometiéndola a una presión de 0.7 MPa con gas nitrógeno comprimido. El ensayo representa la mezcla cuando se inyecta a altas presiones en un macizo rocoso, llevando al agua de la mezcla a hacer expulsada, los resultados del ensayo se da en un coeficiente de filtración, el cual se describió en el numeral 4.2.9.

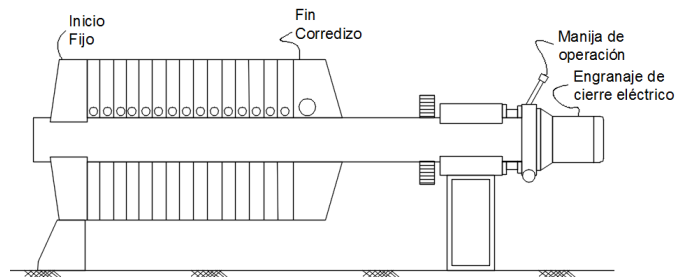


Figura 5.2. Vista lateral de una prensa de filtro de presión de placa empotrada.
Adoptado de “*Pressure Filtration*” de Wang (2007).

5.1.3 Resistencia al lavado de la mezcla

La resistencia al lavado de una mezcla se mide a través de equipos especiales en laboratorio, para estudiar la integridad de la mezcla en una cámara. La mezcla se vierte en una columna de agua para observar el grado de la dispersión de las partículas que componen la mezcla.

Un ejemplo de la resistencia al lavado de la mezcla se detalla en la Figura 5.3, donde A es donde se conecta la bomba para la inyección de la mezcla, B es la salida de agua desplazada por la mezcla de inyección, C es la entrada de agua y D es la salida del flujo combinado de agua y mezcla.

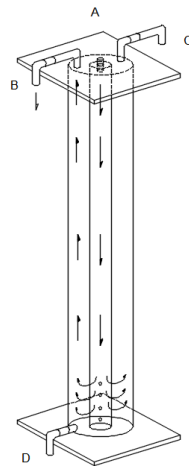


Figura 5.3. Prueba de resistencia al lavado de una mezcla.
Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

5.1.4 Prueba de aguja de Vicat

Como se describió en el numeral 4.2.7, se requiere conocer el tiempo de fraguado de la mezcla para el tratamiento con inyecciones. Se realiza por medio del ensayo de la aguja de Vicat que se explica en la norma ASTM C191 (2018b), a partir del ensayo se encuentra el tiempo de fraguado inicial de la mezcla, así como el fraguado final. Los tiempos de fraguado indican si mezcla está desarrollando sus reacciones de hidratación de manera normal. Los aditivos incluidos dentro de la mezcla y la relación agua: cemento, regulan el tiempo de fraguado.



Figura 5.4. Aguja de Vicat
Tomado de Pinzuar (2019a).

5.1.5 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de la mezcla define la durabilidad del tratamiento a largo plazo, ante efecto de flujo de agua por gradientes hidráulicos en el macizo rocoso o el ataque químico por aguas con alto contenido de álcalis. A mayor resistencia mayor durabilidad del tratamiento. Esto se explica en el numeral 4.2.10. Por lo que se deberán realizar ensayos de resistencia a la compresión como lo detalla la norma ASTM C109 (2016b), por medio de muestras de mezcla tomadas en el sitio de obra en una formaleta que pueda contener por lo menos 9 cubos de 5.0 cm de lado por cada tipo de mezcla preseleccionada, para realizar el ensayo a los 3, 7, 14 y 28 días. En caso de requerirse se

pueden ensayar cubos curados a mayores edades de hasta 180 días. Se deben realizar por lo menos tres (3) ensayos en cada edad y obtener el promedio de los tres datos para establecer la resistencia correspondiente a cada edad.

La formaleta debe tener los parámetros establecidos de la norma ASTM C109 (2016b), donde tenga sus caras totalmente lisas y libres de impurezas, para que los cubos se puedan desencobrar fácilmente, se puede aplicar una leve capa de aceite o ACPM. Se sugiere utilizar formaletas de acero debido a que las formaletas de madera, que se fabrican en el sitio de obra, no pueden obtener cubos definidos y pueden llevar a alcanzar datos erróneos durante los ensayos correspondientes.



Fotografía 5.1. Formaleta utilizada para los cubos de mezcla.
Fuente del autor.



Fotografía 5.2. Preparación de los cubos en el sitio de inyección.
Fuente del autor.



Fotografía 5.3. Cubos de 5 x 5 cm de mezcla utilizada, verificándolos para realizar el ensayo de resistencia a la compresión en laboratorio.
Fuente del autor.

5.2 ENSAYOS EN CAMPO

Los ensayos en campo consisten en verificar la calidad de la mezcla en su estado fluido justo antes de realizar el procedimiento de inyección.

Estos ensayos determinan la densidad, viscosidad y exudación de la mezcla para su aprobación antes de ejecutar la inyección. Así mismo, se pueden obtener las muestras de mezcla de la resistencia a la compresión antes descrita, para la realizar las pruebas en laboratorio.

La prueba de gravedad específica se utiliza para verificar la proporción correcta de la mezcla. Por ejemplo, una gravedad específica excesiva puede ser el resultado de un error en la adición de cemento donde se puede haber agregado una bolsa de cemento adicional. A la inversa, una gravedad específica baja puede indicar que se dejó una bolsa de cemento fuera de la mezcla o que se agregó demasiada agua. La adición de demasiada agua puede ser el resultado de un error humano o un problema con el equipo de medición de agua.

Las pruebas de sedimentación se realizan periódicamente durante la operación de inyección para cada mezcla o cambio en la relación agua: cemento. La velocidad de sedimentación de la mezcla de lechada se determina vertiendo 1.000 ml de lechada en un cilindro de laboratorio estándar de 1.000 ml graduado en mililitros. Luego, después de 2 horas, se toman y registran las mediciones del nivel de agua y el nivel de sólidos en el cilindro. La velocidad de sedimentación, expresada en porcentaje, se obtiene dividiendo la profundidad del agua sobrenadante por la profundidad total del

Las pruebas de campo también se pueden realizar en los materiales in situ para ser inyectados para verificar la capacidad de sellado de los materiales utilizando varios diseños de mezcla propuestos. Esta prueba se realiza bajo condiciones controladas, generalmente en el lugar de trabajo real, utilizando el equipo y los métodos reales que se emplearán para la lechada de producción.

5.2.1 Cono de Marsh

La prueba de viscosidad de Marsh se utiliza para determinar la viscosidad de las mezclas de inyección con un único componente y/o varios componentes. Los resultados de la prueba se miden en el tiempo con los resultados dados en segundos.

Los datos obtenidos se comparan con la viscosidad relativa del agua para calibrar el cono de Marsh. Dependiendo del diseño de la mezcla, de acuerdo a sus proporciones de agua: cemento y sus variaciones de porcentajes de aditivos y otros materiales que se explican en el Capítulo 4. Se obtienen diferentes combinaciones de mezclas que deben estar dentro de los rangos de diseño de viscosidad, para que las mezclas puedan ser bombeables y puedan viajar dentro del macizo rocoso al ser inyectadas con las presiones establecidas en el diseño.



Fotografía 5.4. Cono de Marsh preparado para iniciar el ensayo de viscosidad.
Fuente del autor.



Fotografía 5.5. Ejecución del ensayo vertiendo la mezcla utilizada para la inyección en el cono.
Fuente del autor.

Según a la experiencia obtenida durante la ejecución de tratamientos con inyecciones de macizos rocosos, que se explican en el Capítulo 13, estos rangos no deben superar los 65 segundos, debido a que no se puede bombear una mezcla con viscosidad alta.

En la Figura 5.5 se muestra el Cono de Marsh utilizado para el ensayo de viscosidad en campo.



Figura 5.5. Cono de Marsh y balanza de lodos
Tomado de Pinzuar (2019b).

5.2.2 Exudación

El ensayo se debe realizar periódicamente, utilizando uno de los dos métodos alternativos.

El primero es el descrito por la ASTM C940 (2016d), el cual consiste en colocar una muestra de 200 ml de lechada en una probeta graduada de 250 ml y medir el volumen de agua en la parte superior de la probeta luego de 2 h. El otro método es midiendo el porcentaje de exudación de forma directa en una probeta graduada de 1.000 ml de plástico.

Los pasos utilizados para medir la exudación en la probeta de 1000 ml son los siguientes:

- Colocar la probeta en un lugar nivelado, sombreado y sin vibraciones.
- Llenar la probeta hasta la línea de 1,000 ml con la mezcla de inyección a base de cemento.
- Leer y registrar el nivel de la separación entre la mezcla y el agua expulsada después de 2 h de llenar la probeta.
- Lavar adecuadamente con cepillo, si es necesario, la probeta para realizar la prueba nuevamente cuando se necesite.

La evolución de la exudación con el tiempo se puede demostrar registrando la exudación a intervalos de tiempo regulares, por ejemplo cada 10 o 15 minutos, hasta que la tendencia de exudación se haya estabilizado (generalmente dentro de las 2 horas).

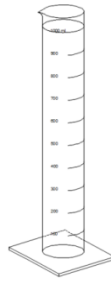


Figura 5.6. Probeta graduada de 1000 ml para medir la exudación de la mezcla en porcentaje.

Fuente del autor.

5.2.3 Balanza de lodos

La descripción de la balanza de lodos se detalla en el numeral 4.2.8, al igual que el cono de Marsh, este instrumento se desarrolló originalmente para la evaluación de rutina de los fluidos de perforación cuando se utiliza bentonita para estabilizar las paredes de la excavación. El ensayo consiste en los siguientes pasos:

- Colocar de la balanza en una ubicación nivelada, con la ayuda del nivel que tiene el instrumento.
- Verificar si la balanza de lodos se encuentra calibrada, esto se revisa llenado la copa con agua y revisando que tiene un peso unitario de 1 g/m^3 a $21 \text{ }^\circ\text{C}$, en caso de no estar calibrada se debe calibrar con los contrapesos que tiene la balanza al lado contrario de la copa.
- Una vez verificada la calibración de la balanza se dispone a llenar la copa con la mezcla de inyección.
- Luego se le coloca la tapa a la copa, expulsando el exceso de mezcla a través del orificio en la parte superior de la tapa.
- Se limpia el exceso de mezcla en la copa.
- Ubicar el peso de la balanza, moviéndolo a través de la regleta hacia derecha o izquierda, hasta balancear la burbuja de nivel en la línea central.
- Leer el valor del peso unitario en la regleta.
- Registrar el valor de la densidad en el formato correspondiente de la prueba de campo.
- Limpiar la balanza y verificar nuevamente la calibración con agua. Obteniendo una lectura en la regleta de 1 g/cm^3 a $21 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. MEZCLAS PARA INYECCIONES

6.1 RELACIÓN AGUA: CEMENTO

La mezcla de inyección a base de cemento es la más utilizada en los tratamientos con inyecciones en macizos rocosos, debido a su fácil manejo y disposición en obra.

Los diseños de estas mezclas se expresan en términos de proporciones de agua y cemento. La proporción más común se expresa en términos de volumen, si el cemento se proporciona en sacos de cemento y/o a granel. La relación volumétrica que es conveniente usar, para un saco de cemento de 50 kg, aproximadamente es de 50 litros de mezcla. Sin embargo, cuando se utilizan otros componentes en la mezcla es adecuado que las relaciones se realicen en peso.

Como se ha explicado anteriormente, la relación agua: cemento es el principal determinante de las propiedades y características de la mezcla (reología, resistencia, permeabilidad, durabilidad, entre otras).

6.2 MEZCLAS A BASE DE CEMENTO

Según lo expresado por Bruce (2007), la proporción de agua requerida para la activar la reacción de hidratación del cemento es aproximadamente de 0.22 a 0.24 en peso.

Cuando se utiliza una proporción alta de agua: cemento la mezcla es más fluida para ser inyectada en el macizo rocoso. Sin embargo, su resistencia disminuye proporcionalmente, como se muestra en la Figura 6.1. En esta figura se muestra como las mezclas con proporciones de agua: cemento menores a 0.45 (en peso), tienen mayor resistencia al corte y por lo tanto no son bombeables. Por esto se sugiere para el uso de mezclas a base de cemento con relaciones de agua: cemento entre 1.0 y 1.5 (en peso).

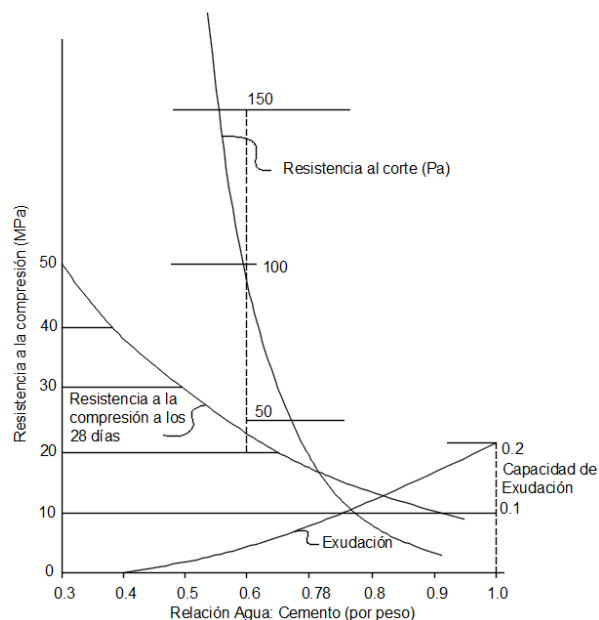


Figura 6.1. Efecto de las relaciones Agua: Cemento en las propiedades de la mezcla. Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

Sin embargo, como se explicó en el numeral 2.8, historia del uso de los tratamientos con inyecciones, en varios proyectos ejecutados en Estados Unidos, se han utilizado relaciones de Agua: Cemento de 10 (en volumen) para que las mezclas fueran fluidas y pudiesen penetrar en las discontinuidades más finas. En consecuencia, la inyección de mezclas más fluidas en los macizos rocosos han sido deficientes en términos de resistencia, durabilidad y contracción de la mezcla, debido a que estos tratamientos tienden a lavarse o disolverse. Houlsby (1990) explicó, que los tratamientos con relaciones de Agua: Cemento de 5: 1 o mayores, tienden a disolverse parcial o totalmente, en tratamientos para cimentaciones de presas.

Por todas estas razones, las mezclas a base de cemento deben tener estabilidad durante la inyección y durabilidad a largo plazo.

Siempre que se disponga de equipos de mezcla adecuados, materiales y aditivos adecuados, no existe ninguna justificación para intentar utilizar una mezcla con una relación de Agua: Cemento superior a 3 (por volumen). Como se observa en la Figura 6.2, no se produce una disminución de la viscosidad de la mezcla con una alta relación Agua: Cemento.

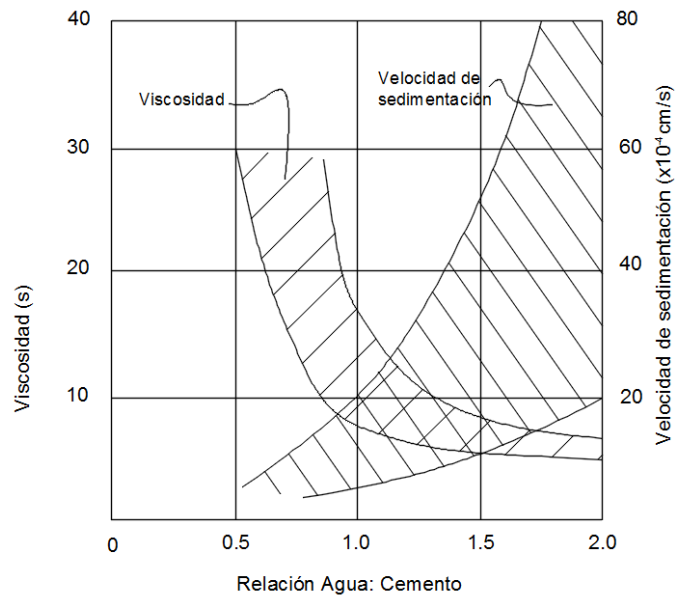


Figura 6.2. Viscosidad y velocidad de sedimentación en mezclas a base de cemento. Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

6.3 MEZCLAS DE INYECCIÓN DE BENTONITA – CEMENTO

Son mezclas que se estabilizan con mineral de arcilla, las mezclas de arcilla se explican en el numeral 4.6, estas mezclas proporcionan las siguientes ventajas:

- Proporcionan mezclas homogéneas “coloidales” con una amplia gama de viscosidades.
- Reducen el porcentaje de exudación y aumentan la resistencia de presión de filtración.
- Aumenta el tiempo de fraguado.
- Aumenta el tiempo de hidratación del cemento.
- Mejora la penetrabilidad y resistencia al lavado del tratamiento.
- Reducen la permeabilidad de la mezcla.

Como se describe en el numeral 4.6, los productos comunes utilizados incluyen arcilla natural, bentonita y montmorillonita.

Cada tipo de arcilla se hidrata y se hincha de manera diferente, por lo que cada tipo proporciona propiedades diferentes a la mezcla. Dichos materiales de arcilla se utilizan para reducir el potencial de exudación y presión de filtración. Cuando se utilizan mezclas de inyección con arcillas es necesario realizar ensayos (Capítulo 5) para determinar las propiedades mecánicas, químicas, reológicas y de fraguado con las arcillas disponibles

para el proyecto. Sin embargo, pese a sus ventajas del uso de arcillas en las mezclas, la resistencia a la compresión de la mezcla fraguada es baja, lo cual es ideal para tratamientos específicos donde no se requieran resistencias altas.

Las mezclas de bentonita y cemento tienen una cohesión alta en este fluido, lo que requiere presiones altas para su movilización en el macizo rocoso, a menos que se le incluyan aditivos compatibles a la mezcla para que fluya más fácil durante la inyección.

Según Bruce (2007), las mezclas pueden incorporar las siguientes cantidades de minerales: Arcilla (80 – 400 kg/m³); Bentonita (20 – 80 kg/m³) y Cemento (100 – 800 kg/m³)

En estas mezclas debe haber por lo menos una proporción de cemento de 250 kg/m³, para que los minerales de arcilla formen un entorno protector alrededor de las partículas de cemento, evitando la disolución del tratamiento a largo plazo, cuando existe la presencia de aguas agresivas.

Los diseños de mezclas propuestas por varios autores, para que el tratamiento reduzca la permeabilidad del macizo y rellenar las discontinuidades, las relaciones de Agua: cemento deben variar entre 1 a 8, con una viscosidad de cono de Marsh de 35 a 60 s, la exudación debe estar entre 0% y 10% y la permeabilidad hasta 10⁻⁸ m/s.

En la Tabla 6.1, se muestran las propiedades típicas de las mezclas de bentonita-cemento.

Tabla 6.1. Propiedades típicas de mezclas de bentonita-cemento.

Relación Agua: Cemento (por peso)	Bentonita por peso de agua (%)	Exudación (%)		Densidad (kg/m ³)	Viscosidad en Cono (s)	Viscometro HAAKE RV20-MV2 ^a		Resistencia a la compresión en cubos de 100 mm (MPa)			
		3 h	3-24 h			Límite de fluencia (Pa)	Viscosidad Plástica (Pa/s)	3 días	7 días	14 días	28 días
1	2	5	2	1.514	15	31	0.020	3.6	5.2	6.9	9.4
1.2	3	3	0	1.434	20	80	0.025	1.8	4.9	6.7	7.6
1.25	2.5	5	3	1.427	14	50	0.023	1.6	4.0	4.9	6.3
1.5	3	7	2	1.340	13	30	0.025	0.9	1.7	2.3	2.8
2	4	2	2	1.250	15	48	0.028	0.5	1.2	1.5	2.0
2	5	1	0	1.290	16	54	0.020	0.6	1.4	1.9	2.2
2	6	1	0	1.290	20	75	0.025	0.8	1.4	1.9	2.3
3	4	4	0	1.189	22	60	0.023	0.3	1.4	0.61	0.71
4	5	2	1	1.170	12	25	0.017	0.09	0.51	0.22	0.27
5	6	1	0	1.120	18	32	0.023	0.03	0.14	0.06	0.08

Todas las mezclas se mezclaron en un mezclador coloidal. Primero, se colocaron 60 kg de agua en el mezclador y la bentonita se roció en el agua durante aproximadamente 30 s. Esta suspensión se mezcló durante 2 minutos y luego se pasó al tanque de agitación. Temperaturas: ambiente de 16 a 19 ° C y la mezcla de 17 a 22 ° C.

Adaptado de "Dam foundation grouting". Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

La evolución en el tiempo de la resistencia a la compresión de las diferentes combinaciones de mezclas a base de cemento y bentonita se detallan en la Figura 6.3, donde se observa que para mezclas con relaciones más bajas y bajo contenido de bentonita tienen resistencias de hasta 9.4 MPa.

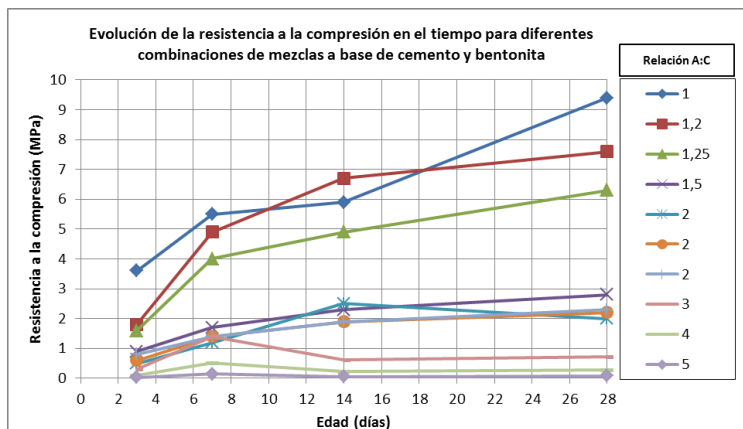


Figura 6.3. Evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo para diferentes combinaciones de mezclas a base de cemento y bentonita. Fuente del autor

El manejo de la bentonita debe ser adecuado, agregándola a la mezcla hasta que la bentonita se encuentre completamente hidratada para obtener resultados adecuados (8 a 12 horas). Así mismo, la bentonita hidratada debe mezclarse por lo menos una vez al día para evitar que se formen aglutinaciones de material.

En la Tabla 6.2, se detallan los efectos de la bentonita en la exudación, con la aplicación de bentonita hidratada durante 2 h antes de la mezcla.

Tabla 6.2. Efectos de la cantidad de bentonita en la mezcla ante la exudación.

Relación de Agua: Cemento (por peso)	Porcentaje de exudación		
	0% Bentonita	2% Bentonita	4% Bentonita
3: 1	62	40	22
2: 1	52	20	6
1: 1	16	3	1
0.6: 1	5	0	0

Adaptado de "Dam foundation grouting". Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

De la anterior tabla se observa que las adiciones típicas de bentonita son de 1% al 4% para relaciones de Agua: Cemento de 1: 1 y 0.6: 1, son adecuadas para obtener bajas exudaciones (<5%).

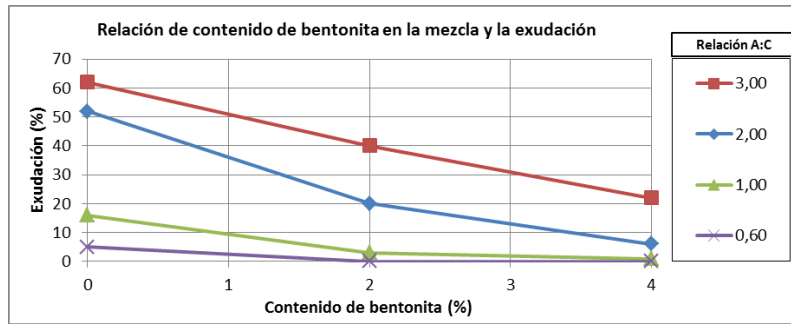


Figura 6.4. Relación de contenido de bentonita en la mezcla y la exudación.
Fuente del autor

6.4 MEZCLAS DE INYECCIÓN A BASE DE CEMENTO CON PUZULANAS

Las mezclas a base de cemento con puzolanas mejoran sustancialmente las propiedades y reduce los costos de la mezcla. La idoneidad del uso de un relleno con un tipo de puzolana (numeral 4.5) en particular debe evaluarse mediante ensayos de laboratorio (numeral 5.1) antes de iniciar con los tratamientos.

En la Tabla 6.3, se muestran las propiedades típicas de mezclas con puzolanas.

Tabla 6.3. Propiedades típicas de mezclas a base de cemento con puzolanas.

Relación ceniza volante: Cemento (por peso)	Relación Agua: Sólidos (por peso)	Exudación (%)		Densidad (kg/m ³)	Flujo de la mezcla (mm)	Resistencia a la compresión en cubos de 100 mm (MPa)			
		3 h	24 h			7 Días	14 Días	28 Días	90 Días
1	0.40	3	0	1.765	510	17.9	22.5	31.7	49.3
	0.45	6	2	1.715	>700	14.0	18.0	26.0	42.9
	0.50	5	5	1.677	>500	10.3	14.9	20.0	34.3
2	0.40	3	1	1.718	480	8.7	12.2	17.5	37.9
	0.45	5	3	1.679	>700	6.2	8.7	13.2	27.7
	0.50	7	6	1.648	>700	5.4	7.7	12.1	25.1
3	0.40	6	4	1.695	460	4.5	7.0	10.4	23.9
	0.45	9	9	1.650	>700	3.3	5.3	8.3	18.8
	0.50	10	9	1.628	>700	2.7	4.4	7.2	19.1
5	0.40	5	5	1.675	530	2.2	3.7	5.1	15.3
	0.45	8	8	1.641	>700	1.6	2.7	4.4	13.4
	0.50	10	10	1.599	>700	1.4	2.2	4.0	14.5
7	0.40	4	4	1.680	>700	2.2	2.4	5.5	8.8
	0.45	8	6	1.611	>700	1.6	2.0	4.6	6.5
	0.50	11	9	1.587	>700	1.4	1.8	2.9	6.0
10	0.40	5	4	1.643	>700	1.5	1.9	2.3	4.9
	0.45	8	6	1.620	>700	0.8	1.4	1.9	4.0
	0.50	11	9	1.575	>700	0.7	1.2	1.8	2.8
15	0.40	6	6	1.658	>700	1.0	1.4	2.3	3.1
	0.45	9	7	1.608	>700	0.6	1.0	1.7	2.2
	0.50	10	9	1.582	>700	0.6	0.8	1.2	1.7
20	0.40	8	6	1.645	>700	0.7	0.9	1.5	2.0
	0.45	9	9	1.607	>700	0.5	0.7	1.4	2.0
	0.50	10	9	1.580	>700	0.5	0.6	0.8	1.3

Todas las mezclas se mezclaron en un mezclador coloidal durante al menos 2 minutos
Adaptado de "Dam foundation grouting". Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

De la Tabla 6.3, se observa que la Resistencia a la compresión varía según la relación de ceniza volante: cemento y la relación de agua: solidos, esto se muestra en la Figura 6.5.

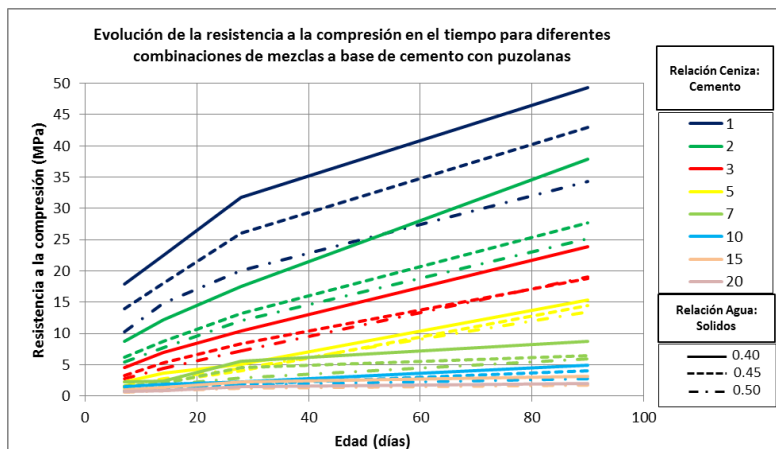


Figura 6.5. Evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo para diferentes combinaciones de mezclas a base de cemento con puzolana.
Fuente del autor

Las mezclas a base de cemento con puzolanas se pueden bombear con proporciones bajas de agua: solidos. Sin embargo, tienen mayor exudación como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6.4. Relación entre las propiedades típicas de mezclas a base de cemento con puzolanas y la exudación de la mezcla.

Relación ceniza volante: Cemento (por peso)	Relación Agua: Solidos (por peso)	Viscosidad Cono de Marsh (s)	Viscosidad Brookfield (cP)	Exudación (%)
3: 1	0.5: 1	188	672	2.2
3: 1	0.6: 1	43	202	7.2
4: 1	0.5: 1	92	650	3.3

Adaptado de “Dam foundation grouting”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

6.5 MEZCLAS DE INYECCIÓN PARA TRATAMIENTOS ESPECIALES

6.5.1 Mezclas de inyección con aditivos para control de reología y fraguado

Usualmente se incorpora a la mezcla a base de cemento silicato de sodio y cloruro de calcio para controlar el tiempo de fraguado. Para el caso del silicato de calcio la proporción en peso de cemento es del orden de 10% al 20%. La adición de estos aditivos permite controlar el fraguado durante días, hasta que se requiriera inyectar la mezcla en el

macizo. Para que la mezcla vuelva a su estado normal y fragüe adecuadamente se le agregan acelerantes compatibles.

6.5.2 Mezclas de inyección de cemento – espuma

Estas mezclas se dividen en dos categorías. Las primeras es la combinación de un generador de espuma y una mezcla de inyección a base de cemento en un mezclador de paletas horizontales. La relación Espuma: Cemento determina la densidad de la mezcla y la resistencia. La segunda categoría son las mezclas expansivas, que aumentan de volumen (mayores al 100% del volumen inicial), que contienen gas que es generado durante la reacción química entre el cemento y polvo de aluminio (numeral 4.8.4.1). La proporción usual de estos aditivos es de hasta 2 kg/m³ de mezcla.

El objetivo de inyectar las mezclas de cemento – espuma y mezclas expansivas, es la de llenar oquedades.

6.5.3 Mezclas de inyección con altas resistencias a la compresión

Para alcanzar mezclas de inyección con altas resistencias a la compresión, es (1) agregando a la mezcla un dispersante o aditivo que permita el bombeo de mezclas con relaciones de agua: cemento bajas, o (2) agregando puzolanas a la mezcla para modificar la relación cal/ sílice del cemento y así incrementar la resistencia de la mezcla.

6.5.4 Mezclas de inyección con alta resistencia al lavado

Para lograr el objetivo de obtener mezclas con alta resistencia al lavado, es agregando aditivos espesantes que aumenten la viscosidad y cohesión de la mezcla, modificando la reología de la mezcla y así la interacción en el agua y la mezcla.

6.5.5 Mezclas de inyección de alta durabilidad

Cuando los tratamientos de inyección estén expuestos a condiciones climatológicas de congelamiento y descongelamiento, a ataques con cloruros, a ataque de sulfatos y a gradientes hidráulicos altos. Es necesario diseñar mezclas de inyección para disminuir el efecto de los anteriores eventos descritos, por medio de pruebas con diferentes combinaciones de mezclas con diferentes tipos de cementos, mezclas de inyección a base de cemento con puzolana, mezclas de inyección con aditivos e inyecciones químicas.

La durabilidad del tratamiento a largo plazo, depende de un buen diseño de mezcla, un control en el procedimiento de inyección y el control de calidad en obra.

6.5.6 Mezclas de inyección para relleno de oquedades

Cuando se encuentren grandes oquedades durante el tratamiento de inyecciones, el objetivo es llenarlas lo más rápido, económica y adecuada posible. Se diseñar un adecuado programa de inyección para realizar dicho procedimiento. Por medio de mezclas gruesas de agua: cemento y bentonita, o mezclas expansivas, así como mezclas particulares.

7. PRESIONES DE INYECCIÓN

7.1 CRITERIOS BASICOS DE PRESIÓN DE INYECCIÓN

Las reglas generales de selección de las presiones requeridas para inyectar las mezclas en el macizo rocoso, las cuales han sido utilizadas en varios procedimientos de inyección en el mundo. Estas reglas son la de inyectar la mezcla de inyección a una tasa presión de 1 libra por pulgada cuadrada (psi) por cada pie de profundidad en unidades inglesas y en unidades internacionales de 1 kg/cm^2 por cada metro de profundidad. Estas reglas de presiones de inyección deben tener en cuenta el estado de esfuerzos que tiene la roca en profundidad para que las presiones de inyección no fracturen la roca, las presiones deben ser lo suficientemente altas para penetrar en el macizo rocoso o en las discontinuidades muy cerradas, pero deben tener un límite para mantener la roca intacta y no fracturarla.

7.2 CRITERIOS EUROPEOS DE PRESIÓN DE INYECCIÓN

Los criterios europeos en la selección de las presiones de inyección son los de inyectar a presiones suficientemente altas para facilitar la penetración de la mezcla de inyección y para esto se requiere la abertura de las discontinuidades para que la mezcla pueda ingresar y así rellenar adecuadamente las discontinuidades.

Para lograr la abertura de las discontinuidades es necesario tener una deformación elástica de la roca para que la mezcla pueda penetrar y obtener viajes de la mezcla más allá de lo previsto inicialmente.

Sin embargo, luego de varios estudios con altas presiones de inyección en macizos rocosos, se encontró que las altas presiones de inyección pueden crear nuevas discontinuidades o fisuras en la roca en la parte superficial del macizo rocoso. En profundidad la roca resiste mayores presiones de inyección.

Para revisar el efecto de las presiones de inyección se deben revisar durante el procedimiento de inyección, las gráficas de presión versus caudal (P vs. Q) y de presión versus tiempo (P vs, T). Estas graficas son de gran importancia para controlar el efecto de fracturamiento de la roca. El fracturamiento se observaría en la gráfica como una caída súbita de presión con caudales altos durante periodos de más de 5 minutos, lo cual es un indicio de una abertura de una discontinuidad existente o la creación de nuevas

discontinuidades por el fracturamiento de la roca creado por la presión de inyección. En la Figura 7.1, se observa el efecto de fracturamiento por una alta presión en las gráficas P vs Q y P vs T.

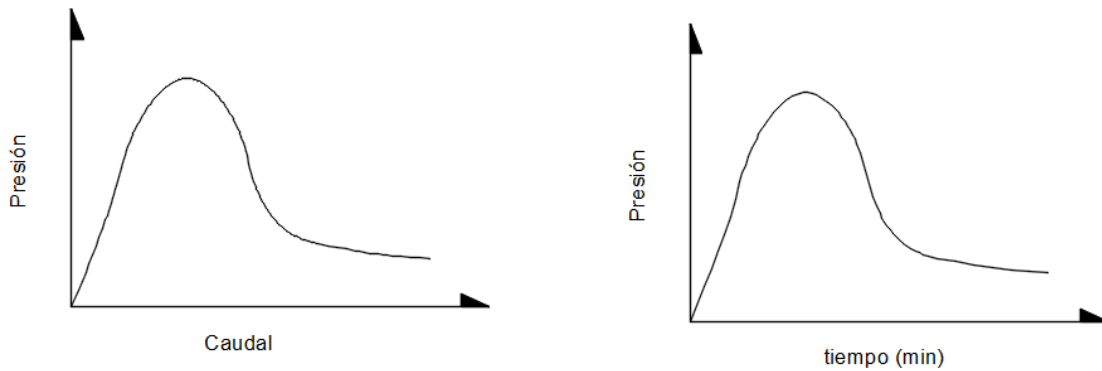


Figura 7.1. Gráficas P vs Q y P vs T .Fracturamiento del macizo rocoso por efecto de las altas presiones de inyección.
Fuente del autor

Teniendo en cuenta en las gráficas P vs. Q, las caídas de presión súbitas en menos de 1 minuto con caudales altos, puede ser la abertura de una discontinuidad que vuelve a cerrarse rápidamente. Este efecto no afectará al macizo rocoso ya que la presión de inyección es lo suficiente para abrir las discontinuidades en el estado elástico de la roca. Esta condición se observa en la siguiente figura.

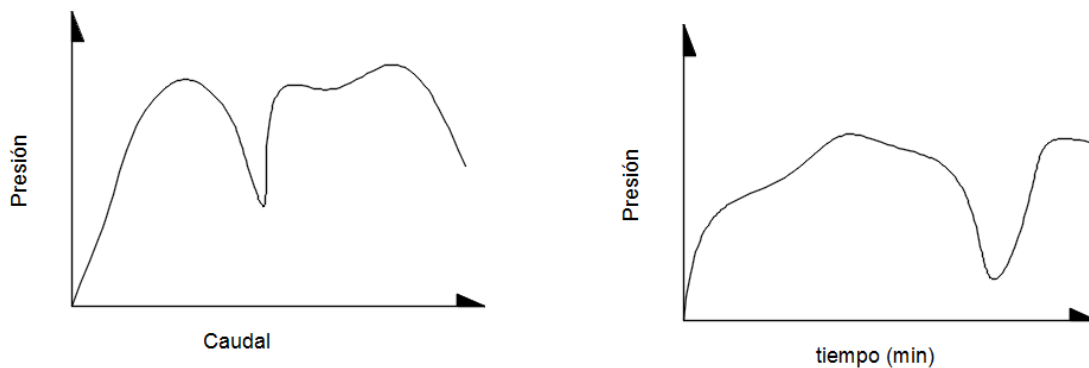


Figura 7.2. Gráficas P vs Q y P vs T. Cambio de presión de presión de inyección.
Fuente del autor

Como se observa en la anterior figura, las presiones son lo suficientemente altas para abrir rápidamente una discontinuidad sin fracturar el macizo, estos niveles de presión son considerables para tratar el macizo rocoso.

7.3 CRITERIOS CONTEMPORANEOS EUROPEOS DE PRESIÓN DE INYECCIÓN

Estos criterios cambian respecto a los criterios básicos, anteriormente explicados, la presión de inyección es directamente proporcional a la abertura de las discontinuidades. Este criterio lo desarrollo Lombardi (2003) por medio de la siguiente ecuación.

$$R_{max} = [P_{max} * t]/c \quad (7.1)$$

Donde,

Rmax = el radio máximo de penetración de la mezcla

Pmax = presión máxima de inyección

t = abertura de la discontinuidad / 2

c = cohesión

Dependiendo del radio de penetración requerido según el tratamiento, se selecciona una presión máxima de inyección. Esta relación teórica entre la presión y la abertura de las discontinuidades, es deseable para obtener un adecuado tratamiento, ya que esta presión es suficiente para abrir las discontinuidades sin afectar el macizo rocoso. Según Lombardi y Deere (1993), desarrollaron un enfoque para el procedimiento de inyección por medio de la energía específica gastada durante la inyección, esta energía gastada es el resultado entre el producto de la presión final (P) de inyección y el volumen de la mezcla inyectada (V). El valor numérico de este producto lo llamaron número de energía de inyección o GIN (*grouting intensity number*) en sus iniciales en inglés. La explicación de este método de inyección se detalla en el numeral 9.3.

7.4 CRITERIO AMERICANO DE PRESIÓN DE INYECCIÓN

El criterio americano de presión de inyección, está en función del tamaño de las partículas de la mezcla de inyección que se usara en el procedimiento de inyección y que pasara por las aperturas de las discontinuidades a tratar. Así, se determina si el macizo rocoso o las discontinuidades son inyectables. Este criterio se determina con la relación de la mezcla

de inyección que es igual a la apertura de la discontinuidad y el diámetro máximo de las partículas de la mezcla de inyección.

El criterio americano acepta presiones de inyección altas, para abrir las discontinuidades existentes y ser rellenadas por la mezcla de inyección. Sin embargo, el criterio americano de presiones de inyección advierte, que las altas presiones de inyección no se deben realizar en macizos rocosos de roca débil o donde se puedan presentar desplazamientos en el macizo debido a una obra civil, por ejemplo la construcción de una presa o un contrafuerte sobre el macizo rocoso.

7.5 PRESIÓN MÁXIMA ADMISIBLE

Las presiones máximas permitidas para la inyección de mezclas sugeridas por Houlby (1990), se detallan en la Figura 7.3. En esta figura se muestran las presiones en diferentes condiciones de la roca y profundidades de inyección.

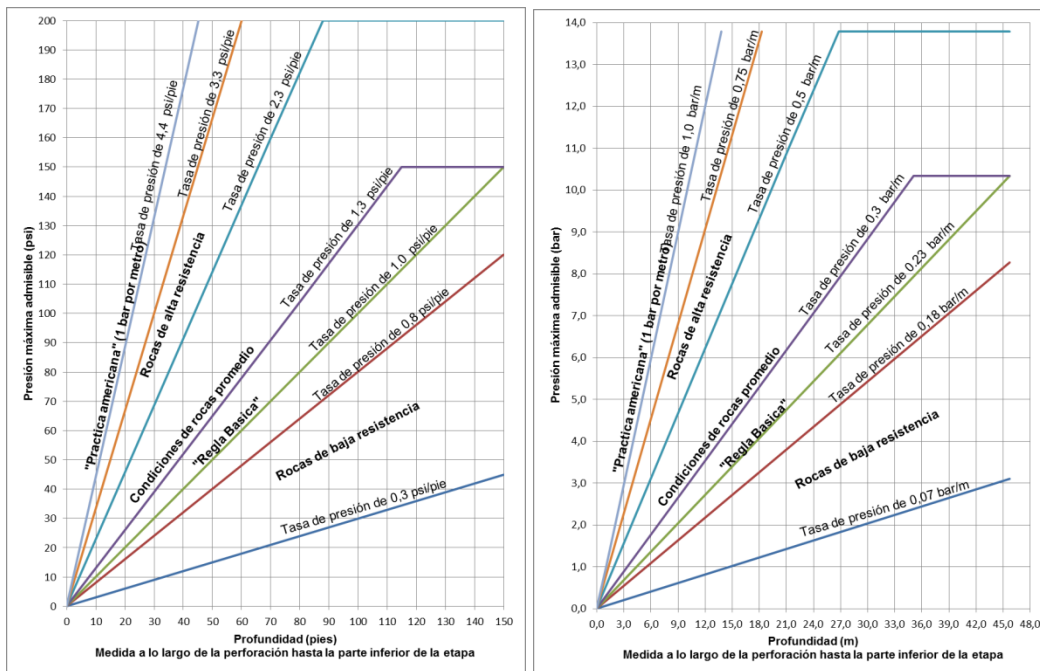


Figura 7.3. Gráficas de presión máxima permitida en diferentes condiciones de la roca y profundidad. En unidades de psi/ft y bar/m.

Adaptado de "Construction and design of cement grouting" de Houlby, A.C. (1990).

Las presiones que se muestran en la figura son las que están en la superficie y se leen hasta el fondo de la perforación que se está inyectando. La presión máxima recomendada

por Houlsby (1990) para rocas promedio es de 10,3 bar (150 psi), debido a que no es necesario incrementar las presiones para obtener un adecuado tratamiento. Lo anterior, se basa de experiencias de Houlsby (1990) de diferentes procedimientos de inyección.

En el ANEXO 1, se observa en detalle las presiones sugeridas por Houlsby (1990).

7.6 UNIDADES DE LA PRESIÓN

Las unidades de presión de inyección son una de las complicaciones de las inyecciones ya que proviene de dos sistemas internacionales de medición. Como se observa en la Figura 7.3, las presiones de inyección se expresan en psi y bares. También existen otros equivalentes métricos de medición de la presión los cuales están expresados en: atmosfera, kPa, MPa y kg/cm².

No obstante en unidades métricas del sistema internacional la unidad oficial es kPa, un (1) kPa es una cantidad muy pequeña de presión, lo que equivale a 0,145 psi y 0,01 bar.

Generalmente, cuando se realizan procedimientos de inyección se utilizan manómetros (Fotografía 3.3), el cual tiene valores en bar o psi. El manómetro es utilizado para revisar las presiones de inyección en el punto donde se realizara el tratamiento. Sin embargo, existen equipos especializados de cómputo que registran la presión en kPa, donde se pueden observar los cambios leves en la presión de inyección.

7.7 PRESIONES DE INYECCIÓN POR PRESIÓN HIDROSTÁTICA DE LA MEZCLA

En algunos procedimientos de inyección se puede usar la presión hidrostática creada por la mezcla, dentro de la perforación, por ejemplo en una mezcla de inyección a base de cemento puede tener una presión hidrostática de 0,16 bar por metro de profundidad, por lo que muchas perforaciones profundas pueden desarrollar presiones altas por la columna de mezcla dentro de la perforación. Así, muchos tratamientos menores no requieren de la asistencia de equipos de bombeo para aumentar la presión de inyección.

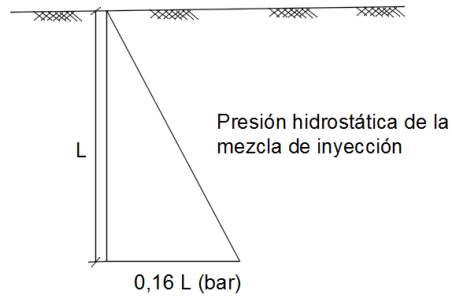


Figura 7.4. Presión hidrostática de la mezcla de inyección
Fuente del autor.

7.8 CONCLUSIONES DE PRESIONES DE INYECCIÓN

7.8.1 Selección de presiones de inyección

Las presiones de inyección deben ser planteadas en varias etapas, la presión inicial establecida en una etapa conceptual es la de la regla básica de 1 bar por metro de profundidad. En una etapa siguiente se debe considerar las presiones mostradas en la Figura 7.3, donde los criterios de selección son acordes con las experiencias de tratamientos realizados por Houlsby (1990).

En la etapa previa al inicio de actividades de inyección, se debe seleccionar una presión de inyección acorde con las condiciones del sitio. Para esto, se utiliza de base la presión establecida de la Figura 7.3 y se realizan pruebas de inyección in situ (numeral 2.3.3), la presión de inyección que resulta de estas pruebas es la más acertada a las condiciones del macizo rocoso. En caso de no realizar dichas pruebas de inyección en el sitio, la presión de inyección puede ser modificada durante el procedimiento de inyección. Analizando la información obtenida de los primeros tratamientos ejecutados en el proyecto.

7.8.2 Consideraciones especiales

Debido a la variedad de condiciones del macizo rocoso que pueden estar presentes en los sitios geológicamente complejos y a los posibles cambios en las orientaciones de las estructuras geológicas (estratificación y discontinuidades), no se debe esperar que un solo criterio de inyección sea adecuado en todo el proyecto, puede que se utilicen varias presiones de inyección por cada unidad geológica.

Cuando se utilicen presiones de inyección altas, las mezclas de inyección deben diseñarse para tener un bajo potencial de filtración (numeral 4.2.9) para evitar un cierre prematuro de las discontinuidades finas. Así mismo, revisar las condiciones de estabilidad en las laderas con las presiones de inyección, ya que presiones altas de inyección pueden desestabilizar un bloque de roca o pueden causar desplazamientos en el macizo rocoso que pueden requerir de medidas de reparación costosas y demoradas.

Las propiedades de los materiales de inyección (numeral 4.2), son de gran importancia para obtener tratamientos adecuados, cambiando sus propiedades reológicas para que la mezcla de inyección penetre adecuadamente en el macizo rocoso o en las discontinuidades con una presión de inyección segura.

8. EQUIPOS

8.1 PERFORADORAS

En el mercado existen varios tipos de equipos de perforación y accesorios que están disponibles comercialmente, aunque algunos están diseñados específicamente para los tratamientos con inyecciones. Fundamental para la perforación de orificios de inyección son los equipos de perforación. Además, se requieren bombas de lodo para presurizar el flujo de circulación, los tanques de lodos y las mangueras y accesorios correspondientes.

Las perforaciones para los tratamientos con inyecciones pueden perforarse con métodos con broca de diamante y recobro o de rotopercusión sin recobro. Esta última es más rápida y económica que la perforación con recobro, este método tiene resultados satisfactorios siempre y cuando se no se tengan altas desviaciones en la perforación.

Las perforaciones con recobro de muestra, tienen la ventaja de observar el estado de la roca y sus discontinuidades, lo que es útil para optimizar los tratamientos durante los procedimientos de inyección. Así mismo, tiene la ventaja de tener menor desviación que la rotopercusión y se obtiene un orificio con paredes más homogéneas y rectas. Según Wyllie (2005), se debe tener como mínimo un 10% de desviación de la perforación para obtener información adecuada del recobro.

Antes de iniciar con el procedimiento de inyección dentro de la perforación, esta se debe limpiar con aire o agua, para evitar el bloqueo de las discontinuidades que se intersectan en las paredes de la perforación y así la mezcla de la inyección pueda penetrar adecuadamente y rellenarlas.

Si durante la perforación con recobro o con rotopercusión se observa pérdida de agua o aire, posiblemente por la intersección de una discontinuidad abierta o un estrato de roca débil o friable, se debe finalizar la perforación para minimizar el riesgo de derrumbe de la perforación. Ante esta situación es recomendable realizar el procedimiento de perforación e inyección con el método de inyección descendente, tal como se explicó en el numeral 3.2.3.4.

8.1.1 Métodos de perforación

Los métodos de perforación deben satisfacer las necesidades del proyecto y las restricciones ambientales (ruido, vibraciones, disposición de material de perforación, entre otras), para que las perforaciones sean rápidas y adecuadas para las inyecciones. Igualmente, el método escogido no dañar ninguna estructura existente adyacente.

El diámetro de perforación para los orificios de las inyecciones se selecciona de acuerdo a la disponibilidad y dimensiones de los equipos, la facilidad para mover los equipos en el sitio de obra, los tamaños de los empaques (*Packers*), la estabilidad de las paredes de la perforación y la desviación de las perforaciones requeridas para el proyecto. Es decir, que la selección del diámetro de perforación para los tratamientos es netamente operativo y no afectara en el resultado del tratamiento. Tal como dijo Houlsby (1990), *“El diámetro de perforación de las inyecciones no es importante, dentro de lo razonable.”*

Las principales variables para escoger el método de perforación son: la geología del sector, la profundidad de las perforaciones, el diámetro de perforación, la desviación máxima permitida, las restricciones de acceso a la perforación y el costo.

8.1.2 Perforación en rocas

Existen tres métodos de perforación de roca:

- Alta velocidad de rotación con bajo torque y bajo empuje o a baja velocidad de rotación, alto torque y alto empuje.
- Rotopercusión con martillo
- Rotación y vibración.

8.1.2.1 Rotación

Los equipos de perforación de rotación de alta velocidad, son los utilizados para la extracción de núcleos o muestras de roca, los cuales usan brocas de punta de diamante o de tungsteno. La perforación con este equipo es rápida y limpia, para rocas duras y masivas. Sin embargo, el recobro de las muestras de rocas es demorado y requiere más tiempo para no afectar las muestras. El diámetro típico de los equipos de rotación es de

26 a 76 mm, que pueden llegar a profundidades de perforación hasta 150 m, aunque a un alto costo.

El diámetro más utilizado es al menos 76 mm, para minimizar la desviación de perforación.

Las ventajas de la perforación rotatoria son las siguientes:

- El mismo equipo de perforación se puede utilizar para la extracción de núcleos y para la ejecución de inyecciones.
- El recobro de muestras de roca es continuo e intermitente a lo largo de toda la perforación.
- Pueden alcanzar profundidades de hasta 300 m.
- La desviación de los equipos con rotación es menor que la desviación registrada en los equipos de rotoperCUSión.
- Es posible perforar en todo tipo de roca, con excepción de rocas friables o de depósitos, donde las tuberías de la perforación se pueden obstruir por los posibles derrumbes de las paredes de la perforación.
- Para impulsar el equipo se puede utilizar cualquier fuente de energía, como eléctrica o diesel.
- Con este equipo es más fácil la colocación de los empaques en las paredes, ya que se encuentran relativamente lisas.
- Los avances de perforación son relativamente altos, para rocas de baja resistencia.
- No se generan vibraciones en el macizo y estructuras cercanas, al realizar la perforación.

Pese a las anteriores ventajas, este tipo de perforación es poco usada en la perforación de orificios para inyecciones por motivos económicos, comparándola con el método de rotoperCUSión. El uso de equipos de rotación con recobro se hace en sitios puntuales del tratamiento donde se requiera la exploración del macizo y obtener mayor información (adicionándola a la información existente de la etapa de investigación geotécnica), para optimizar el tratamiento y/o reforzar el tratamiento por particularidades geológicas encontradas.



Fotografía 8.1. Perforadoras de rotación realizando procedimiento de perforación para inyecciones.
Fuente del autor.

Usualmente estos equipos requieren agua para lubricar las brocas de perforación, aunque existen equipos con rotación en seco con brocas especiales, las cuales son más costosas que las normales. Se debe tener en cuenta que los equipos de rotación con agua, pueden afectar los macizos rocoso de baja resistencia o con estratos de roca friable.

8.1.2.2 Rotopercusión

El método de rotopercusión, es la perforación con broca (de carbono u otro) que es percutida y girada a la vez. La penetración de la broca en la roca está en función de la percusión y se determina con energía de percusión necesaria. Se utiliza aire comprimido para activar la percusión y el aire utilizado se expulsa alrededor de la broca saliendo por la boca de la perforación, arrastrando la roca triturada por el efecto de la perforación.

La perforación con rotopercusión tiene diámetros según el tamaño del equipo, para taladros pequeños tienen un rango de 25 a 40 mm y equipos de orugas hidráulicas tienen un rango de 40 a 75 mm. La profundidad máxima que alcanzan los equipos con rotopercusión es de 60 m, debido a la pérdida de potencia de percusión en profundidad y grandes desviaciones en el fondo de la perforación.



Fotografía 8.2. Perforadora de rotopercusión.

Fuente del autor.

Según Wilson, Kenneth y Bruce (2007), las ventajas de la perforación de rotopercusión son las siguientes:

- La perforación tiene rendimientos de penetración más alta que los métodos de rotación (Deere, 1981). Según Bruce (2013b), las tasas de penetración de rotopercusión es del orden de 10 a 20 m por hora, dependiendo del tipo de roca.
- Los costos de perforación es menor que el método de rotación
- La desviación es menor hasta profundidades de 60 m.
- Se pueden taladrar orificios de diámetros de 55 a 1200 mm.

Una desventaja potencial del método de rotopercusión. Es que el macizo rocoso puede estar expuesto a altas presiones por el aire comprimido, por el efecto de la percusión. Esto puede generar posiblemente un fracturamiento localizado

8.1.2.3 Rotación y vibración

Este método es similar al método de rotación solo que utiliza vibración mecánica a altas frecuencias, para obtener muestras de núcleos de roca continuas. La broca de perforación es vibrada por medio de un cabezal que es accionado hidráulicamente a frecuencias continuas (entre 50 y 150 Hz) y gira lentamente para distribuir lentamente la energía y disminuir el desgaste de la broca. La frecuencia de vibración se ajusta dependiendo del tipo de roca para lograr la máxima tasa de penetración.

Según Wilson, Kenneth y Bruce (2007), las ventajas de la perforación de rotación y vibración son las siguientes:

Se pueden obtener núcleos de roca continuos sin utilizar agua para el lavado de las brocas, con una tasa de penetración de aproximadamente 18 m/min.

Penetra fácilmente cualquier tipo de roca u obstáculos artificiales, como concreto, cantos rodados y otros.

La profundidad máxima de perforación es de 600 m. Sin embargo, la mayoría de perforaciones utilizadas para tratamientos con inyecciones, son menores a 120 m de profundidad.

En la Figura 8.1, se muestran las tasas de penetración para diferentes métodos de perforación comparándolos con el método de rotación y vibración.

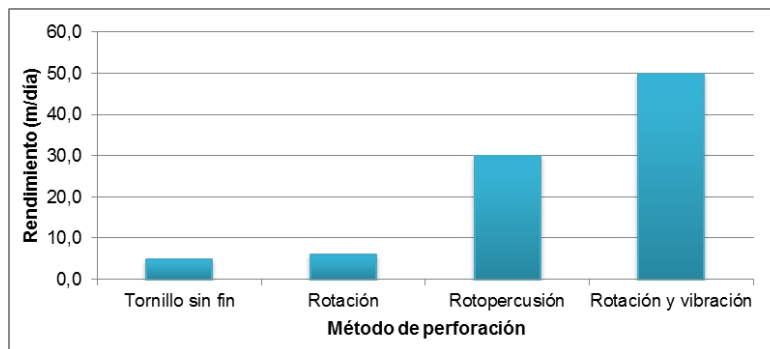


Figura 8.1. Comparación de rendimientos de perforación para diferentes métodos de perforación.

Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

De la anterior figura, se detalla que los rendimientos de perforación con el método de rotación y vibración es el más alto. Sin embargo, al realizar la perforación con este método puede incrementar los costos de perforación. Se tiene que revisar, si los rendimientos de perforación justifican un ahorro en el tiempo de ejecución del tratamiento con un costo elevado de perforación.

Tal como se explicó en el numeral 8.1.2.2, el método de rotopercusión es el más común utilizado en tratamientos con inyecciones. Debido a su alto rendimiento de perforación, tal como se detalla en la Figura 8.1.

8.2 EQUIPOS DE INYECCIÓN

8.2.1 Mezcladoras

8.2.1.1 Mezcladoras coloidales

Las mezclas de inyección a base de cemento, requieren de mezcladoras de alta velocidad y alto cizallamiento, para evitar la suspensión de las partículas coloidales y así la mezcla no pierda sus propiedades reológicas. Cuando se mezcla a alta velocidad la mezcla, la exudación es baja

Sin embargo, se debe tener en cuenta que si la velocidad de mezcla es muy alta, puede conllevar a que la mezcla se sobrecaliente y por consiguiente al fraguado prematuro de la mezcla.

El cizallamiento ayuda a dispersar las partículas de cemento aglomeradas de material suspendido, estas partículas aglomeradas se encuentran en la parte superior de la mezcladora donde la velocidad de mezcla es menor, por lo tanto se debe crear un retorno de mezcla tangencial para que disgregue la aglomeración de partículas.

Las mezclas de inyección que se encuentran en constante movimiento por el movimiento centrífugo y de cizallamiento de la mezcladora, son más homogéneas debido a la dispersión de las partículas.

8.2.1.2 Mezcladoras de paletas

Las mezcladoras de paletas son tanques con paletas verticales u horizontales girando en una rotación lenta. Comparándolas con las mezcladoras coloidales son más económicas por su mantenimiento sencillo.

Estas mezcladoras usualmente se usan para trabajos sencillos de inyección, como lo son: (1) llenado de cavernas e (2) inyecciones de contacto entre revestimientos de túneles y la roca. Debido a que, no se requiere mezclas con una dispersión total de las partículas de cemento. No obstante, el uso de estas mezcladoras también puede tener desventajas como el bloqueo de las líneas de inyección por la falta de homogeneidad en la mezcla.

8.2.2 Agitadores

Al finalizar o durante el procedimiento de inyección, la mezcla de inyección que no se utilizó debe retornar al sistema para utilizarse más adelante, para esto la mezcla debe ser

dispuesta en agitadores. La función de los agitadores es mantener las partículas de cemento de la mezcla en suspensión y mantener las mezclas fluidas con sus propiedades reológicas, para ser utilizadas en otros procedimientos de inyección.

El agitador es un tanque cilíndrico vertical equipado con una paleta giratoria montada en un eje vertical. La agitación de la mezcla se realiza en un movimiento turbulento para evitar el asentamiento de las partículas más pesadas, en la parte inferior del tanque.

La ubicación de los agitadores en el procedimiento de inyección, es cerca del punto de inyección para:

- Para controlar la velocidad y presión de inyección. Para tomar las decisiones oportunas en caso de cualquier novedad.
- Se minimiza el bloqueo de las líneas de inyección
- Se minimiza la fricción de la mezcla en las líneas de inyección. Así como, la exposición de la línea de inyección al ambiente (temperaturas altas o bajas).
- Es más fácil la limpieza de las líneas de inyección.
- Se reduce el desperdicio de mezclas de inyección.

8.2.3 Bombas

8.2.3.1 Bombas de cavidad progresiva

Estas bombas producen una alimentación continua al sistema de inyección con poca variación de presión, con pocas probabilidades de obstrucción de la mezcla que pueda causar una obstrucción en el sistema. Sin embargo, el desgaste de estas bombas es alto cuando se utilizan mezcla de inyección con arena, generando altos costos de mantenimiento.

El control del caudal de mezcla de inyección en estas bombas es por medio de una transmisión manual que controla la velocidad de bombeo. Debido a esto, se generan presiones y caudales altos, que se controlan por medio de una línea de retorno de mezcla. Las presiones generadas por estas bombas pueden ser de hasta 2 MPa.

8.2.3.2 Bombas de pistón

Las bombas de pistón, funcionan por el movimiento de pistones, moviendo la mezcla con una presión pulsante, con la capacidad de inyectar la mezcla a presiones superiores a 7 MPa

Las bombas de pistón, que ofrecen la capacidad de inyectar lechada a presiones superiores a 7 MPa, estas se utilizan en la mayoría de procedimientos de inyección. Sin embargo, la presión pulsante puede ser difícil cuando se tiene presiones bajas. Esta situación se mitiga con bombas auxiliares cuando se alcanzan dichas presiones bajas.

El control de las fluctuaciones de presión se realiza colocando una cámara de compensación de presión, en la línea de descarga de la mezcla.

Según Bruce (2007), el uso de este tipo de bombas favorece a evitar el bloqueo prematuro de las partículas en discontinuidades muy cerradas.

8.2.3.3 Bombas de émbolo

Las bombas de émbolo, son bombas de desplazamiento positiva, que funcionan por la acción de un motor que mueve el émbolo hacia adelante y atrás en un cilindro. Esta acción crea una succión movilizandando la mezcla. Dependido del tamaño del émbolo, las bombas se pueden configurar para que la mezcla se inyecte hasta presiones de 14 MPa. Estas bombas se utilizan para las inyecciones de mezclas químicas y/o resinas.

8.2.4 **Plantas de inyección**

Los equipos de inyección explicados anteriormente se agrupan para crear una sola planta grande o varias plantas de inyección. Estas plantas permiten disminuir los costos en el uso de los materiales y el uso de la mano de obra.

Existen de varios tipos de plantas: (1) plantas estacionarias (planta central), (2) plantas modulares (o en contenedores) y (3) plantas pequeñas o compactas.

Independientemente del tipo de planta, es esencial que el personal en obra este continuamente en contacto desde cualquier punto del procedimiento de inyección para controlar el procedimiento de inyección.

8.2.4.1 Plantas estacionarias (central)

La planta central o estacionara, está ubicada en un punto central del proyecto para controlar y distribuir mezcla de inyección a varios sitios del proyecto. Esta planta contiene varios grupos de mezcladores, agitadoras, bombas y equipos auxiliares. El uso de este tipo de planta es utilizada para procedimientos de inyección donde se requieran grandes volúmenes de mezcla y se realicen procedimientos de inyección en varias ubicaciones al mismo tiempo.



Fotografía 8.3. Planta estacionaria de inyecciones.
Fuente del autor.

La mezcla de inyección producida de estas plantas, es bombeada a los puntos de inyección donde se ubican agitadores locales. En estos agitadores locales se puede modificar las propiedades de la mezcla adicionándole aditivos específicos.

8.2.4.2 Plantas modulares (en contenedores)

Las plantas modulares permiten colocar varios equipos de inyección en contenedores de 3 o 6 m, para ser movilizados a diferentes lugares en obra.



Fotografía 8.4. Planta modular de inyecciones.
Fuente del autor.

8.2.4.3 Plantas pequeñas o compactas

Son plantas de inyección ubicadas cerca al punto de inyección, donde se suministra la mezcla de inyección con bolsas, baldes u otro tipo de almacenamiento de la mezcla. Estas plantas se movilizan más fácilmente de un sitio de la obra a otro, disminuyendo los tiempos de movilización. Estas plantas usualmente se utilizan para realizar procedimientos de inyección en galerías de inyección y drenaje.



Fotografía 8.5. Preparación de la mezcla en el sitio con planta pequeña.
Fuente del autor.



Fotografía 8.6. Adición de aditivos en la mezcladora.
Fuente del autor.



Fotografía 8.7. Mezcla preparada en el sitio vertiéndose en la bomba.
Fuente del autor.



Fotografía 8.8. Planta pequeña de inyección en galería de inyección.
Fuente del autor.



Fotografía 8.9. Preparación de mezcla de inyección a base de cemento.
Fuente del autor.



Fotografía 8.10. Mezcladora homogenizando la mezcla a base de cemento.
Fuente del autor.

8.2.5 Cabezal de inyección

La presión de inyección se controla en la boca del orificio de inyección por medio de un cabezal, el cual se conecta mediante una manguera corta. En este cabezal se ubican dos válvulas de control, que se operan con una llave, para restringir la apertura de las válvulas. Estas válvulas se utilizan para controlar las presiones de inyección cuando se tienen bajos caudales de inyección.

Igualmente, estas dos válvulas sirven para controlar el retorno de mezcla de inyección y desviar el flujo hacia el orificio de inyección.



Fotografía 8.11. Cabezal de inyección durante procedimiento de inyección.
Fuente del autor.

8.2.6 Manómetros

Es un medidor de presión apropiado para medir la presión en el cabezal de inyección entre el orificio de inyección y la segunda válvula descrita anteriormente.

Para realizar la lectura de la presión, los manómetros deben tener escalas que puedan leerse con facilidad y los rangos apropiados. Las bombas de inyección deben tener un manómetro para registrar la presión en la bomba. Debido a que los manómetros se dañan con facilidad, se requieren, por lo menos dos manómetros adicionales de repuesto para reemplazar el manómetro dañado.



Fotografía 8.12. Manómetro durante procedimiento de inyección.
Fuente del autor.

8.2.7 Empaques (Packers)

Los empaques o *packers* son dispositivos diseñados para aislar una etapa de inyección y realizar el procedimiento de inyección o para aislar una sección de una perforación y/o realizar una prueba de permeabilidad. Los empaques consisten en un elemento

expandible, generalmente un caucho rígido reforzado con fibra, que se expande mecánicamente o inflarse tanto neumáticamente como hidráulicamente. Los empaques que se inflan neumáticamente, usan nitrógeno comprimido para expandir el empaque. La presión con la que se infla el empaque debe superar la presión de inyección, para realizar un tratamiento adecuado.



Fotografía 8.13. Empaques mecánicos.
Fuente del autor.



Fotografía 8.14. Empaques neumáticos.
Fuente del autor.

La efectividad del empaque para sellar una etapa o una sección de la perforación, para realizar la inyección o una prueba de permeabilidad, está en función del diámetro de la perforación, de la regularidad de las paredes de la perforación, las fracturas existentes en el macizo rocoso, la longitud y flexibilidad del empaque.



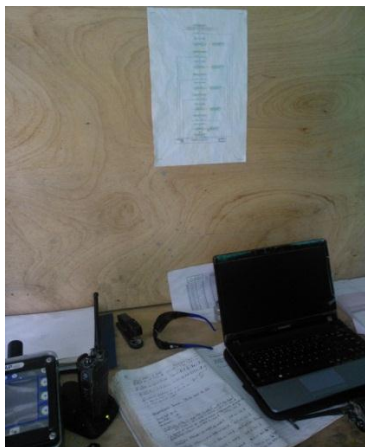
Fotografía 8.15. Colocación del empaque dentro de la perforación donde se realizará el procedimiento de inyección.
Fuente del autor.

8.2.8 Sistemas de control y monitoreo de inyección

Los sistemas de control y monitoreo de los procedimientos de inyección, se encuentran en evolución constante por la retroalimentación de experiencias de diferentes tratamientos. Sus principales funciones son:

- Recopilar la información de los procedimientos de inyección de forma remota.
- Mostrar los datos del procedimiento de inyección en tiempo real en la estación de control.
- Revisar los datos de presión, caudal, volumen inyectado, penetrabilidad y otros datos, en tiempo real, para realizar los ajustes necesarios para realizar un adecuado tratamiento de inyección.
- Proporciona y guarda los registros de los procedimientos de inyección, para su análisis posterior.
- Analizando la información de los resultados de inyección, permite optimizar los diseños del tratamiento de inyección.

La información observada en las pantallas de los sistemas de control y monitoreo de los procedimientos de inyección es: Ubicación y nombre de la perforación, profundidad de la etapa de inyección, tipo de mezcla de inyección, tiempo transcurrido, caudal de bombeo, presión de inyección, volumen inyectado, graficas en tiempo real de presión de inyección versus volumen inyectado, presión de inyección versus caudal de bombeo y otros gráficos que se quieran visualizar en tiempo real.



Fotografía 8.16. Centro de monitoreo del procedimiento de inyección.
Fuente del autor.



Fotografía 8.17. Equipo automatizado para visualizar las gráficas en tiempo real.
Fuente del autor.

9. MÉTODOS DE INYECCIÓN

9.1 FILOSOFÍA EUROPEA

Antes de iniciar la inyección, se debe verificar que todos los equipos electrónicos o automáticos para medir caudales y presiones estén certificados y calibrados para que funcionen correctamente.

Luego se inicia la inyección de la mezcla en el macizo verificando que la mezcla no se inyecte con presiones altas desde el inicio de la inyección, esto se realiza inyectando con caudales bajos, la presión máxima permitida solo debe aplicarse si la mezcla tiende a aceptarse en el macizo. Para controlar la inyección la presión debe aumentarse gradualmente por medio del caudal de inyección, cuando se observe que la presión o el caudal de inyección son apropiados, se cierra gradualmente la válvula donde circula la mezcla de inyección, para concluir con la etapa de inyección.

Durante el proceso de inyección, se debe tener precaución cuando se inyecta caudales altos de mezcla, debido a que el agitador de mezcla puede quedar vacío y puede haber inyección de aire en el sistema, afectando el tratamiento. Por lo tanto, cuando se tienen caudales altos de inyección se considera necesario reducir la presión hasta que el sistema sea estable, esto permitirá inyectar a un caudal estable sin necesidad de alcanzar la presión máxima de la etapa de inyección. Cuando en la etapa de inyección o la perforación de inyección tomaron grandes volúmenes de mezcla puede ser perjudicial alcanzar la presión máxima, ya que la etapa o perforación alcancen cierres en falso por la obturación temprana del tratamiento. La inyección de grandes volúmenes de mezcla puede ser el indicio de discontinuidades abiertas u oquedades que están siendo rellenadas por la mezcla, esto se observa en las primeras perforaciones de los tratamientos que deben ser verificados con perforaciones a espacio dividido (numeral 3.2.3.6).

Las mediciones de volumen de mezcla inyectado cuando son automatizadas deben leerse en tiempo real para la toma de decisiones en el sitio de inyección. Cuando no se utilicen equipos automáticos, las mediciones se deben realizar a intervalos regulares (10 a 15 min), para verificar la presión de inyección y buscar posibles comunicaciones entre perforaciones o fugas de mezcla en la superficie. Lo adecuado es supervisar y controlar el

volumen de mezcla de forma continua para tomar la decisión en el cierre o rechazo del proceso de inyección.

9.2 PRACTICAS AMERICANAS

En las practicas americanas de inyección, el procedimiento de inyección inicia generalmente con mezclas con relaciones de A: C de 2: 1 o más (en la actualidad se utilizan mezclas con baja exudación, <5%), en caso que durante el procedimiento la inyección continua aceptando mezcla sin disminución de caudal y sin incremento en la presión de inyección, entonces se debe usar una mezcla de inyección menos fluida. Puede que el tratamiento no tenga necesidad de engrosar la mezcla a menos que se requería limitar el recorrido de la mezcla. Sin embargo, el engrosamiento de la mezcla o el ajuste de las propiedades reológicas de la mezcla son apropiados cuando se encuentran discontinuidades muy abiertas u oquedades y la mezcla inicial no puede alcanzar la presión de inyección planteada luego de inyectar un volumen de mezcla preestablecido (por lo general 1000 litros). La secuencia del engrosamiento de la mezcla es pasar de 2: 1 a 1,5: 1, si no se llega a cumplir las condiciones descritas anteriormente se engrosa la mezcla de 1,5: 1 a 1: 1 y si se sigue presentando la misma situación se engrosa la mezcla de 1: 1 a 0,6: 1.

En general, las secuencias de engrosamiento se pueden seguir durante el procedimiento de inyección cuando se revisa la presión y el caudal en tiempo real.

De acuerdo con la experiencia de Bruce (2007), en varios procedimientos de inyección, para limitar el recorrido de las mezclas de inyección se requiere engrosar una mezcla de 1: 1 en peso luego de inyectar 50 sacos de cemento o más y detener el tratamiento cuando se inyectan 200 sacos de cemento. Luego de inyectar dicha cantidad de mezcla en sacos de cemento, se debe verificar el llenado de aberturas con perforaciones a espacio dividido y revisando durante estos tratamientos si existe la fuga de mezcla en superficie o en otros sectores del macizo, al igual revisar si se presenta el fracturamiento o levantamiento de la roca en superficie.

Por lo anterior, es importante controlar el recorrido de la mezcla sea lo suficientemente beneficioso para justificar el tratamiento y los costos. Para controlar el recorrido del tratamiento a los sectores requeridos se realiza con la manipulación de las propiedades

reológicas de la mezcla para llevar al cierre adecuado de la etapa o la perforación en lugar de colocar límites de volúmenes de mezcla inyectada arbitrarios.

9.3 MÉTODO GIN

Como se explicó en el numeral 7.3, para lograr la inyección de discontinuidades a una presión adecuada para abrirlas lo suficiente, sin generar fractura hidráulica, para penetrar en ellas y rellenarlas, se utiliza el método planteado por Lombardi y Deere (1993), de acuerdo a la energía específica gastada en la inyección, el valor numérico de esta energía se define como GIN.

El GIN es el producto de la presión de inyección por el volumen de mezcla tomado, cada vez que se detiene el proceso de inyección y el caudal de inyección este parámetro es nulo.

En la Figura 9.1, se muestra la representación de una estimación de la energía requerida en el proceso de inyección en un macizo rocoso. Si el efecto de la presión de inyección sobre el macizo fueran elásticos, el comportamiento fuera lineal, y cuando las pérdidas de energía por el efecto de la viscosidad de la mezcla, la cohesión de la mezcla con las paredes de las discontinuidades y las deformaciones inelásticas de la roca no se tienen en cuenta, el valor GIN sería el doble de la energía introducida por las bombas y es acumulada teóricamente en el macizo rocoso.

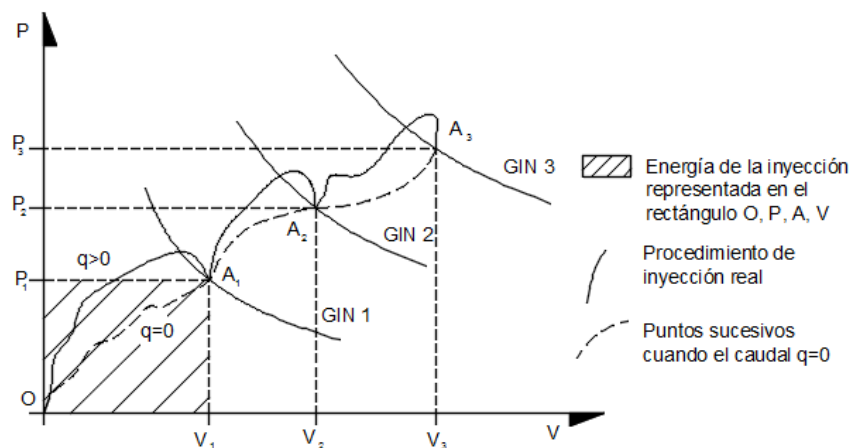


Figura 9.1. Procedimiento de inyección representado en una gráfica de presión versus volumen inyectado.

Adaptado de "Grouting of rock masses" de Lombardi (2003).

Como se observa en la anterior figura, el proceso de inyección se puede detener en cualquier presión final requerida o al alcanzar un valor GIN requerido. Con este método no se define un rechazo de la inyección por parte del macizo rocoso.

La energía de inyección requerida representada en el rectángulo O, P, A y V, se aproxima por medio de la siguiente ecuación.

$$E = \int_0^V p * dV \quad (9.1)$$

El valor GIN se evalúa con un caudal de inyección de cero (0) o cuando el bombeo se detiene.

Sin embargo, durante el procedimiento de inyección, las pérdidas en el sistema deben superarse, de modo que la presión manométrica es mayor que la requerida por el método GIN. Esta presión adicional puede ser del orden del 10% al 20% de la presión final.

El concepto de GIN se explica a continuación:

La apertura constante de las discontinuidades por medio de la presión de inyección, por medio de $R = \frac{p * e}{2 * c}$ (recorrido de la mezcla) y $V = \pi * R^2 * e$ (Toma en volumen). Con la definición de GIN como el producto de la presión y el volumen inyectado $GIN = p * V$. Se obtienen los siguientes parámetros.

$$GIN = p * V = 2\pi * n * k_p * k_v * c * R^3 \text{ (Cuando las discontinuidades se están abriendo)}$$

Donde,

GIN = Número de intensidad de inyección (*Grouting Intensity Number*)

c = Cohesión de la mezcla

R = Recorrido medio de la mezcla

p = Presión final de la mezcla

V = Toma de inyección (por metro de perforación)

e = Apertura teórica de discontinuidades planas

n = Número de discontinuidades principales

k_v = Coeficiente para considerar las pérdidas de presión debidas a la rugosidad de las paredes de roca de la discontinuidad y la variación de la apertura en la discontinuidad.

k_p = Coeficiente para considerar el aumento de volumen debido a las ondulaciones de las discontinuidades, así como a las variaciones de la apertura en las discontinuidades.

Así,

$R \cong \sqrt[3]{GIN}$ ó $R = R_t * \sqrt[3]{(GIN/GIN_t)}$, donde R_t y GIN_t son valores de pruebas de inyección.

El principal objetivo del método GIN, es evitar las presiones altas y altas tomas de inyección, que pueden llevar al fracturamiento del macizo rocoso. Teniendo en cuenta tres límites: (1) Presión máxima; (2) Volumen máximo de toma o de inyección y (3) La intensidad máxima.

El valor de GIN requerido para el tratamiento debe definirse mediante pruebas en el sitio donde se realizara el tratamiento, para adaptarlo a las condiciones del sitio.

Sin embargo, Lombardi (2003) sugiere límites de valores GIN (Figura 9.2) de acuerdo a sus experiencias en diferentes tratamientos. Estableciendo los límites para terminar el procedimiento de inyección.

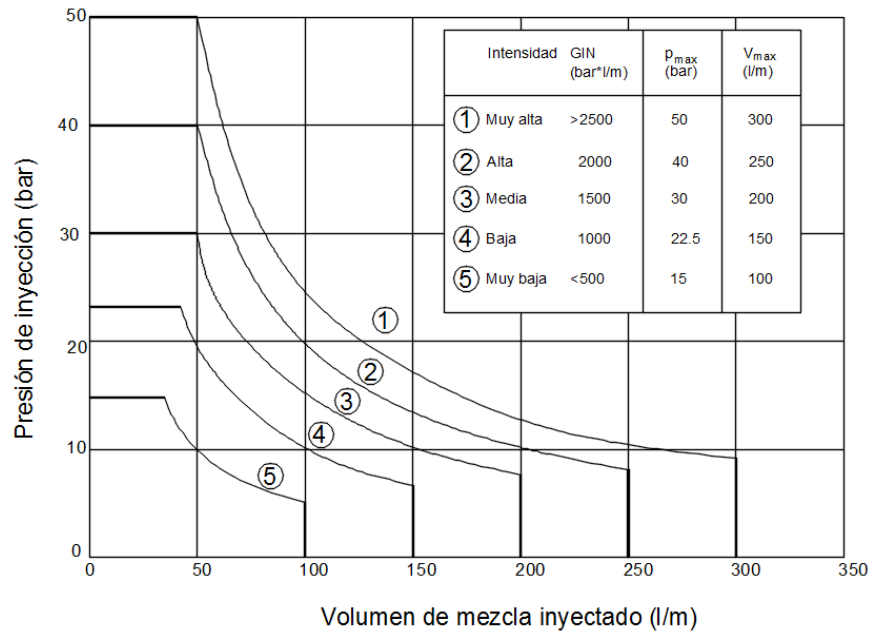


Figura 9.2. Curvas límites GIN, sirve de ayuda como guías iniciales de diseño. Adaptado de "Grouting of rock masses" de Lombardi (2003).

El fundamento del método GIN es reducir la presión de inyección en función del volumen inyectado en el macizo rocoso. Esto se puede observar en la Figura 9.3, cuando se utilizan perforaciones a espacio dividido en una cortina simple, las perforaciones de los siguientes niveles (secundarias, terciarias, etc) tienen los volúmenes de inyección más bajos conforme se incrementa la presión de inyección.

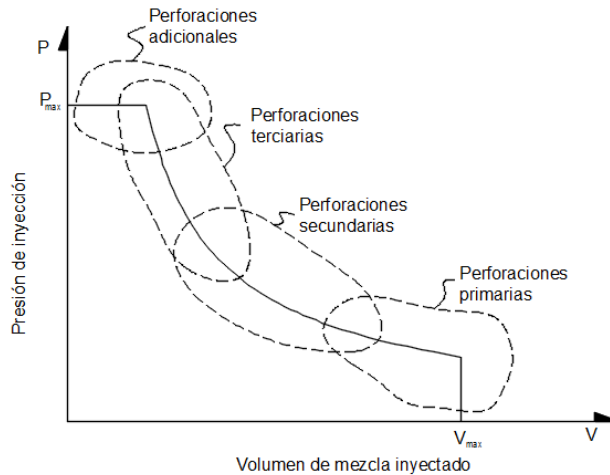


Figura 9.3. Ejemplo típico de resultados de inyección con el método GIN. Adaptado de "Grouting of rock masses" de Lombardi (2003).

De acuerdo a lo descrito por Lombardi (2003), los aspectos más importantes del método GIN son:

- La utilización de una única mezcla estable, la cual fue definida de pruebas de laboratorio para garantizar la durabilidad del tratamiento.
- La utilización de la limitación de GIN (presión máxima, volumen máximo e intensidad) más adecuada que depende de la perforación del tratamiento, la longitud de las etapas y el tamaño de las partículas de cemento que se adapte a las condiciones particulares del tratamiento, basándose de ensayos en campo y las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso.
- Seguir el procedimiento de inyección en un tiempo real en una pantalla y el registro continuo de la inyección.
- El análisis continuo de la información durante el procedimiento de inyección para la toma de decisiones y optimizar el tratamiento.
- No se requiere de pruebas de inyección en el macizo rocoso tratado con inyecciones.

9.4 MÉTODO DE ENGROSAMIENTO SUCESIVO

Como se explicó en el numeral 9.2, sobre las prácticas americanas de inyección, se utiliza un engrosamiento de la mezcla para rellenar adecuadamente el macizo a presiones estables, sin generar fracturamiento hidráulico. El engrosamiento de la mezcla permite modificar o ajustar las propiedades de la mezcla durante el proceso de inyección.

El método de engrosamiento sucesivo es un método de inyección que se ha aplicado en varios tratamientos con inyecciones en el país y en el mundo con resultados efectivos en su utilización. El método es el resultado del mejoramiento de las prácticas americanas con la utilización de mezclas de inyección con aditivos apropiados para todo tipo de rocas (Carter, 2003).

Las principales características del método de engrosamiento sucesivo son:

- El uso de una mezcla base en todo el procedimiento, una mezcla fluida (0.5: 1 a 0.7: 1), que tendrá la adición de un porcentaje de plastificantes o superplastificantes, que permitirá mejorar las propiedades reológicas de la mezcla.
- Cuando sea necesario, durante el procedimiento de inyección, se cambiara la viscosidad de la mezcla para engrosarla. Esto se realizara quitándole el

plastificante o superplastificante a la mezcla como primera instancia, si la viscosidad no lo suficientemente alta, se le adicionara porcentajes bajos de bentonita a la mezcla base, con el fin de incrementar la viscosidad y disminuir el recorrido de la mezcla en el tratamiento. Así, se disminuirán los volúmenes de inyección y costos del tratamiento, con resultados adecuados.

- A medida que la mezcla penetre en las discontinuidades del macizo rocoso, el bombeo de inyección se realizara de forma gradual desde caudales bajos hasta un caudal constante de mezcla, para obtener un incremento paulatino en la presión de inyección.
- El engrosamiento sucesivo requiere del monitoreo continuo en los sitios de inyección de presión, caudal y volumen de mezcla inyectado, por medio de instrumentos como manómetros, caudalímetros o cuentalitros.
- El proceso de inyección de una etapa o una perforación finalizara cuando se agoten los límites de presión y/o caudal establecidos para el proyecto. Cuando el procedimiento de inyección alcance el límite de volumen especificado para el proyecto. Se decidirá: (1) suspender el tratamiento y continuar con otro tratamiento; (2) continuar el procedimiento hasta obtener la presión máxima especificada o; (3) suspender el bombeo de mezcla en el sitio, lavar el hueco y comenzar de nuevo con el tratamiento en el mismo sitio.

Cuando finalice el procedimiento de inyección y poder continuar en una siguiente etapa o perforación, se debe dejar los obturadores en sitio hasta que se observe en los manómetros que se disipo la contrapresión generada por la presión de inyección. Así, se podrán quitar los obturadores y continuar. Igualmente, al finalizar el procedimiento de inyección se observa que la mezcla permanezca en el macizo en determinada etapa o perforación, se debe verificar que no exista retorno de mezcla cuando se abran las válvulas. Si se observa retorno por las válvulas, toca esperar por un periodo de 15 a 30 min para revisar que no exista retorno de mezcla por las válvulas y se tenga la seguridad que la mezcla fragüe en el macizo.

Al igual que método GIN, este método requiere de un equipo automatizado y sensores electrónicos de alta precisión para controlar el proceso de inyección, mediante la observación de los parámetros de inyección: presión de inyección, caudales, penetrabilidad de la mezcla (curvas Caudal vs. Presión) y el volumen de inyección. El

control de estos datos permitirá la optimización del procedimiento de inyección y en la toma de decisiones preventivas y en otros procedimientos de inyección en el proyecto.

El proceso de inyección con el método de engrosamiento sucesivo es el siguiente:

- Se inicia el procedimiento de inyección con la mezcla base fluida (Relaciones 0.5: 1 a 0.7 a 1 + superplastificante). Iniciando con caudales bajos (3 l/min), incrementándolos cada 5 l/min en periodos de 5 minutos (5 l/min; 10 l/min; 15 l/min; 20 l/min; 25 l/min; 30 l/min; 35 l/min hasta 40 l/min, caudales más altos requieren de más cantidades de material y personal en obra para realizar el procedimiento, lo que volvería inadecuado el procedimiento).

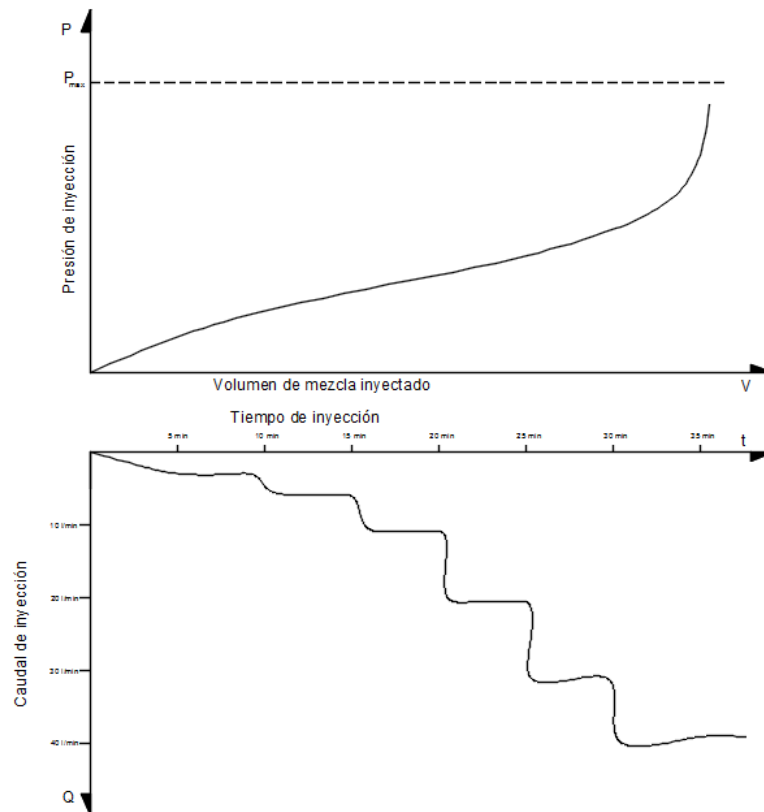


Figura 9.4. Ejemplo típico de la presión de inyección conforme incrementa el caudal.
Fuente del autor.

En la anterior figura se observa como el caudal de inyección va incrementando en periodos de 5 minutos para obtener incrementos suaves en las presiones de inyección. Al final de la curva Presión vs. Volumen se detalla que se alcanza rápidamente la presión máxima establecida con un caudal alto.

- Si durante el incremento de caudal de inyección, se observa el incremento de presión, se debe mantener el mismo caudal hasta que la presión se estabilice, si la presión disminuye se debe incrementar el caudal de mezcla hasta que la presión se estabilice, si al contrario la presión incrementa se debe mantener el caudal hasta obtener la presión máxima establecida.

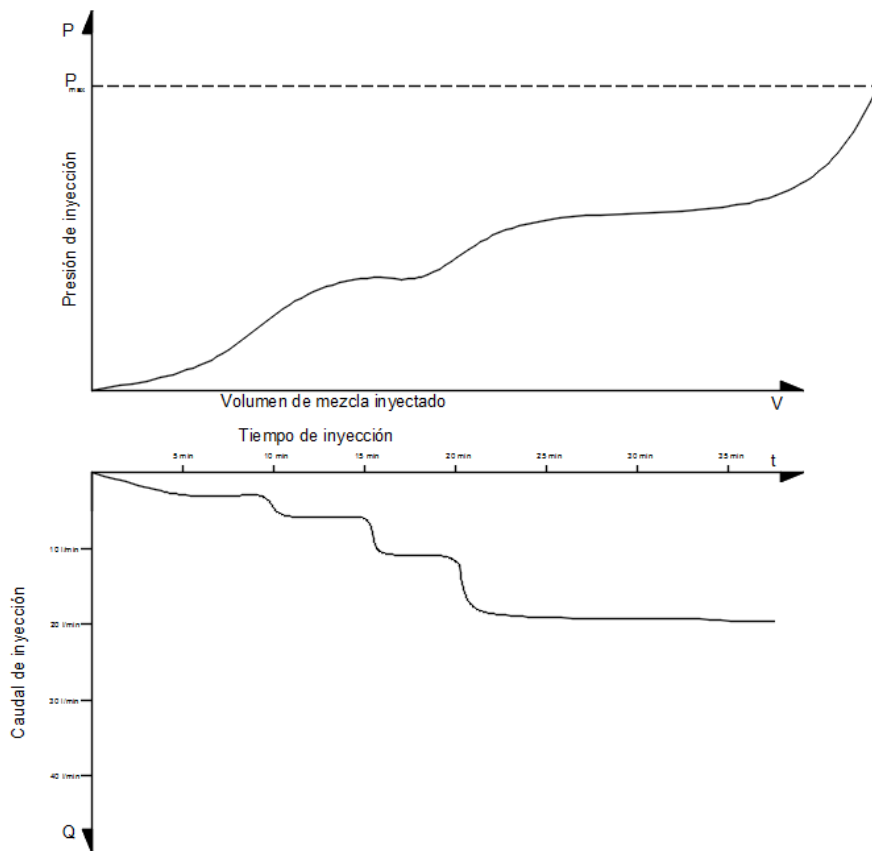


Figura 9.5. Ejemplo del adecuado manejo del caudal de inyección durante el procedimiento de inyección.

Fuente del autor.

En la anterior figura se observa como la presión máxima establecida, se alcanza cuando el caudal de inyección se mantiene cuando se observa un incremento en la presión de inyección. Esto es con el fin de rellenar adecuadamente las discontinuidades y los vacíos del macizo.

- Cuando se realiza el anterior procedimiento y no se observa un incremento de presión, se debe engrosar la mezcla. Véase Figura 9.6

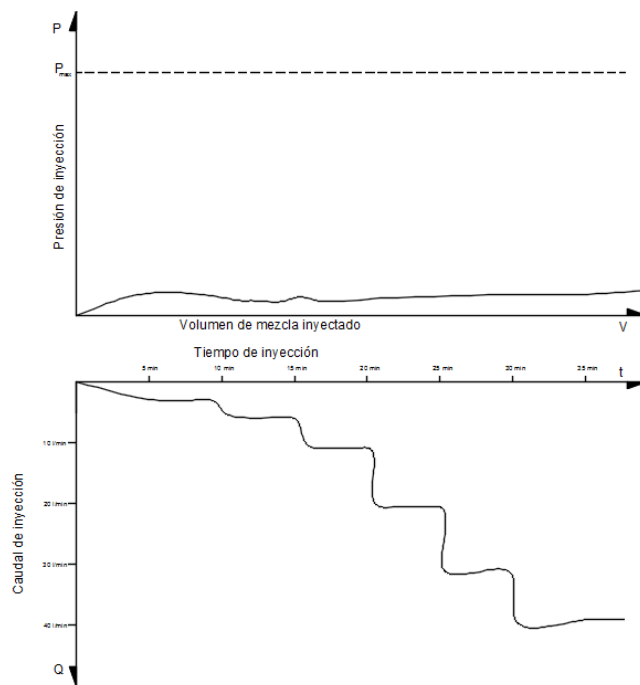


Figura 9.6. Situación donde se requiere engrosar la mezcla base.
Fuente del autor.

En la anterior figura se observa cómo inicia adecuadamente el procedimiento de inyección con el incremento paulatino de caudal. Sin embargo, la presión de inyección no incrementa, por lo tanto, se requiere engrosar la mezcla de inyección.

- El engrosamiento se realiza de la siguiente manera: (1) Si la presión de inyección es menor al 20% de la presión máxima establecida para la etapa o perforación, se debe esperar en inyectar un volumen establecido (1000 a 2000 l) de mezcla para poder engrosar la mezcla; (2) se engrosara la mezcla de inyección cambiando sus propiedades reológicas; (3) se observará si la presión de inyección incrementa, si la presión incrementa o supera el 20% de la presión máxima se debe inyectar hasta lograr la presión máxima, si la presión es menor al 20% se pasará al paso (2) para engrosar la mezcla nuevamente, adicionándole un porcentaje de bentonita; (4) en caso de repetir los pasos (2) y (3), hasta la mezcla más viscosa o “gruesa” del tratamiento y la presión de inyección no supera el 20% de la presión máxima, se debe inyectar un volumen limite 10.000 a 15.000 l y terminar el procedimiento de inyección.

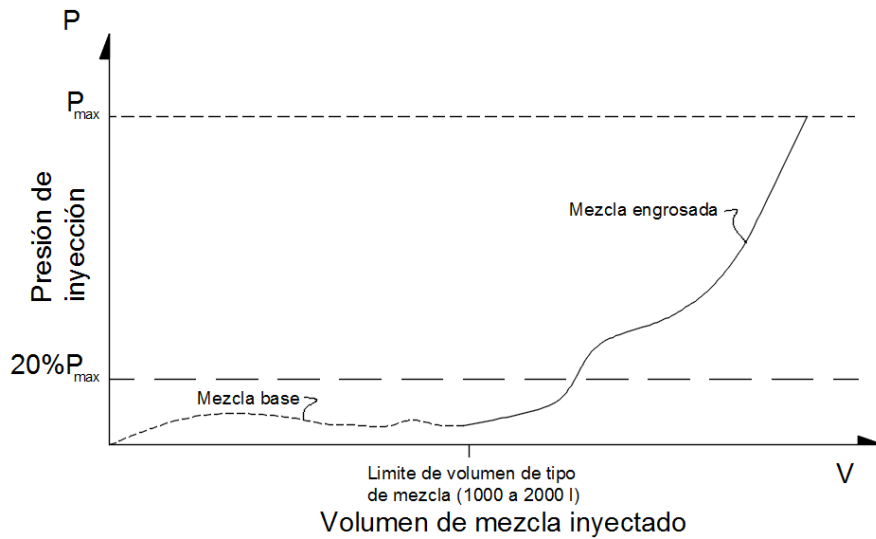


Figura 9.7. Engrosamiento de la mezcla alcanzando la presión máxima establecida.
Fuente del autor.

En la Figura 9.7, se observa que la mezcla base (fluida), no alcanza por lo menos el 20% de la presión máxima, por lo tanto se espera en inyectar un límite de volumen con la mezcla base. Luego se engrosa la mezcla y así se alcanza la presión máxima.

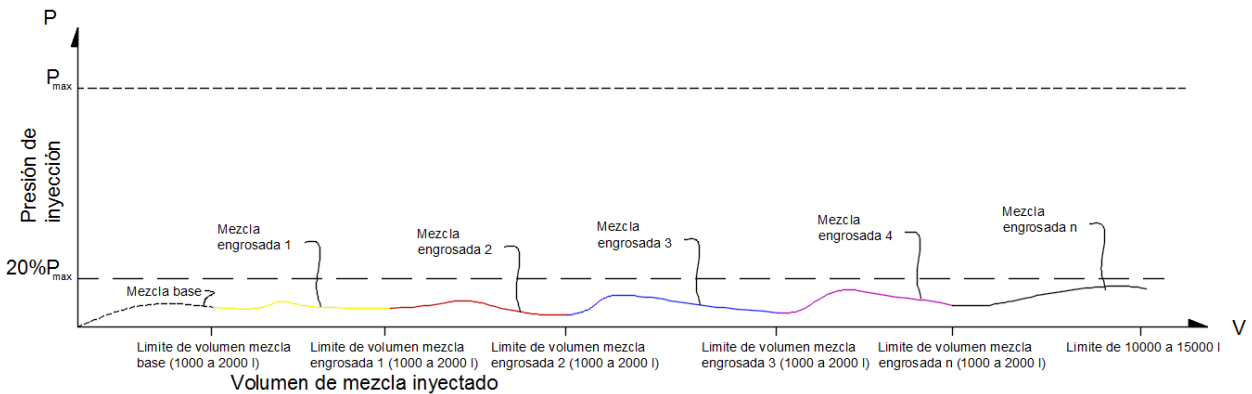


Figura 9.8. Cierre de procedimiento por volumen máximo.
Fuente del autor.

La situación de la anterior figura es inusual, por lo tanto si se llegara a presentar se debe revisar que la mezcla no este saliendo por otro sitio del proyecto, revisar las resurgencias, la comunicación de perforaciones de inyección u otro evento. Al confirmar que no existen tales fugas, existe la posibilidad de que se éste rellenado una oquedad o una discontinuidad muy abierta. Para este caso, se deben realizar

inyecciones adicionales alrededor para verificar que los vacíos fueron llenados adecuadamente.

- Cuando en el paso (3) se supere el 20% de la presión máxima establecida, con cualquier tipo de mezcla base o engrosada, se debe esperar a obtener la presión máxima controlando los caudales de inyección paulatinamente hasta 40 l/min.
- En caso que no se obtenga el cierre por presión máxima con caudales de hasta 40 l/min y se supere el 20% de la presión máxima, para no tener grandes volúmenes inyección, se debe terminar el procedimiento bajando el caudal paulatinamente de cada 5 l/min por periodos de 5 minutos hasta llegar a una tasa de 3 l/min por 5 a 15 minutos, esta terminación del procedimiento es por caudal o tasa de 3 l/min.

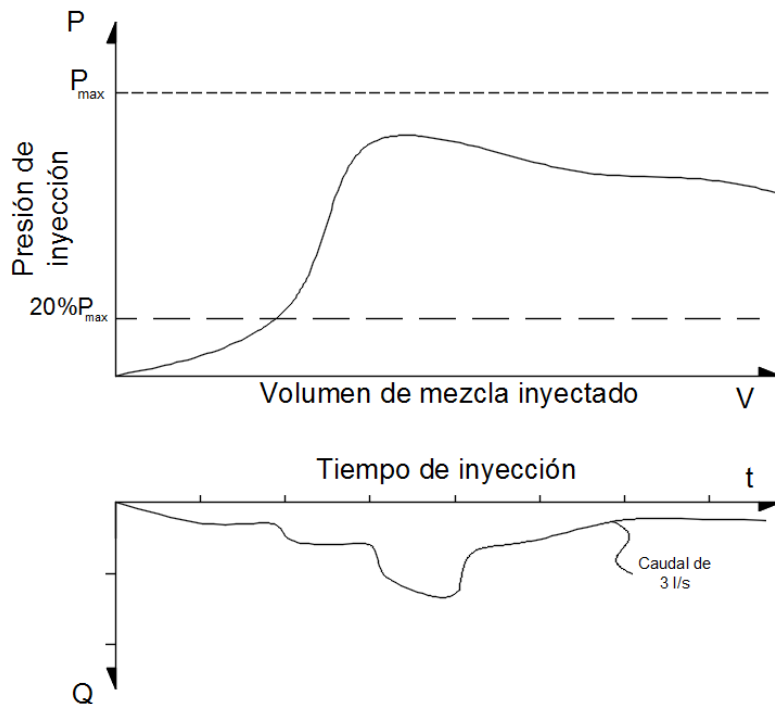


Figura 9.9. Cierre de procedimiento por caudal de 3 l/s.
Fuente del autor.

De la Figura 9.9, se termina el procedimiento de inyección debido a que la mezcla de inyección está recorriendo más allá de lo requerido posiblemente por la apertura de una discontinuidad o la comunicación con una oquedad. Esta situación debe verificarse con inyecciones adicionales.

- Cuando se inyecta con un caudal de 30 l/min y 40 l/min, esto puede ser el indicio del llenado de discontinuidades muy abiertas u oquedades encontradas en el macizo que están siendo rellenadas. El bombeo se logra regulando manualmente la velocidad de la bomba de inyección, observando, en todo momento, el comportamiento de caudal y presión en los equipos automatizados para regular el proceso de inyección.

Como se explicó anteriormente, el procedimiento de inyección por medio del método de engrosamiento sucesivo terminará cuando:

1. Se alcance la presión máxima establecida
2. Cuando no se supere el 20% de la presión máxima, incluso con el tipo de mezcla más viscosa y se limita por el volumen inyectado (10000 a 15000 l).
3. Cuando se supere el 20% de la presión máxima con cualquier tipo de mezcla y no alcance la presión máxima, la terminación debe realizarse bajando caudal de bombeo paulatinamente en periodos de tiempo (5 a 15 min) hasta alcanzar un caudal bajo de 3 l/min.

9.5 COMENTARIOS A LOS METODOS DE INYECCIÓN

9.5.1 Método GIN

El método GIN, proporciona ventajas para el procedimiento de inyección como: el uso de una única mezcla de inyección: el uso de aditivos como los superplastificantes para disminuir las relaciones de A: C; disminución de la viscosidad de la mezcla, así incrementando la penetrabilidad de la mezcla en el macizo; incremento de las resistencia de la mezcla de inyección y por lo tanto de durabilidad; baja exudación de la mezcla; bajo costos de inyección al limitar el recorrido de la mezcla en el macizo; y monitoreo constante durante el procedimiento de inyección.

La mezcla utilizada en el método GIN (mezcla única) y el método de engrosamiento sucesivo (mezcla base) debe tener una relación de A: C entre 0.5: 1 a 0.7: 1, como se ha demostrado en varios tratamientos con inyecciones (Houlsby, 1990), que bajos contenido de agua en la mezcla incrementan la resistencia y por lo tanto su durabilidad.

El método GIN tiene las siguientes limitaciones explicadas por Lombardi (2003):

- El método es una guía para ingenieros sin experiencia en el tema de inyecciones.

- Cuando el método se utiliza o se interpreta inadecuadamente, puede ocurrir en un inadecuado tratamiento.
- Las curvas mostradas en la Figura 9.2, no son aplicables para rellenar oquedades importantes (zonas kársticas) o discontinuidades muy abiertas.
- Las presiones de inyección requeridas por el método, mostradas en la Figura 9.2, ya que son muy altas cuando se utilizan una curva GIN de inyección con energía mayor de 2000 bar.l/m.

9.5.2 Método de engrosamiento sucesivo

El método de engrosamiento sucesivo, ha sido implementado exitosamente en tratamientos explicados por Carter (2003), Carter (2012), Bruce (2014) y Ritchie (2003). Donde el método se ha perfeccionado con las experiencias en diferentes tratamientos y aportando al estado del arte de los tratamientos con inyecciones. Teniendo las siguientes ventajas:

- Las presiones de inyección son acordes a cualquier tipo de roca y no son tan altas para generar un fracturamiento hidráulico pero no son tan bajas para que la mezcla no viaje.
- Los volúmenes de inyección son más altos a los estipulados en el método GIN, garantizando mejores rellenos de vacíos o discontinuidades abiertas. En el método GIN, los volúmenes de inyección están limitados por las curvas de energía conllevando a mayor perforación para llenar los vacíos faltantes.
- La terminación del procedimiento de inyección solo se presenta en tres eventos, los cuales se explican en el numeral 9.4, con criterio ingenieril y toma de decisiones en tiempo real, mientras que en el método GIN la terminación del procedimiento se realiza cuando la presión y el volumen alcanzan la curva de energía establecida previamente de forma automatizada.

9.5.3 Comparaciones entre el método GIN y el método de engrosamiento sucesivo

Las comparaciones entre el método GIN y el método de engrosamiento sucesivo son las siguientes:

- El método de engrosamiento sucesivo sugiere utilizar la tasa de presión descrita por Housby (1990), en la Figura 7.3 se muestran las presiones sugeridas para cada tipo de roca.
- En el método de engrosamiento sucesivo establece un límite de presión de inyección para evitar el fracturamiento del macizo. Mientras que el método GIN puede alcanzar presiones más altas generando posiblemente fracturamiento del macizo.
- Las presiones iniciales del método GIN son altas en las primeras etapas de inyección, o en la superficie del terreno, lo que llevaría a resurgencias de mezcla de inyección en superficie, o al levantamiento de estructuras. En excavaciones subterráneas puede haber resurgencias de mezcla de inyección dentro de la excavación, fracturamiento de revestimientos ya construidos y falla de materiales como blindajes.



Fotografía 9.1. Resurgencias de mezcla de inyección en superficie
Fuente del autor.

- Ambos métodos requieren de capacitación del personal operativo de obra para ejecutar adecuadamente los tratamientos, como se comentó en el numeral 9.3, cuando se utiliza o se interpreta inadecuadamente los métodos, puede ocurrir un inadecuado tratamiento.

- En el método de engrosamiento la mezcla de inyección sobrante se puede inyectar en el macizo, mientras que el método GIN es un proceso automático que termina el proceso con presión y volumen y la mezcla sobrante se dispondrá a botaderos del proyecto, lo cual generaría costos adicionales de transporte y disposición.
- Los volúmenes de inyección en las primeras inyecciones con el método de engrosamiento sucesivo son altos y van disminuyendo conforme se realizan inyecciones adicionales, como se observa en la Figura 3.14. Alcanzando hasta niveles terciarios o cuaternarios para realizar un cierre adecuado del tratamiento en una cortina de inyección.
- En el método GIN puede alcanzar niveles más altos, hasta niveles septenarios, en perforaciones a espacio dividido. Esto sucede por, los primeros tratamientos de inyección no llenan los vacíos lo suficiente al limitar el volumen de inyección, lo cual genera realizar perforaciones adicionales. Por lo tanto, se requieren mayores longitudes de perforación para tratar el macizo rocoso.

Según Carter (2003 y Ritchie (2003), sobre los conceptos del método GIN en el tratamiento ejecutado en la presa de Relaves en la mina de Antamina:

- El método GIN no considera los efectos del caudal de inyección el cual cambia la presión, de tal manera que el volumen inyectado a un valor GIN determinado depende del operador de inyección.
- Con el método GIN no se obtenía el control necesario de inyección en las rocas sedimentarias del proyecto.
- Se detectó fracturamiento hidráulico con presiones muy altas.
- En las pruebas de agua ejecutadas en el macizo luego del tratamiento de inyección con el método GIN, no se observó reducción de permeabilidad ni el cierre de la cortina profunda.
- Con el método se observó que en varias etapas de inyección, la terminación del procedimiento cuando se alcanzaba el límite de volumen establecido, aún con caudales altos de inyección. Generando preocupación por que los vacíos no se estaban llenando adecuadamente.

10. PROGRAMA DE CONSTRUCCIÓN DE CORTINA DE INYECCIONES

10.1 PREPARACIÓN DEL TERRENO

Antes de iniciar los trabajos de perforación e inyección en el macizo rocoso, se debe preparar la superficie o el terreno, para ayudar a optimizar la eficiencia de los trabajos de perforación e inyección, teniendo en cuenta las particularidades del tratamiento. Facilitando el acceso al sitio para ejecutar adecuadamente la perforación y la inyección.

En tratamientos desde superficie, se debe perfilar o regularizar la superficie para ubicar y direccionar las perforaciones para la inyección. En tratamientos desde excavaciones subterráneas, se debe revisar la ubicación de las perforaciones desde el contorno de la excavación, ubicando adecuadamente los cabezales de inyección, en los lugares y ángulos deseados.



Fotografía 10.1. Preparación del terreno para ubicar las perforaciones del tratamiento.
Fuente del autor.

La preparación del terreno debe crear una superficie que facilite el movimiento del equipo de perforación e inyección de un hueco a otro, moviéndose en excavaciones superficiales desde superficies horizontales a superficies inclinadas en estribos laterales. Moviéndose fácilmente en excavaciones subterráneas a través de una solera en concreto o sobre roca competente que resista el paso de los equipos.

10.2 SECUENCIA DE INYECCIÓN

La secuencia de inyección en tratamientos, debe alcanzar el objetivo del tratamiento. Para esto, se debe realizar una secuencia de inyección acorde a las particularidades de cada proyecto para obtener un efectivo tratamiento de inyecciones.

10.2.1 Procedimientos de perforación

Los procedimientos de perforación o métodos de perforación de perforaciones para inyección, se explicaron anteriormente en el numeral 8.1.1. El procedimiento escogido debe ser apropiado para las condiciones geológicas del proyecto y del trabajo a realizar.

Antes de realizar la perforación se deben identificar y marcar adecuadamente en campo las perforaciones planteadas, por medio de pintura en aerosol sobre la superficie o marcados con banderines o estacas de madera. La perforación debe ser ejecutada con la configuración descrita en los diseños con el ángulo y dirección correcta. Se deben tomar todas las medidas preventivas, para que la perforación tenga la menor desviación posible en profundidad y alcance el sitio donde se quiere realizar el tratamiento con las inyecciones.

Dentro de las especificaciones técnicas se debe explicar que toda perforación que se encuentre desviada mayor lo permitido, debe ser remplazada por otra perforación continua sin costo para el cliente. Ya que es una responsabilidad del contratista tomar todas las medidas preventivas para que la perforación tenga la orientación y ángulo correcto.

10.2.2 Perforaciones a espacio dividido

Tal como se explicó en el numeral 3.2.2.4, las perforaciones a espacio dividido se realizan para hacer un adecuado cierre en el procedimiento de inyección. Iniciando el tratamiento con las perforaciones primarias (separadas entre 6 y 12 m), y de acuerdo a las tomas obtenidas se solicitarán perforaciones adicionales para verificar el tratamiento. Así, sucesivamente se realizará el cierre para alcanzar el objetivo del tratamiento.

Durante la ejecución del tratamiento con las perforaciones a espacio dividido, se observarán los datos de las tomas, tomando las decisiones oportunas y optimizar el tratamiento con los datos en tiempo real.

Según Bruce (2007), sugiere que la inyección de una cortina de inyección con perforaciones a espacio dividido, inicie en un perforación primaria y termine con otra perforación primaria.

10.2.3 Inyecciones de consolidación

Las inyecciones de consolidación se realizan en tratamiento para fundaciones de presas, por medio de una serie de perforaciones cortas en serie en un patrón determinado, para tratar inicialmente el macizo rocoso. Estas inyecciones inician con el tratamiento general del macizo rocoso, por lo que no intersectaran la totalidad de las discontinuidades y no llenaran completamente las oquedades encontradas. El tratamiento del macizo se completará cuando se ejecute el tratamiento principal o la cortina central.

Tal como se explicó en el numeral 3.5, las inyecciones de consolidación están dispuestas en filas paralelas a la cortina central o principal. El inicio de las inyecciones de consolidación en fundaciones para presas debe comenzar aguas arriba, aunque se puede iniciar al tiempo con las inyecciones de consolidación aguas abajo del tratamiento principal o central.

10.2.4 Cortina profunda

Luego de terminar las inyecciones de consolidación se inicia la ejecución de la cortina profunda, la cortina central, o el tratamiento principal. La distribución y diseño de la cortina profunda se explica en el numeral 3.2.2, con los criterios de la USACE (2017).

En caso de requerir varias cortinas de inyección en el tratamiento principal, se debe iniciar con la primera cortina aguas arriba y luego con la cortina aguas abajo. El tratamiento inicial ejecutado en la cortina aguas arriba, llenara la mayor parte de los vacíos y formara una barrena para las siguientes cortinas aguas abajo.

Luego de terminar el tratamiento de las cortinas aguas arriba y aguas abajo, se iniciara con el tratamiento de la cortina central, aplicando la mezcla de inyección en los sectores donde las cortinas aguas arriba y abajo no alcanzaron. Esta cortina central será el cierre de la cortina profunda por lo que se debe verificar exhaustivamente, para realizar un cierre adecuado del tratamiento. En caso de no obtener registros adecuados de inyección, en esta cortina central se podrán realizar inyecciones de verificación con orientaciones apropiadas para verificar el cierre del tratamiento.

10.3 TRATAMIENTO EN ZONAS FRACTURADA Y ZONAS DE FALLA

Las zonas fracturadas o zonas de falla, identificadas en la etapa de investigación o durante el tratamiento, se deben tratar o limpiar en superficie, removiendo el material de roca triturado según Bruce (2007), en al menos tres (3) veces el ancho de la zona de falla. La limpieza puede requerir de equipos especializados y mano de obra con suficiente experiencia. Para limpiar las zonas de falla donde los equipos especializados no alcancen, se debe realizar con agua o aire a presión para eliminar o remover la mayor parte de roca triturada o rellenos en las zonas de falla.

Después de retirar el material no deseado a una profundidad adecuada, se deben rellenar con una mezcla inyectada a través de tuberías que llegan a la parte más baja de la zona de falla. Dejando tuberías de inyección y ventilación.



Fotografía 10.2. Cizallas abiertas por tratar con inyecciones desde superficie.
Fuente del autor.



Fotografía 10.3. Cizallas rellenas con mezcla de inyección.
Fuente del autor.

El objetivo de tratar estas zonas de falla antes de iniciar con el tratamiento con inyecciones es minimizar el potencial de fugas de mezcla en la superficie del terreno, evitando la propagación de mezcla a través de la zona fracturada, cerca de la superficie.

10.4 TRATAMIENTO EN ZONAS PARTICULARES

Durante el procedimiento de inyección se pueden encontrar zonas particulares, que deben ser tratadas para obtener un adecuado tratamiento.

10.4.1 Inyección con presencia de agua o flujo de agua

En excavaciones subterráneas se pueden encontrar sectores donde se requiera realizar inyectar con la presencia de flujos de agua. Así mismo, en tratamientos para fundaciones de presas en la zona del lecho de ríos o el valle, pueden encontrar flujos de agua por recarga de acuíferos o acuíferos confinados.

El problema de inyectar en estas condiciones, es que la mezcla de inyección a base de cemento se diluye o se lava por el efecto del flujo de agua, evitando que el tratamiento sea efectivo. Para tratar este problema de lavado de la mezcla, hay que conocer el caudal y presión del flujo y las dimensiones de la abertura por donde sale. Así, se podrá determinar qué medida adecuada tomar para realizar el tratamiento, utilizando aditivos de anti lavado en la mezcla (numeral 6.5.4), o acelerantes para el fraguado rápido de la mezcla, o utilizando otros materiales descritos en los numerales 4.7, 4.9 y 4.10.

10.4.2 Último recurso (relleno de oquedades)

Cuando el procedimiento de inyección con perforaciones a espacio dividido, alcancen niveles de perforación sextantaria y/o septenaria con tomas altas, es posible que se esté inyectando grandes cavidades o cavernas. Para estos casos se debe llenar grandes volúmenes de mezcla, por medio de mezclas de baja viscosidad (numeral 6.3), mezclas de cemento – espuma (numeral 6.5.2) o mezclas de inyección para relleno de oquedades (numeral 6.5.6), para obtener un adecuado llenado de la caverna.

Igualmente, cuando una etapa o perforación está tomando (aceptando) mezcla de inyección con caudales altos sin levantar presión de inyección, se le denominan “tomadores”. Para tratar esta situación se tienen las siguientes opciones sugeridas por Bruce (2007):

Engrosar la mezcla cambiando su reología, es decir reduciendo la relación de A: C u omitiendo aditivos a la mezcla.

Cambiar las características de fraguado de la mezcla de inyección, adicionándole acelerantes.

Aumentar la cohesión o viscosidad de la mezcla adicionándole materiales inertes, tales como: arena, gravas, material reciclado, aserrín y otros.

10.5 ANÁLISIS DE DATOS DE INYECCIÓN

Durante el procedimiento de inyección se deben revisar los datos obtenidos y analizarlos mediante evaluación estadística, que se explica en el numeral 12.6.

Por medio de esta evaluación se tomarán las medidas necesarias para la mejora continua del procedimiento de inyección durante la ejecución del tratamiento. Así mismo, los datos resultantes de diferentes tratamientos ejecutados, servirán para aportar información al estado del arte de las inyecciones.

10.6 OPTIMIZACIÓN DE PROCESO CONSTRUCTIVO

Con el análisis de información de los datos de inyección, se puede realizar optimización del proceso constructivo o mejorar el procedimiento de inyección, durante la ejecución del tratamiento. La toma de decisiones para cambiar diseños o métodos de perforación e inyección, se basarán con el análisis de estos datos, para obtener un adecuado tratamiento de inyección. La optimización del procedimiento constructivo, conlleva a la reducción de cantidades de obra, comparándolas con las estimadas en la etapa de diseño, a cambiar los procedimientos durante la ejecución de las inyecciones, a modificar diseños con el visto bueno de los diseñadores y el cliente y a mejorar continuamente el procedimiento.

10.7 RECOMENDACIONES DURANTE CONSTRUCCIÓN

- Los métodos de inyección que se ejecuten en el tratamiento de inyecciones, deben explicarse con detalle a los operadores para que lo apliquen adecuadamente y así obtener un correcto tratamiento con inyecciones.
- Las perforaciones para las inyecciones deben tener un límite de desviación, para que puedan alcanzar el objetivo general del tratamiento. Para reducir estas desviaciones, se deben tomar las medidas necesarias durante la perforación, por ejemplo modificando un poco la dirección y ángulo de la perforación, para corregir la desviación.
- El cabezal de inyección debe colocarse lo más cerca posible de la boca de la perforación.

- Al principio de la inyección, no se deben aplicar la presión máxima de inmediato, debe realizarse paulatinamente, tal como se explicó en el numeral 9.4.
- Se debe medir el volumen de mezcla en los tanques en intervalos regulares, para que no quede vacío cuando se esté inyectando caudales altos.
- Si durante la perforación e inyección se presenta derrumbe de la perforación, se sugiere realizar inyecciones descendentes (numeral 3.2.3.4). Sin embargo, este método de inyección es demorado por sus rendimientos bajos de perforación.
- En casos donde se requieren rendimientos altos de perforación e inyección, se puede utilizar el sistema de tubo con mangas de orificios múltiples (tubo a manchette).
- En caso de existir comunicación de mezcla de inyección, durante un procedimiento de inyección, en una perforación cercana. Es decir, que existe flujo de mezcla de una perforación a otra. Se deben inyectar ambas perforaciones de manera simultánea lo más rápido posible sin detener el primer procedimiento de inyección, tal como lo muestra la Figura 10.1.

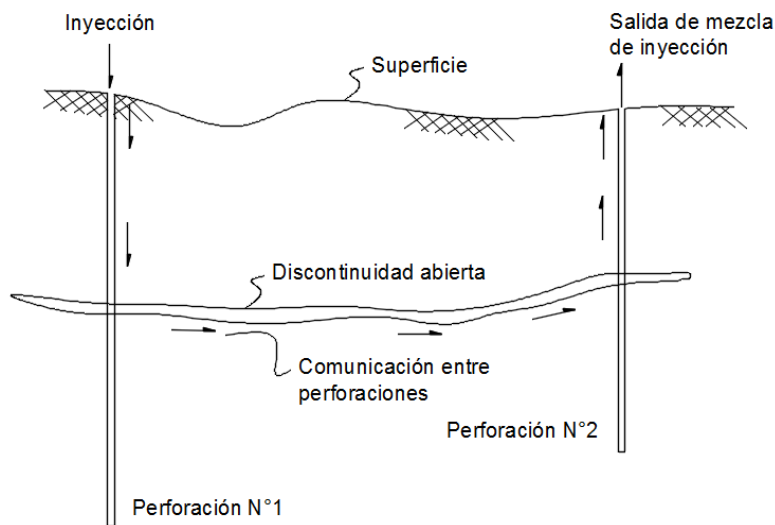


Figura 10.1. Representación esquemática de una conexión de mezcla entre perforaciones.

Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

- En casos de pérdida de agua o aire durante la perforación, la perforación debe detenerse y lavarse, para luego inyectarla y tratar levemente las paredes de la perforación para tener mayor estabilidad. La pérdida de agua o aire, es el indicador de la presencia de fracturas abiertas o de la presencia de una oquedad.

- Cuando se presente flujos con presión artesiana, puede dificultar la inyección de la mezcla. En caso de presentarse esta situación cuando realiza la perforación y tenga presencia de agua con presión, es dejar que el agua drene por el mayor tiempo posible e inyectar después. La inyección debe realizar con presiones que sean más altas que la presión artesiana, sin superar la presión máxima de inyección, para que la presión sea lo más alta posible. En estos casos, se puede utilizar mezclas con aditivos con resistencia al lavado.



Fotografía 10.4. Resurgencias de agua en la perforación por efectos de la presión artesiana

Fuente del autor.

- Cuando se presenten fugas de mezcla en superficie, estas fugas deben “calafatearse” o taponarse con cuñas de madera o con materiales fibrosos. Para evitar altas pérdidas de mezcla. En esta situación, la presión de inyección se debe reducir y el bombeo debe realizarse de forma intermitente durante el proceso de “calafateo”.
- Cuando se observa fuga de mezcla de inyección por la boca de la perforación, es probable que la mezcla se desvió por la misma perforación. En este caso, se debe detener la inyección y soltar el empaque e inyectar agua por la perforación hasta que lave la mezcla inyectada. Si no se realiza este procedimiento la mezcla de inyección fragua en las paredes de la perforación y encima del empaque, provocando una obstrucción y pérdida del empaque y la necesidad de perforar hueco adicional para reemplazar el obstruido.

11. INSPECCIÓN Y SUPERVISIÓN DE TRABAJOS DE PERFORACIÓN E INYECCIÓN

La inspección y supervisión de los proyectos con tratamientos con inyecciones en el mundo, se han realizado bajo la dirección del propietario del proyecto o de un consultor geotécnico del propietario. Mientras que el contratista suministra la mano de obra y los equipos, con facultades y experiencia para realizar los tratamientos. Sin embargo, existen contratistas que no proporcionan los aportes técnicos necesarios o la garantía de ejecutar un tratamiento adecuado. Por esta razón, se debe proporcionar la orientación apropiada al personal de obra para realizar los trabajos de inyección de acuerdo a las prácticas tradicionales.

Teniendo en cuenta que la inspección de los trabajos de perforación e inyección, no dependan de solo los sistemas automatizados de registro de los datos, estos sistemas deben ser usados apropiadamente con el control de personal especializado o con experiencia en el manejo de los datos de perforación e inyección, ya que los sistemas solo recopilan y guardan la información pero no tienen el criterio ingenieril de analizar los datos. El personal especializado maneja adecuadamente los datos generados para la toma de decisiones durante la ejecución de los trabajos de inyección.

El monitoreo de los datos durante la ejecución de los trabajos de inyección conlleva: (1) optimización de los procedimientos de inyección; (2) una compresión rápida de los procedimientos de inyección durante la ejecución; (3) control de los parámetros que influyen en el proceso de inyección y (4) realización de un tratamiento adecuado.

En caso, de no tener el personal especializado durante el procedimiento de inyección, la información debe almacenarse y enviarse periódicamente al personal especializado para que realice una revisión y análisis periódico

11.1 INSPECCIÓN

Los trabajos de inyección requieren de observación, documentación y análisis continuos si se desea alcanzar el objetivo del tratamiento. A menos que, se utilice equipo de monitoreo automatizado, implicando tener un inspector constante en la planta de inyección y un inspector en cada equipo de perforación. Para un tratamiento general con inyecciones, se

deben tener por lo menos cuatro (4) inspectores en el proyecto. Igualmente, debe tener un coordinador de datos para registrar y llevar el control de los registros de los procedimientos de inyección y los registros para pago de los trabajos al contratista.

11.1.1 Inspección de los trabajos de perforación

Los inspectores deben conocer los equipos utilizados para la perforación (numeral 8.1) del tratamiento en el macizo. Ellos son responsables de observar la operación de los equipos de perforación y cualquier otro equipo relacionado en la perforación y son responsables de recopilar y aprobar los registros de perforación. Así mismo, los inspectores deben verificar que la perforación es acorde a los diseños, verificando nomenclatura, dirección, ángulo de perforación, profundidad y verificar las condiciones de la perforación para aprobación y posterior inyección.

En los registros de perforación se debe registrar el nivel de agua encontrado.

Cuando se observen desviaciones en la perforación mayores a las estipuladas en el diseño, estas perforaciones deben reemplazarse para que el tratamiento cumpla adecuadamente con su objetivo.

El inspector debe estar atento a cualquier anomalía en el procedimiento de perforación, como la pérdida de agua o aire, o cuando se pierden barras de perforación. Sospechando de condiciones particulares del macizo. Registrando la profundidad donde se presentó la anomalía y tomando la decisión prudente de ordenar la finalización de la perforación, para tratar las paredes de la perforación.

Al finalizar el procedimiento de perforación, se debe inspeccionar el estado de la perforación por medio del lavado del mismo, hasta que se lave adecuadamente la perforación es cuando se observa que el flujo de agua regresa sin arrastre de material. En caso de lavar una perforación y se observa comunicación entre perforaciones (Figura 10.1), podrá solicitar al contratista continuar con el lavado hasta que no se observe arrastre de material por la perforación inicial.

11.1.2 Inspección de los trabajos de inyección

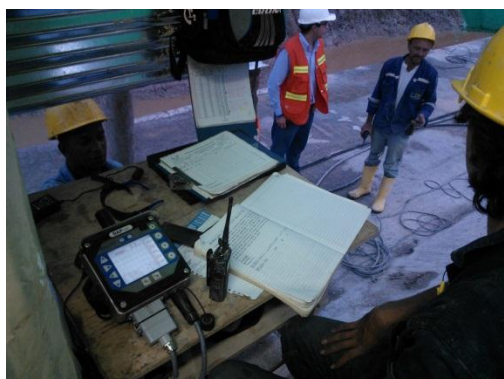
Al igual que el procedimiento de perforación, el inspector debe conocer los equipos utilizados para la inyección (numeral 8.2) y los procedimientos de inyección descritos en el

Capítulo 9. El inspector se encargara de verificar el estado de funcionamiento de los equipos que se utilizaran en el procedimiento de inyección antes de iniciar con los trabajos de inyección y se mantengan y manipulen adecuadamente por parte del contratista. Asimismo, el inspector de inyección debe estar en comunicación constante con los inspectores de perforación y los trabajos de perforación para conocer las situaciones particulares encontradas durante la perforación. El inspector debe tener completamente claro las especificaciones de inyección del proyecto.

11.1.2.1 Preparación del procedimiento de inyección

Antes de iniciar con el procedimiento de inyección, se deben preparar los equipos y el personal en obra, por medio de una lista de verificación, donde se indique las perforaciones que se trataran en el turno y la secuencia de inyección (inyección descendente o inyección ascendente).

Igualmente, antes de iniciar con los trabajos de inyección debe verificarse si las perforaciones continuas a ambos lados ya se encuentran culminadas para iniciar con el procedimiento. También debe verificar que haya los suficientes materiales para la mezcla de inyección, que los tanques mezcladores y agitadores se encuentren libres de grasa, restos de mezcla fraguada y otros materiales extraños, que las líneas de inyección se encuentren en buen estado y conectadas adecuadamente al sistema y que el agitador de mezcla no se encuentre muy lejos del punto de inyección.



Fotografía 11.1. Inspector revisando los procedimientos de inyección.
Fuente del autor.



Fotografía 11.2. Inspector anotando en el libro de obra las novedades encontradas durante los procedimientos de inyección.
Fuente del autor.

El inspector también debe verificar que el cabezal de inyección se encuentre en la posición correcta en la boca de la perforación. Así mismo, el inspector le informara al operador de inyección que los empaques de inyección se encuentren en la etapa correcta o profundidad correcta. También puede solicitar al contratista que se limpien con agua las líneas de inyección si existe alguna duda de que las líneas no se encuentren limpias.

11.1.2.2 Selección de mezclas de inyección

La selección de las mezclas de inyección y los materiales que las componen deben basarse de los datos de pruebas de laboratorio o de pruebas de perforación e inyección en el sitio. El inspector debe contar con los diagramas de flujo o tablas guía para seleccionar la mezcla base o inicial del tratamiento y debe tener claro, según el método de inyección, cuando cambiar los parámetros de la mezcla o cambiar la presión y caudal de inyección, con los datos obtenidos en tiempo real. Estas decisiones inmediatas durante el procedimiento de inyección minimizan la posible obstrucción de discontinuidades muy cerradas, evitar volúmenes excesivos de inyección en caso de tener altas tomas y proporcionar una la mezcla adecuada en cada intervalo de inyección (Método de engrosamiento sucesivo, numeral 9.4).

La mezcla utilizada para el tratamiento que se escogió por medio de ensayos de laboratorio y campo, puede requerir cambio según los datos obtenidos de los primeros tratamientos de inyección.

Por lo tanto, es importante que el inspector de inyección le comunique a los especialistas sobre cualquier anomalía presentada durante los procedimientos realizados, esta comunicación puede ser pasada en observaciones en los registros de inyección o de forma verbal o en el libro de obra.

11.1.2.3 Selección de presión de inyección

Tal como se explicó en el Capítulo 7, las presiones de inyección dependen de las condiciones locales del macizo rocoso, como su resistencia, la frecuencia de discontinuidades y su geometría, la profundidad de la etapa y los resultados de pruebas de permeabilidad. El inspector debe estar pendiente que el contratista aplique la presión de forma gradual y no debe aplicarse repentinamente, controlando el caudal de la mezcla de inyección.

El inspector de inyección debe estar atento cuando inicie el procedimiento de inyección para verificar que se esté utilizando la presión de inyección correcta, que la mezcla de inyección no salga por la boca de la perforación y en sistemas automatizados la información se vea en tiempo real y sea funcional. Así mismo, debe estar pendiente que no existan presiones mayores a las permitidas. En caso de tener tomas y caudales altos con presiones bajas, se debe verificar que no se presenten fugas de mezcla en algún punto de la superficie u otra perforación. Si se produce una fuga en superficie o una comunicación entre perforaciones, el inspector debe solicitarle al contratista que se tomen las medidas correctivas necesarias y registrar en el libro de obra que tipo de medidas se realizaron.

11.1.2.4 Ensayos en campo

De acuerdo a los datos de los primeros procedimientos de inyección, se podrán solicitar pruebas de campo, para observar la presión máxima de inyección que resiste el macizo y se compara con la presión máxima establecida. Con el fin de verificar que los parámetros escogidos sean acordes al sitio de inyección. Igualmente, se deben realizar ensayos en campo (numeral 5.2) como la viscosidad, densidad y exudación de la mezcla en el sitio de inyección. Algunas muestras requieren llevarse a laboratorio para realizar pruebas, tal como la resistencia a la compresión y otras pruebas especializadas (numeral 5.1).

11.2 SUPERVISIÓN

La supervisión de los trabajos de perforación e inyección debe ser realizada por una persona capacitada y con experiencia en tratamiento con inyecciones. Generalmente, esta persona es un ingeniero geólogo o un ingeniero geotecnista, por que la inyección es un proceso exploratorio y se debe comprender las condiciones geológicas del sitio para tener un tratamiento exitoso.

El supervisor debe tener comprensión de los procedimientos básicos de inyección. Sin embargo, puede que el supervisor no pueda identificar todos los posibles problemas en el procedimiento de inyección. Por lo tanto, debe estar asesorado de una persona de mayor experiencia con un conocimiento profundo de la teoría y el estado del arte de las inyecciones y con amplia experiencia en tratamientos realizados en diferentes condiciones geológicas.

Los deberes y responsabilidades del supervisor de inyección son los siguientes:

- Verificar que los equipos, materiales y suministros para la ejecución del tratamiento, se encuentren en su totalidad en el sitio de trabajo y verificar que se encuentren en condiciones operativas necesarias para los trabajos.
- Verificar que todos los sistemas automatizados de inyección se encuentren en buen estado de funcionamiento y estén conectados correctamente a la planta de inyección y al equipo de inyección.
- Reunirse con el personal en obra e inspectores antes del inicio de los tratamientos para: explicarle al equipo de trabajo cual es el trabajo que se ejecutará; explicar que medios de comunicación utilizar durante el procedimiento; explicar la programación del trabajo; aprobar autorizaciones antes de iniciar el tratamiento; aprobar la ubicación del sitio de inyección; explicar cómo llenar los registros de inyección, según las necesidades de la coordinación.
- Asesorar al dueño del proyecto o las personas apropiadas (gerente del proyecto), para seguir un cronograma adecuado en los trabajos de inspección y coordinación.
- Supervisar y capacitar a todo el personal de obra sobre el método de inyección utilizado y el manejo de la información.
- Verificar con el geólogo del proyecto, los mapeos geológicos levantados y que la información sea la adecuada antes de iniciar con las actividades de perforación e inyección en cualquier área nueva de trabajo.
- Revisar constantemente cualquier condición geológica particular en el área de trabajo, para tomar en cuenta si requiere tratamientos adicionales.
- Verificar que los registros de inyección y los planos de obra construida este analizados y archivados de forma completa y adecuada.
- Revisar los resultados de pruebas de permeabilidad, los resultados de los núcleos de roca extraídos, para revisar la efectividad del tratamiento en el sitio y los datos geológicos resultantes de los mapeos geológicos. Para identificar la posibilidad de optimizar el procedimiento de inyección.
- Formular cambios, cuando sea necesario, de los procedimientos de inyección y documentar las razones de los cambios y asesorando y comunicando los cambios a las personas de obra que corresponda.

- Revisar los registros de inyección cuando se presenten tomas altas para determinar si se realizó un adecuado tratamiento.
- Revisar los registros de inyección en las inyecciones finales de cada turno, para verificar que se utilizaron los parámetros de inyección de diseño y si se mantuvo los criterios de rechazo establecidas para el proyecto.
- Revisar que los equipos de registro y control de presión y caudal, funcionen adecuadamente.
- Visitar y observar los procedimientos en el sitio de inyección al menos una vez en cada turno para:
 - Verificar que los procedimientos de perforación e inyección del proyecto, se están realizando de acuerdo con las especificaciones.
 - Interacción con los inspectores de perforación e inyección.
 - Identificar los problemas técnicos y operaciones del sitio de inyección.
 - Evaluar la posibilidad de cambiar cualquier procedimiento de perforación e inyección.
 - Llevar un registro fotográfico de las condiciones de obra y los equipos utilizados para el tratamiento.
- Mantener el contacto con los consultores externos del cliente (board de expertos) para discutir cualquier evento particular en el procedimiento de inyección y mostrar las soluciones propuestas.
- Cuando se realicen las visitas de los consultores externos del cliente, se debe presentar de forma adecuada lo siguiente:
 - Cualquier problema particular encontrado y mostrar la solución propuesta para corregir dicho problema.
 - Cambios en los procedimientos de inyección y las razones de los cambios.
- Informar constantemente al cliente o al gerente del proyecto de cualquier problema o situación presentada durante los tratamientos, que pueden generar cambios en la programación general de obra o en los costos.
- Ordenar al contratista realizar perforaciones adicionales necesarias para obtener información de los problemas observados.

- Documentar adecuadamente todas las ordenes realizadas, ya sean verbales o escritas, y todas las reuniones realizadas con el cliente, el contratista, internas y con los consultores externos.
- Seleccionar las inyecciones de verificación con su ubicación, orientación, ángulos y profundidad para decidir el cierre del tratamiento.

12. CRITERIOS DE CIERRE O TERMINACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INYECCIÓN

El cierre o terminación de los trabajos de inyección es un método observacional de datos obtenidos durante los procedimientos de inyección y las pruebas de permeabilidad realizadas. Siguiendo el criterio de permeabilidad, el criterio de tomas de inyección, el criterio geológico, el criterio de datos de instrumentación, el criterio de evaluación detalla del tratamiento y el criterio de evaluación estadística de los procedimientos de inyección. Estos criterios se explican a continuación.

12.1 CRITERIO DE PERMEABILIDAD

Se realiza con la permeabilidad esperada después de realizar el tratamiento con inyecciones, por medio de la prueba de permeabilidad de Lugeon descrita en el numeral 2.3.4. Donde se espera que la permeabilidad del macizo tenga una permeabilidad de 1 Lugeon (véase Tabla 2.11).

Para cumplir con el criterio sugerido por Lugeon (1976), se deben realizar tratamientos con mezclas de inyección con cementos ultrafino y mezclas de cemento con puzolanas para que puedan penetrar en el macizo y las discontinuidades cerradas. Con el criterio de permeabilidad es necesario realizar ensayos Lugeon a medida que se realice el cierre progresivo del tratamiento (primarias, secundarias, terciarias, etc.) y verificar la reducción de permeabilidad.

Cuando se ejecutan ensayos Lugeon y se observa que la permeabilidad es media a alta, se debe reforzar el tratamiento con inyecciones adicionales y comprobar con las tomas de inyección y nuevos ensayos Lugeon, para verificar que la permeabilidad es la permitida.

12.2 CRITERIO POR TOMAS DE INYECCIÓN

El criterio de cierre por tomas de inyección, se basa en las tomas de sacos por metro inyectados en un tramo o etapa de la perforación, Deere (1976) sugiere un sistema de clasificación de tomas desde tomas muy bajas hasta tomas muy altas. El sistema de clasificación de tomas se muestra en la tabla

Los estándares de cierre basados en tomas de lechada se aplican aritméticamente más fácilmente que los criterios de permeabilidad y se han utilizado ampliamente en lugar de criterios claramente definitivos.

Tabla 12.1. Sistema de clasificación de tomas de inyección.

Clasificación	Toma		Símbolo
	(kg/m)	(sacos/m)*	
Muy baja	0 – 12.5	0 – 0.29	MB
Baja	12.5 – 25	0.29 – 0.58	B
Moderadamente baja	25 – 50	0.58 – 1.17	MeB
Moderada	50 – 100	1.17 – 2.33	M
Moderadamente alta	100 – 200	2.33 – 4.67	MeA
Alta	200 – 400	4.67 – 9.33	A
Muy alta	> 400	> 9.33	MA

*Sacos de 42.85 kg

Adaptado de “*Dam foundation grouting*”. Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

En la anterior tabla se muestra la clasificación de tomas de inyección en un tramo o etapa de inyección, la cual es conveniente utilizar para este criterio y para fines estadísticos.

12.3 CRITERIO GEOLÓGICO

Como se explicó anteriormente el procedimiento de inyección es un procedimiento continuo de exploración del macizo rocoso. Que debe tenerse en cuenta para la toma decisiones. Se deben observar los registros de perforación y resaltar los sitios donde hubo pérdida de agua o aire o el registro de grandes desviaciones, estas condiciones pueden conllevar a condiciones particulares del macizo rocoso.

Igualmente, los registros de tomas de inyección y cierres hasta niveles altos (cuaternario a quinarios), pueden ser un indicativo de sectores particulares que requirieron de grandes volúmenes de inyecciones para su tratamiento.

Sobre lo anterior, las tomas altas en cualquier perforación puede ser el resultado de la intersección de un grupo de discontinuidades o de oquedades que fueron alcanzados por las inyecciones primarias, para este caso es necesario perforar en ambos lados de la perforación y en la misma profundidad de la toma alta para verificar la toma alta. Igualmente, se debe superponer con las secciones geológicas del sector, generadas a partir de los mapeos geológicos en superficie, las perforaciones con recobro y los datos de perforación de las inyecciones.

12.4 CRITERIO DE DATOS DE INSTRUMENTACIÓN EXISTENTE

Con los datos obtenidos del monitoreo de la instrumentación instalada en el sitio (piezómetros y pozos), antes, durante y después de los tratamientos con inyecciones. Se pueden tomar decisiones en tiempo real, por medio del concepto de una persona experimentada en tratamientos y en la observación de los datos de instrumentación y sugerir los cambios apropiados en el procedimiento de inyección.

12.5 CRITERIO POR EVALUACIÓN DETALLADA DEL PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN Y DE LA CORTINA DE INYECCIÓN PARA CIERRE

12.5.1 Verificación por cada perforación

La verificación de cierre por cada perforación, debe realizarse donde se presenten tomas altas y observar si fueron verificadas con perforaciones adicionales en ambos costados de la perforación hasta la profundidad de la toma alta.

12.5.2 Verificación por cortina

El cierre de la cortina se debe realizar según lo explicado en los numerales 3.2.3.6 y 3.2.3.8.

12.5.3 Control de calidad de la mezcla de inyección

El control de calidad de las mezclas utilizadas en los procedimientos de inyección, garantiza que se cumplan con los requisitos técnicos establecidos en el diseño.

Los diseños deben ser adecuados para cumplir con los objetivos del proyecto sin dejar de ser razonable y flexible desde el punto de vista de la ejecución de los trabajos de inyección.

Un factor que influye en el control de calidad es la implementación de un programa de ensayos en campo (numeral 5.2), interpretados por un inspector de inyección para la aprobación de la mezcla de inyección que se utilizara en el procedimiento.

Dentro de los estándares de control de calidad, se deben llevar los registros y los resultados de las pruebas que se utilizaran como fuente de datos para evaluar el procedimiento de inyección durante las etapas de inicio y operación inicial del proyecto.

12.5.3.1 Lista de chequeo

Una lista de chequeo previa a la ejecución de los trabajos de inyección, es una lista detallada para revisar que se cumplan todos los requisitos de las especificaciones y los del proyecto. Esta lista la componen los informes de las pruebas de campo, los resúmenes del personal, los análisis químicos del agua de la mezcla, los registros de calibración de los equipos de inyección y los cronogramas de construcción.

12.5.3.2 Certificados

Las certificaciones son declaraciones del fabricante de los materiales que cumplen con los estándares internacionales de referencia, como las normas ASTM u otras normas estipuladas en las especificaciones del proyecto. También se pueden requerir los certificados de los resultados de los ensayos de laboratorio (numeral 5.1), realizados en las mezclas de inyección. Así como, las certificaciones de la calibración de los equipos de inyección.

Deben requerirse certificados para la calibración de equipos de inyección como los medidores de agua y los manómetros.

12.5.3.3 Registros de inspección

Los registros de inspección son producidos por los inspectores de perforación e inyección y serán los documentos principales que se utilicen para registrar todas las actividades de trabajo asociadas a las operaciones de perforación e inyección.

Estos registros aparte de documentar el cumplimiento de los documentos del contrato, también sirven para verificar las cantidades para pago. Estos registros son la base de datos para ayudar a evaluar las condiciones operativas de perforación e inyección.

Los registros de perforación e inyección, deben mantenerse en dos archivos separados: uno para registrar las actividades de perforación y el otro para registrar el tipo de mezcla utilizada y las operaciones de inyección. Es importante que en estos registros los inspectores registren todos los eventos inusuales presentados durante la perforación e inyección, sin importar que tan triviales parezcan en el momento. Es mejor tener información y nunca usarla que no tener ninguna información y esta se pierde para siempre.

Los registros de inspección se pasan de un inspector a otro, cuando hay cambio de turno. En estos registros se debe anotar la fecha que lo recibió junto con su firma correspondiente. Se debe tener por lo menos dos (2) copias de cada registro de inspección para entregar al final de cada turno.

Esta información se revisa y analiza escrupulosamente a diario, por los supervisores y/o especialistas, que en caso de encontrar alguna anomalía en el proceso de perforación o inyección, puedan modificar el proceso de ser necesario de manera oportuna.

En el ANEXO 2, se muestran ejemplos de los formatos utilizados para la inspección de perforación e inyección.

Informes de perforación

Los informes deben contener como mínimo todas especificaciones técnicas de los equipos a utilizar en la perforación, como el diámetro de perforación, la profundidad de perforación y el espacio entre perforaciones continuas. Se debe mantener un informe por perforación por separado por cada sector u obra donde se realice el tratamiento. Se debe registrar la perforación según la nomenclatura estipulada en los planos de obra, indicando su dirección y ángulo correspondiente.

Informes de inyección

Los informes deben contener como mínimo todas especificaciones técnicas de los equipos y mezclas a utilizar en la inyección, como el tipo de mezcla utilizada, el tiempo de preparación de la mezcla, la presión de inyección, la cantidad de mezcla inyectada en cada etapa o perforación y el tiempo que duro el procedimiento. Al igual que los registros de perforación, se prepara un informe de inyección por separado por cada sector u obra donde se realice y por cada perforación según la nomenclatura estipulada en los planos de obra.

12.5.4 Verificación con inyecciones adicionales

Como se comentó en los anteriores numerales, el cierre adecuado de una cortina de inyección se verificara de acuerdo con las pruebas de permeabilidad, las tomas altas y las condiciones geológicas del sector. Cuando en los anteriores criterios no se verifico el cierre es necesaria la solicitud de inyecciones adicionales para verificar un adecuado

cierre del tratamiento. Por lo tanto, se verificara mediante de perforaciones en ubicaciones seleccionadas dentro del tratamiento con direcciones y ángulos diferentes al tratamiento para alcanzar los sitios donde se quiere verificar los sitios particulares.

Estas inyecciones adicionales por lo menos deben perforarse en los sitios donde se presenten tomas altas de inyección, así como lugares donde se encuentren particularidades en el macizo rocoso, como estratos permeables, discontinuidades abiertas, sitios donde la permeabilidad es alta, entre otras. De ser necesario, en los sectores donde se solicitaron las inyecciones adicionales se realizaran pruebas de permeabilidad para verificar el cierre del tratamiento y perforaciones con recobro para verificar el estado del tratamiento.

12.6 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA PARA EL CIERRE

La evaluación estadística de los datos obtenidos de los procesos de inyección, facilitan la revisión y evaluación de estos. Esta evaluación es aplicable cuando se completan tramos del tratamiento o la totalidad del tratamiento. Los resultados de la evaluación estadística se analizan, para realizar el cierre del tratamiento, también son presentados en informes finales y presentaciones sobre el tratamiento.

A continuación se explican las evaluaciones estadísticas más utilizadas.

12.6.1 Relación de reducción

El cálculo de la relación de reducción es la evaluación estadística más utilizada, para la evaluación de los datos de inyección. Donde se calcula la proporción de tomas de inyección, con las inyecciones secundarias y las de orden superior comparándolas con la toma de las inyecciones primarias o las inyecciones de la secuencia anterior.

Según Bruce (2007), la relación de reducción es solo un indicador general de la probable efectividad del tratamiento con inyecciones.

En la Tabla 12.2, se muestra un ejemplo del análisis de la evaluación estadística de relación de reducción para varias tomas de inyección.

De la tabla se observa que las inyecciones cuaternarias logran un cierre adecuado del tratamiento y que las inyecciones quinarias no eran necesarias para cerrar el tratamiento.

Al observar las etapas de inyección, se detalla que la reducción T/P para la etapa 6.1–9.1 m parece satisfactoria (0.56), se muestra que la relación T/S para la misma etapa (2.0), se entiende que la inyección terciaria tomo el doble que la inyección secundaria. Del mismo modo, se observa una particularidad en la etapa 21.3–24.4 m, donde la relación T/S es de 1.09 y la relación T/P es de 1.97, esto se entiende que las inyecciones secundarias y terciarias tomaron más que la inyección primaria. Esta situación puede ser por el rechazo prematuro en la inyección primaria y la inyección secundaria, probablemente por mala operación del método de inyección, por lo que se llegó a un nivel terciario con una toma alta.

De la misma tabla se observan que se obtienen cierres adecuados hasta niveles terciarios. Sin embargo, al analizar más datos como los descritos anteriormente, revelan que el tratamiento pudo alcanzar mayores volúmenes de inyección en los niveles primarios sin necesidad de alcanzar los niveles cuaternarios y quinarios.

Tabla 12.2. Ejemplo de cálculo de relación de reducción para tomas de inyección.

Etapa (m)	Tomas de inyección (kg/m)					Relación de reducción				
	P	S	T	C	Q	S/P	T/S	T/P	C/T	Q/P
0.9 - 3.0	324	208	60	18	8	0,64	0,29	0,19	0,30	0,06
3.0 - 6.1	87	94	48	13	8	1,08	0,51	0,55	0,27	0,15
6.1 - 9.1	150	42	84	14	8	0,28	2,00	0,56	0,17	0,09
9.1 - 12.2	143	428	71	27	8	2,99	0,17	0,50	0,38	0,19
0.9 - 12.2	164	192	66	18	8	1,17	0,34	0,40	0,27	0,11
12.2 - 15.2	102	64	20	17	4	0,63	0,31	0,20	0,85	0,17
15.2 - 18.3	55	38	28	14	4	0,69	0,74	0,51	0,50	0,25
18.3 - 21.3	38	39	31	14	4	1,03	0,79	0,82	0,45	0,37
21.3 - 24.4	43	78	85	20	-	1,81	1,09	1,98	0,24	0,47
12.2 - 24.4	63	53	35	15	4	0,84	0,66	0,56	0,43	0,24
0.9 - 24.4	117	130	60	17	7	1,11	0,46	0,51	0,28	0,15

P: Primarias; S: Secundarias; T: Terciarias; C: Cuaternarias y Q: Quinarias
Adaptado de "Dam foundation grouting". Weave, Kenneth D. Bruce D. A. (2007).

12.6.2 Histogramas de distribución de frecuencia

Los histogramas de distribución de frecuencia son los más utilizados, por ser una salida grafica fácil de entender, elaborando histogramas de distribución basándose en las tomas de inyección en cada nivel de inyección. Estos histogramas son útiles para poder comparar gráficamente cada nivel de inyección y comparar entre diferentes áreas, zonas particulares del macizo rocoso y todo el tratamiento.

En la Figura 12.1, se muestra un ejemplo del uso de los histogramas de distribución. La elaboración de esta figura es basado de la información de las tomas del ejemplo mostrado en la Tabla 12.2.

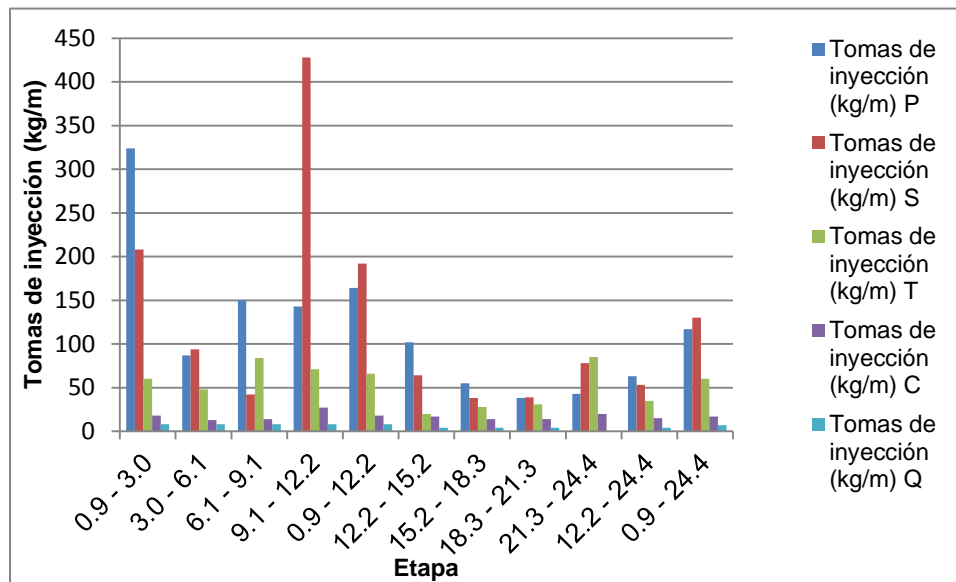


Figura 12.1. Ejemplo de histograma para diferentes tomas de inyección
Fuente del autor.

De la anterior figura se resalta una alta toma de inyección en la etapa 9.1–12.2 m, en un nivel secundario, esto puede ser el indicativo de una particularidad encontrada en el macizo rocoso que se le debe prestar atención. Así mismo, se observa que en la etapa 21.3–21.4 m, se tiene una toma a nivel terciario mayor que la toma a nivel primario.

Con los histogramas es fácil observar las particularidades, como las anteriores, y con estos datos tomar decisiones oportunas durante la ejecución de los tratamientos.

12.6.3 Perfiles de permeabilidad

Con los resultados de los ensayos de permeabilidad en el macizo rocoso antes, durante y después de los tratamientos con inyecciones, se elaboran perfiles gráficos detallando la ubicación de las perforaciones donde se ejecutaron los ensayos, la profundidad donde se realizaron y el valor de permeabilidad medido. En estos perfiles se visualizan las condiciones de permeabilidad del macizo rocoso, antes, durante y después del tratamiento. Brindando la oportunidad de evaluar la efectividad del tratamiento.

En el ANEXO 3 se detalla un perfil de permeabilidad, comparado con una sección geológica y las tomas de mezcla.

12.7 EVALUACIÓN DETALLADA

Los procedimientos descritos anteriormente, para ordenar la terminación o el cierre de los trabajos de inyección deben ser complementados con una evaluación detallada de todo el procedimiento de inyección. Analizando los procedimientos de las tomas bajas de inyección, pueden ocurrir por las siguientes razones:

- Ausencia de discontinuidades abiertas para ser tratadas:
Esta situación se puede identificar por medio de los mapeos geológicos y la información de perforaciones con recobro.
- Discontinuidades obstruidas por un procedimiento deficiente de perforación:
Se identifica cuando se tienen buenos registros de perforación.
- Obstrucción prematura de las partículas de la mezcla en discontinuidades muy cerradas:
Se identifica cuando se observa una repentina disminución en el caudal de inyección, por eso es importante de tener registros detallados para observar dicha situación.
- El uso de mezclas de inyección muy viscosas:
Esta situación se puede presentar cuando hay un cambio de la mezcla o cambio en las propiedades de la mezcla base, y se disminuye repentinamente el caudal de inyección. Probablemente por una inadecuada dosificación de mezcla.
- Que el agua de la mezcla de inyección sea absorbida por un macizo rocoso muy seco o poroso:
Se presenta cuando se inyecta mezcla en una roca sedimentaria seca o cualquier tipo de roca está seca.
- La presión de inyección sea demasiado baja para el tratamiento.

Esta situación se puede presentar cuando se tienen presiones artesianas en la perforación y hay que superar dicha presión. También se presenta esta situación, cuando existe la presencia de discontinuidades muy abiertas y se inyectan con presiones altas obstruyendo rápidamente la discontinuidad.

- Que los equipos de inyección, como el cabezal de inyección, las líneas de inyección o el empaque se obstruyan:

La obstrucción de los equipos de inyección es común cuando se inyecta a caudales bajos durante mucho tiempo. Entonces la mezcla tiende a acumularse gradualmente en las líneas de inyección, el cabezal de inyección y eventualmente se cierra el flujo de inyección.

- El colapso de las paredes de las discontinuidades debido al aumento de presión de poros después de ejecutar pruebas de permeabilidad:

Es posible en rocas muy fracturadas y de resistencia baja, esta situación se puede sospechar cuando la tasa de perforación es alta y se producen cortes grandes en la perforación. Igualmente, cuando los resultados de las tomas son bajas y los resultados de las pruebas de permeabilidad son altos.

- El colapso de las paredes de la perforación antes o durante el procedimiento de inyección:

El colapso es identificable en los registros de perforación, cuando el inspector registra la dificultades en la recuperación de las brocas al fondo de la perforación.

- Contaminación de la perforación por materiales arrojados en superficie.

Revisar si la perforación se encuentra en una depresión topográfica, facilitando la acumulación de material de las laderas hacia la perforación abierta. Esta situación se evita protegiendo la boca de la perforación para evitar la caída de material hacia la perforación.

- Se detenga el suministro de mezcla durante el procedimiento de inyección:

La interrupción del suministro de mezcla de inyección, debe estar registrada en los registros de inyección. Al pasar esta situación es probable que el tratamiento sea deficiente en esa perforación, por lo que, se debe realizar otra inyección continuar con el tratamiento.

- Se haya superado el tiempo de fraguado inicial de la mezcla, por lo tanto se pierden las propiedades reológicas de la mezcla y no se tiene un tratamiento adecuado:
Para evitar esta situación debe verificarse el momento en que se inyecta la mezcla en la etapa o perforación, el tiempo sea el adecuado para la utilización de la mezcla en el procedimiento. Se pueden realizar ensayos de campo en la boca de la inyección para verificar las propiedades reológicas de la mezcla cumple con las condiciones necesarias.
- Debido a las altas presiones se pierda el agua de la mezcla y por lo tanto se cambian las propiedades reológicas de la mezcla:
Cuando se inyecta a altas presiones se debe formular una mezcla de inyección que tenga resistencia a estas presiones sin tener la pérdida de agua.
- Discontinuidades rellenas de arcilla o de otros materiales que no permiten que la mezcla penetre en ellas:
La posibilidad de tener rellenos arcillosos en las discontinuidades, se identifican en los mapeos geológicos en superficie y en las obras subterráneas, las cuales deben tenerse en cuenta en los diseños.
- La dificultad de inyectar muchas discontinuidades cerradas:
Esta situación se verifica con pruebas de agua a presión para observar si un flujo laminar continuo con presiones altas, es un indicativo de discontinuidades cerradas.

La evaluación detallada debe incluir la evaluación estadística de relaciones de distribución relevante y relacionada con las características geológicas mapeadas.

Se deben evaluar los datos de los piezómetros, los caudales de las fuentes hídricas cercanas, el estado del agua y su pH y realizar pruebas con trazadores (numeral 2.6.1.3).

Estos procedimientos ayudarán a seleccionar de inyecciones complementarias en caso de ser requeridas, con las ubicaciones, dirección y ángulos óptimos para verificar sectores donde podrían pasarse por alto características geológicas en el tratamiento ejecutado.

12.8 EVALUACIÓN FINAL

La evaluación final del tratamiento, para el caso de tratamientos de fundaciones de presas es el llenado del embalse y el monitoreo continuo de las mediciones de infiltración del macizo rocoso, por lo tanto es la prueba definitiva. En el caso de excavaciones subterráneas, es la operación de la excavación observando y registrando los caudales de infiltración y la estabilidad de la excavación.

Dependiendo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas y las condiciones de calidad e integridad del tratamiento, las filtraciones pueden continuar con el tiempo hasta alcanzar un punto de equilibrio. Estas filtraciones requieren de un monitoreo constante ya que pueden ser un indicador de la efectividad del tratamiento con inyecciones.

13. CASOS HISTÓRICOS

13.1 CASOS HISTÓRICOS DEL USO DE TRATAMIENTOS DE INYECCIÓN PARA PRESAS

13.1.1 Central Hidroeléctrica El Quimbo

La central Hidroeléctrica El Quimbo (CHEQ), se encuentra localizado al sur del departamento del Huila, sobre valle superior del río Magdalena, aproximadamente 1,3 km aguas arriba de la confluencia con el río Páez en jurisdicción del municipio de Gigante. Una de las obras que conforman la central es la presa con una altura de 151 m y del tipo CFRD fundada sobre rocas de la formación Gualanday Superior (Tgs) del terciario.



Fotografía 13.1. Presa CFRD El Quimbo.
Tomado de “Periódico la buena energía de El Quimbo”. ENEL, 2019

El tratamiento con inyecciones requerido para la fundación de la presa principal en cara de concreto, en (4) galerías de inyección y drenaje, dos (2) por cada estribo, en el estribo derecho de la presa en la zona del vertedero, en la fundación del dique auxiliar, inyecciones radiales en el tapón de cierre del túnel de desvío e inyecciones radiales en el tapón de cierre de la ventana de construcción 1 del túnel de desvío, en la estructura de concreto ubicada en el portal de entrada del túnel de desvío, inyecciones radiales en la zona blindada del túnel de la descarga de fondo e inyecciones radiales en los túneles de carga.

En la Figura 13.1, se observa la distribución de las inyecciones realizadas en la CHEQ en el perímetro de la fundación de la presa CFRD y hacia ambos estribos izquierdo y

derecho respectivamente. El objetivo principal de los tratamientos con inyecciones fue llenar adecuadamente las discontinuidades que se presentaron abiertas, en la zona de fundación de la presa y del dique auxiliar. Con dicho tratamiento se buscó reducir la permeabilidad de la masa de roca y reducir el gradiente hidráulico hacia aguas abajo del eje de la presa y así proteger las laderas y la zona de casa de máquinas. Para lograr lo anterior, el tratamiento con inyecciones se complementó a través de galerías ubicadas en dos niveles en ambos estribos.

Debido a que, la presa está ubicada en la formación Gualanday Superior (Ths) del Terciario, la cual está constituida principalmente por estratos de areniscas y conglomerados fiables y algunas intercalaciones de estratos delgados de limolitas arcillosas fue necesario aplicar lo expresado anteriormente.

De acuerdo con los resultados de los ensayos de agua a presión (INGETEC, 2009) en la etapa de exploración y los resultado de los ensayos de permeabilidad durante los tratamientos (INGETEC, 2014), indicaron que el macizo tuvo absorciones muy bajas a medias, por lo tanto no fue necesario extender o aumentar los tratamientos con inyecciones.

El objetivo de los tratamientos en las obras subterráneas del proyecto, fue el mismo de llenar las discontinuidades abiertas y reducir el gradiente hidráulico hacia aguas abajo por efectos de la presión hidrostática del agua del embalse.



Fotografía 13.2. Presa y obras en el estribo derecho de la presa El Quimbo.
Fuente del autor

Así mismo, se construyó una cortina profunda en la zona del estribo derecho de la presa, como se detalla en la Figura 13.1. Esta cortina profunda se distribuyó en inyecciones desde superficie e inyecciones desde niveles inferiores en dos galerías inferiores, esto con el fin de crear un tratamiento que redujera los gradientes y las filtraciones hacia la casa de máquinas que se encuentra en el mismo estribo aguas abajo del embalse.

El método de inyección utilizado en el tratamiento fue, el del engrosamiento sucesivo (numeral 9.4), debido a la experiencia del consultor del proyecto en tratamientos para fundaciones para presas CFRD en rocas sedimentarias (Ritchie, 2003), donde se empleó el método exitosamente.

La mezcla base utilizada en los tratamientos del macizo rocoso, fue una mezcla a base de cemento con relaciones A: C bajas, tal como se detalló en la Figura 6.1, se obtienen resistencias altas y durable a largo plazo, evitando el fenómeno de disolución (*leaching*) de los tratamientos. Esta mezcla base rica en cemento fue estable con la adición de superplastificantes (Figura 4.10), que permitieron su fluidez y estabilidad durante el tratamiento y mantuvieron la resistencia alta. Esta mezcla base se engrosaba, como se explicó en el numeral 9.4, cuando el procedimiento del proyecto lo requería, así la mezcla no recorría o “viajaba” más de lo necesario.

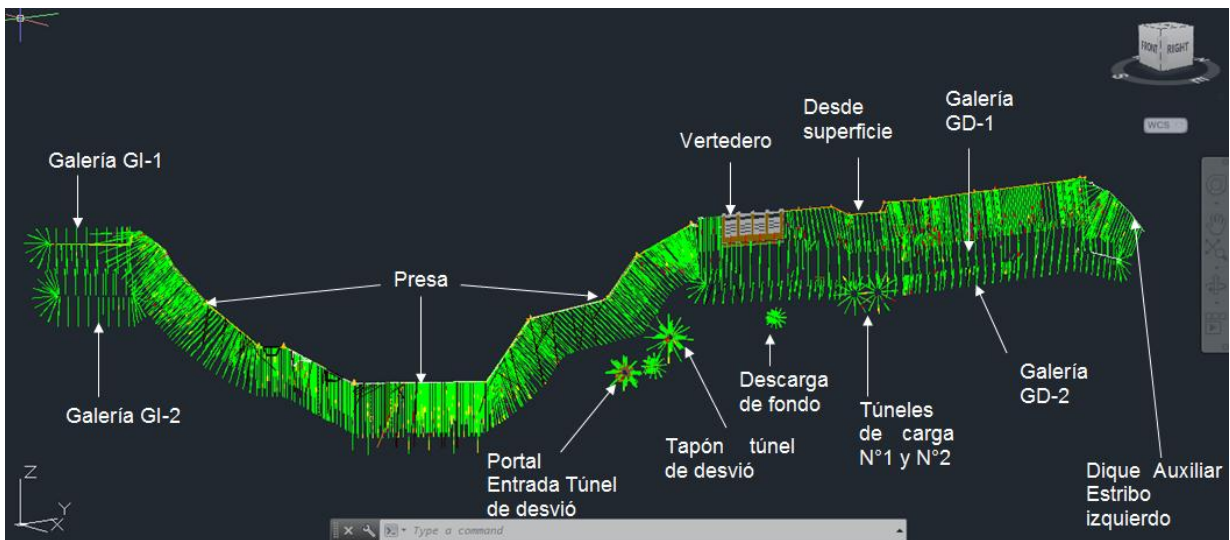


Figura 13.1. Vista isométrica de la distribución del tratamiento con inyecciones en CHEQ. Fuente del autor. Experiencia del tratamiento con inyecciones en CHEQ.

De esa forma, se diseñaron y se realizaron ensayos con varias mezclas base con diferentes relaciones de A: C (0.5: 1 a 0.7: 1), con cementos finos y diferentes porcentaje de superplastificante y adiciones de bentonita, para obtener las diferentes mezclas ideales para el proyecto. Estas debían tener una buena penetrabilidad y estabilidad, cuyo resultado de los diferentes ensayos se muestra en la Tabla 13.1.

Tabla 13.1. Tipos de mezclas utilizadas en el tratamiento con inyecciones en CHEQ.

Distribución de mezclas para las inyecciones utilizando el método de engrosamiento sucesivo				
Mezcla	Relación A/C	Aditivo (%) Sikaplast 4000	Bentonita (%)	Viscosidad (s)
Agua	-	-	-	28
A	0,65 : 1,00	1,0	-	34
B	0,65 : 1,00	0,5	-	36
C	0,65 : 1,00	-	-	39
D	0,65 : 1,00	-	0,2	48 / 51
E	0,65 : 1,00	-	0,4	49 / 52
F	0,65 : 1,00	-	0,6	52 / 53

Fuente del autor. Experiencia del tratamiento con inyecciones en CHEQ.

La anterior tabla fue utilizada como base para la fabricación de las mezclas en las plantas estacionarias, modulares y pequeñas, durante el tratamiento.

En la Tabla 13.2, se muestran los resultados promedio de los ensayos en campo (numeral 5.2), para control de calidad de la mezcla utilizada:

Tabla 13.2. Resultados promedio los ensayos ejecutados en campo.

Promedio	Mezcla A	Mezcla B	Mezcla C	Mezcla D	Mezcla E	Mezcla F
Viscosidad (s)	34,6	36,6	38,8	45,5	-	-
Exudación (%)	2%	2%	2%	-	-	-

Fuente del autor. Experiencia del tratamiento con inyecciones en CHEQ.

De la anterior tabla se concluyó que se utilizó para el tratamiento una mezcla base (Tipo A) fluida, que cumplió el rango establecido en el diseño. Igualmente, las mezclas engrosadas (Tipo B, C y D) estuvieron dentro del rango establecido en el diseño. Se observó que la exudación de las mezclas utilizadas fueron bajas (< 5%), por lo tanto fueron mezclas estables sin pérdida de porcentajes altos de agua de la mezcla.

El criterio de cierre de las inyecciones del tratamiento se definió en términos de consumo de sacos de cemento, asumiendo la buena práctica para este tipo de macizo rocoso (rocas sedimentarias), como una toma alta de un (1) sacos de cemento de 49.85 kg por

metro de etapa inyectada (1.0 saco/m). Es decir, que para dar cierre a un tramo se solicitaron perforaciones adicionales hasta obtener tomas menores a un (1) saco por metro. También se solicitaron, tratamientos dirigidos para tratar sitios con particularidades geológicas, como fueron algunas discontinuidades abiertas y zonas de falla o cizallas.

Para cumplir con el criterio de cierre del tratamiento, se perforaron aproximadamente 72.000 m y se inyectaron aproximadamente 40.120 sacos de cemento de 50 kg. En la Figura 13.2, se muestra la distribución de las cantidades del tratamiento, según los niveles de perforaciones a espacio dividido (numeral 3.2.3.6).

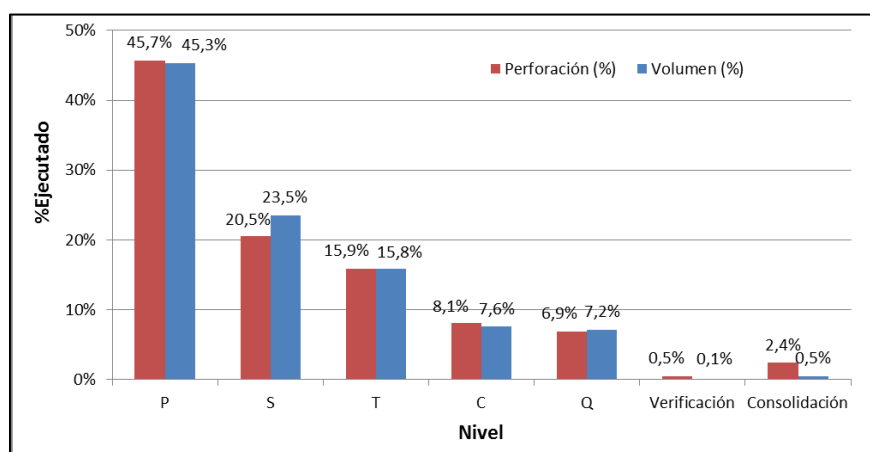


Figura 13.2. Proporción de inyecciones ejecutadas según el nivel de inyección.
P: Primarias; S: Secundarias; T: Terciarias; C: Cuaternarias y Q: Quinarias
Fuente del autor. Experiencia del tratamiento con inyecciones en CHEQ.

De la anterior figura, se observa una evaluación estadística con histogramas de distribución (numeral 12.6.2), donde las perforaciones primarias obtuvieron un 45.3% del volumen de las tomas, llenando las discontinuidades abiertas y oquedades en una primera fase. También, se detalla la disminución de cantidades conforme se ejecutaba el cierre con los siguientes niveles de inyección (Secundarias, terciarias, cuaternarias y quinarias).

Con los anteriores datos de perforación y tomas, se obtuvo para el tratamiento en el macizo rocoso, una toma promedio de 0.57 sacos/m.

Como el criterio de cierre del tratamiento era con el criterio de toma, se adoptó la tabla sugerida por Deere (1976), explicada en el numeral 12.2. Para el tratamiento se establecieron unos límites de tomas diferenciadas por colores, para facilitar la

interpretación del cierre de forma grafica. Los límites fueron: tomas bajas entre 0-1 sacos/m (color verde), una toma media entre 1-2 sacos/m (color amarillo), una toma alta entre 2-4 sacos/m (color morado) y una toma muy alta mayor a 4 sacos/m (color rojo). En la Figura 13.3, se detalla la totalidad de las cantidades de perforación e inyección distribuidas en límites de tomas de inyección.

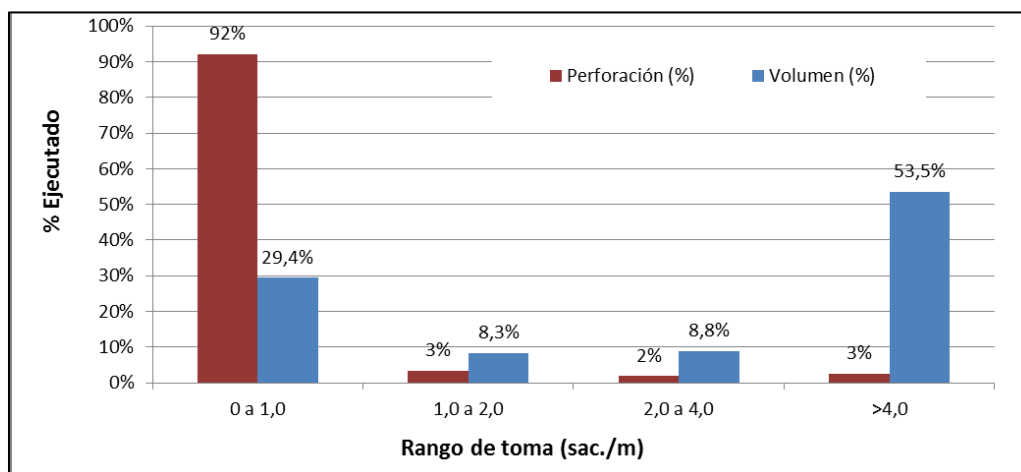


Figura 13.3. Proporción de tomas de inyección del tratamiento.
Fuente del autor.

De la anterior figura, se entiende que las tomas muy altas (>4.0 sacos/m) tomaron un volumen de 53.5% del tratamiento y para esto se requirió perforar solo 3% de la totalidad de perforación. Mientras que el resto las tomas (bajas, medias y altas) se perforo el 97% para alcanzar el 46.5% del volumen de mezcla inyectado. Con estos resultados de tomas se cumplió el criterio de cierre de tomas y el objetivo de rellenar adecuadamente los sitios particulares donde se obtuvieron tomas muy altas.

Igualmente, para realizar el cierre del tratamiento se verificó en detalle la información de los resultados de los ensayos de agua a presión ejecutados, las condiciones geológicas particulares interpretadas por los mapeos geológicos levantados en superficie, los mapeos desde las galerías y túneles y las perforaciones exploratorias realizadas durante el tratamiento. También, se revisaron detalladamente todos los procedimientos de inyección, especialmente donde se tuvieron tomas altas y muy altas, los resultados de los ensayos de campo y laboratorio y los resultados de la instrumentación instalada en el proyecto.

Donde se observaron condiciones particulares, se ejecutaron inyecciones de verificación para comprobar por medio de las tomas la efectividad del tratamiento, como se observa en la Figura 13.2, las inyecciones de verificación fueron un 0.5% de perforación y un 0.1% de volumen de mezcla inyectado.

Con estos tratamientos ejecutados en el macizo, se observa en la instrumentación instalada en CHEQ que los gradientes hidráulicos aguas abajo se reducen por efectos de estos tratamientos.

En la Figura 13.4, se observa una sección transversal del estribo derecho de la presa CFRD, donde se ubican las dos galerías de inyección en diferentes niveles, los tratamientos realizados desde ellas y desde superficie y la instrumentación instalada en el sitio. Los niveles piezométricos registran una disminución del gradiente hidráulico hacia aguas abajo del tratamiento, verificando así la efectividad del tratamiento en el macizo rocoso.

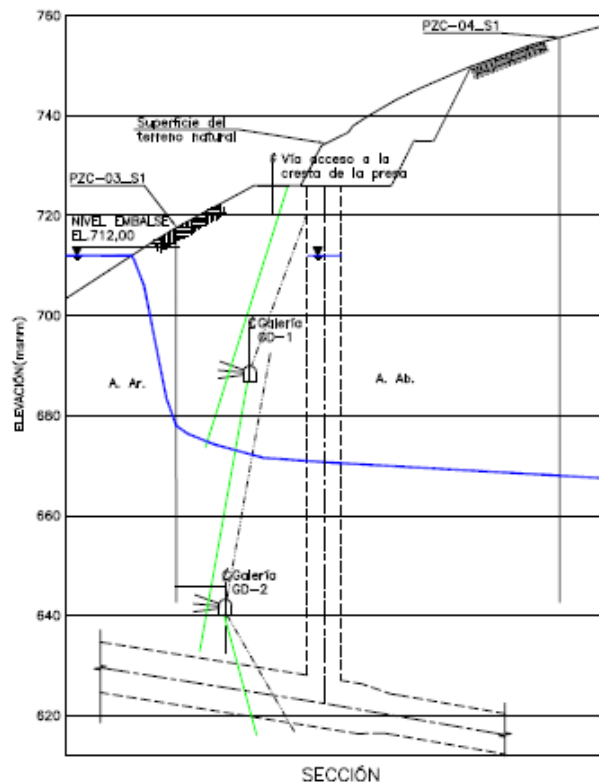


Figura 13.4. Disminución de la presión hidrostática, observada en la instrumentación instalada.

Fuente del autor.

13.1.2 Central Hidroeléctrica Porce III

La Central Hidroeléctrica Porce III se ubica en la jurisdicción de los municipios de Amalfi, Guadalupe, Gómez Plata y Anorí, en el Nordeste de Antioquia. Forma parte de la cadena de aprovechamiento del río Porce (EPM, 2019). Una de las obras civiles que conforman la central es la presa Porce III, que tiene 148 m de altura y es del tipo CFRD, la presa está apoyada sobre un macizo rocoso de origen metamórfico de la unidad de esquistos (Pes), esquistos cuarzo grafitos (Pesgr) y esquistos cuarzosos (Pesqz). (EPM, 2012).



Fotografía 13.3. Presa CFRD Porce III.
Tomado de “Descripción de obras Porce III”. EPM, 2019

El tratamiento con inyecciones para la fundación de la presa principal en cara de concreto, en sus estribos derecho e izquierdo y en la zona central del valle del río Porce, inyecciones por la fundación de la estructura de control del vertedero, la pared izquierda del canal de aproximación del vertedero, inyecciones radiales desde el túnel de conducción, inyecciones radiales en el tapón de cierre del túnel de desviación, en la estructura de concreto ubicada en el portal de entrada del túnel de desvío e inyecciones radiales en la zona blindada del túnel de la descarga de fondo.

En la Figura 13.5, se observa la distribución de los tratamientos realizados en la presa, bajo el vertedero, el túnel de desvío y el túnel de descarga de fondo. El objetivo del tratamiento con inyecciones en la fundación de la presa, fue el llenado de las discontinuidades abiertas, cizallas, zonas de falla u otras particularidades geológicas encontradas durante construcción de la presa. Igualmente, se deseaba reducir el

gradiente hidráulico creado por el embalse durante operación hacia aguas abajo del eje de presa.

Para los tratamientos en la fundación de la presa de Porce III, se aceptó una permeabilidad final de 4 Lugeon (5×10^{-5} cm/s), con los tratamientos con inyecciones y verificados con ensayos de agua a presión (EPM, 2012) en los sectores donde finalizaba el tratamiento. Con este valor de permeabilidad se pudieron reducir filtraciones de agua hacia aguas abajo del embalse, que no afectaron la generación de energía por la capacidad de agua almacenada en el embalse en el año.

El criterio de cierre de los tratamientos con inyecciones se definió en términos de consumo de sacos de cemento y con permeabilidades de hasta 4 Lugeon (5×10^{-5} cm/s). Este criterio se adoptó en Porce III, siguiendo la buena práctica utilizada en la ejecución de grandes presas, como la Presa Alberto-Lleras en Guavio y la Presa de San Rafael. Se realizaba el cierre cuando las inyecciones a espacio dividido alcanzaban tomas menores a un (1) saco de cemento por metro de etapa o perforación inyectada.

Para la aceptación de un sector del tratamiento de la fundación de la presa, se revisó hasta obtener un cierre con tomas menores de 1 saco/m y cuando alcanzaba este criterio se solicitaban perforaciones a niveles superiores (secundarios, terciarios, cuaternario, etc.).

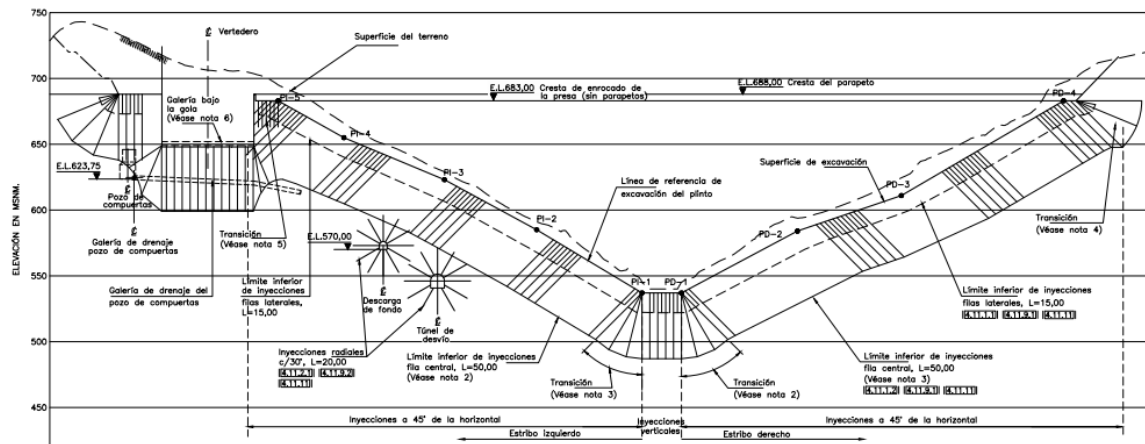


Figura 13.5. Sección por el eje del plinto de la Presa CFRD Porce III, detallando los tratamientos con inyecciones.
Tomado de “Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la presa”.
EPM, 2012

La mezcla utilizada para los tratamientos con inyecciones consistió en una mezcla estable a base de cemento con relaciones bajas de A: C, para obtener una mezcla resistente y durable a largo plazo, evitando el fenómeno de disolución (*leaching*). En este sentido, se realizaron una serie de ensayos en laboratorio con diferentes relaciones de A: C y adicionando diferentes superplastificantes para obtener una buena penetrabilidad de la mezcla en el macizo rocoso que se pudiera utilizar como mezcla única para todo el procedimiento de inyección con el fin de mejorar la eficiencia del proceso de inyección y evitar el uso de diferentes mezclas de inyección.

En la Tabla 13.3, se muestran los ensayos ejecutados en diferentes mezclas para definir la mezcla definitiva para los tratamientos en la fundación de la presa de Porce III.

Tabla 13.3. Tipos de mezclas ensayadas para definir la mezcla única del tratamiento en Porce III.

Mezcla	Relación A/C	Aditivo (%)	Viscosidad (s)	Cohesión relativa (mm)	Exudación (%)	Resistencia a la compresión-28 días (MPa)
L054	0,75 : 1,00	2,0	32	0,09	2,2	15,5
L055	0,75 : 1,00	1,5	32	0,08	3,5	17,2
L056	0,77 : 1,00	1,5	32	0,10	4,6	14,0
L058	0,80 : 1,00	2,0	32	0,08	5,0	12,2

Adoptado de "Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la presa". EPM, 2012

A partir de los ensayos descritos en la anterior tabla y de varios ajustes en laboratorio y campo se concluyó que la mezcla única de inyección que se utilizó en el tratamiento fue una mezcla a base de cemento con relación A: C de 0.75: 1, con la adición de 1.5% de superplastificante.

Con base, en esta información se elaboró la mezcla para en las plantas estacionarias, modulares y pequeñas, durante la ejecución del tratamiento.

Por efectos de calidad y mantener las propiedades de la mezcla, durante los tratamientos se realizaron ensayos en campo. Los resultados de los ensayos ejecutados se muestran a continuación.

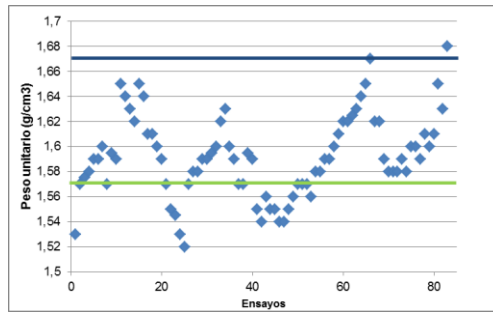


Figura 13.6. Resultados de ensayos en campo de peso unitario.
Tomado de “Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la presa”.
EPM, 2012

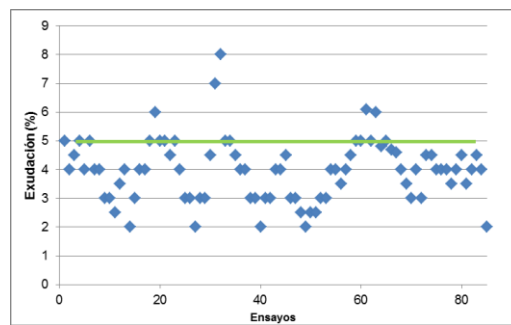


Figura 13.7. Resultados de ensayos en campo de exudación.
Tomado de “Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la presa”.
EPM, 2012

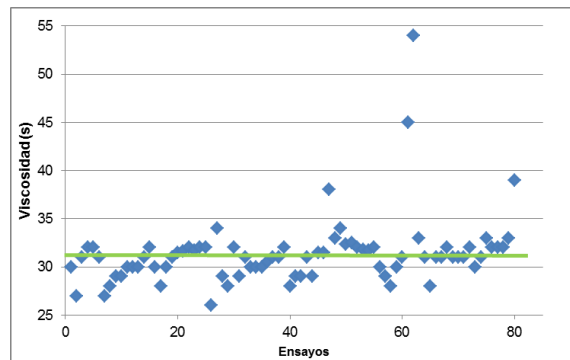


Figura 13.8. Resultados de ensayos en campo de viscosidad de la mezcla.
Tomado de “Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la presa”.
EPM, 2012

De las figuras anteriores se concluye que la mezcla utilizada en los tratamientos, fueron acordes a los diseños de mezcla establecidos, debido a que se encontraron dentro de los rangos establecidos en el diseño.

Los tratamientos realizados en el proyecto se ejecutaron con el método GIN, a excepción de las inyecciones de consolidación donde se adoptó el método convencional con engrosamiento sucesivo.

Para cumplir con el cierre del tratamiento en la presa, se perforaron aproximadamente 40.100 m y se inyectaron aproximadamente 34.000 sacos de cemento de 50 kg. Este tratamiento se dividió en dos partes: la primera en la cortina central que fue inyectada con el método GIN y la segunda en dos cortinas de consolidación aguas arriba y aguas abajo de la cortina central, inyectadas con el método convencional de engrosamiento sucesivo. Los resultados de perforación e inyección se muestran en las siguientes figuras:

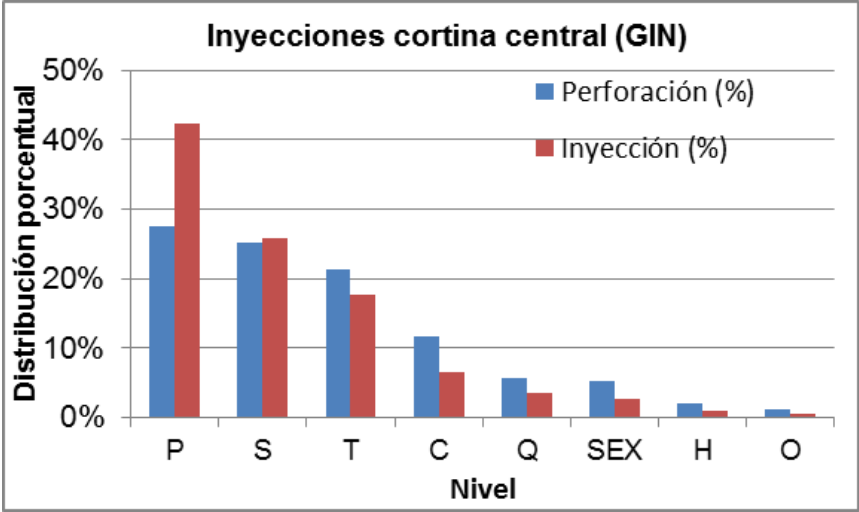


Figura 13.9. Proporción de inyecciones ejecutadas en la cortina central de la presa con el método GIN según el nivel de inyección.

P: Primarias; S: Secundarias; T: Terciarias; C: Cuaternarias; Q: Quinarias; SEX: Sextantarias; H: Septenarias y O: Octonarias

Adoptado de "Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la presa". EPM, 2012

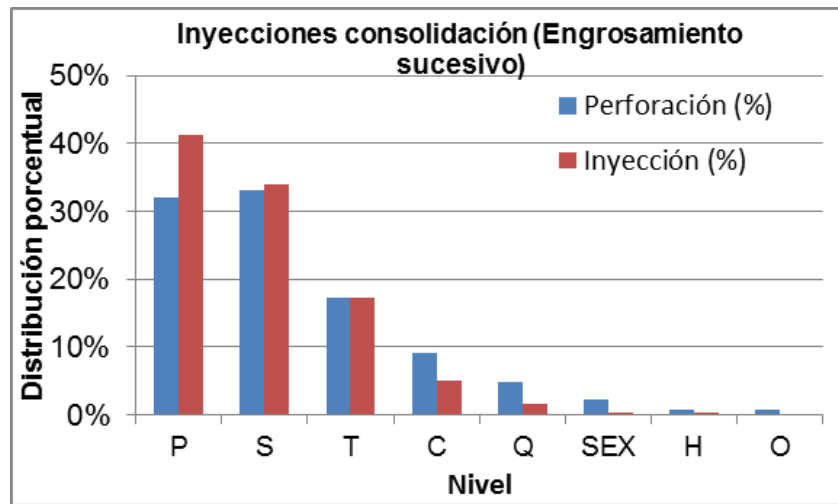


Figura 13.10. Proporción de inyecciones de consolidación ejecutadas en las cortinas aguas abajo y arriba de la presa con el método de engrosamiento sucesivo según el nivel de inyección.

P: Primarias; S: Secundarias; T: Terciarias; C: Cuaternarias; Q: Quinarias; SEX: Sextantarias; H: Septenarias y O: Octonarias

Adoptado de "Informe final inyecciones de consolidación e impermeabilización de la presa". EPM, 2012

De las gráficas anteriores se observa en primera fase, que el cierre llegó hasta niveles octonarios (separación entre perforaciones de 2,5 cm). Se observa además que las cantidades de inyección son mayores con el método GIN que con el método de engrosamiento sucesivo.

En ambas gráficas se observa la disminución gradual de cantidades conforme aumenta el nivel de perforaciones a espacio dividido.

Con el método de engrosamiento sucesivo en las inyecciones de consolidación se observan mayores cantidades de perforación e inyección en los primeros niveles (Primarios y secundarios), mientras que las inyecciones de la cortina central con el método GIN se observan mayores cantidades en niveles altos (Cuaternarios).

Según el dueño del proyecto (EPM, 2012), los consumos altos de mezcla se debieron a que en la zona intermedia y la zona alta de la presa, donde habían esquistos grafitosos muy fracturados, que tomaron la mayoría del volumen de inyección, llenando adecuadamente estas zonas.

Con los datos de perforación y tomas anteriores, se obtuvo una toma promedio de 0.53 sacos/m. para el tratamiento en la cortina central de la presa y una toma promedio de 1,57 sacos/m para el tratamiento en las inyecciones de consolidación en las cortinas aguas abajo y aguas arriba de la cortina central.

Para realizar el cierre definitivo del tratamiento se verificó en detalle la información de los resultados de los ensayos de agua a presión ejecutados, las condiciones geológicas particulares interpretadas por los mapeos geológicos levantados en superficie, los mapeos geológicos en los túneles y las perforaciones exploratorias realizadas durante el tratamiento. También, se revisaron detalladamente todos los procedimientos de inyección, especialmente donde se tuvieron tomas altas y muy altas, los resultados de los ensayos de campo y laboratorio y los resultados de la instrumentación instalada en el proyecto.

13.2 CASOS HISTÓRICOS DEL USO DE TRATAMIENTOS CON INYECCIONES PARA TÚNELES

13.2.1 Central Hidroeléctrica el Guavio (Túnel de fuga)

La Central Hidroeléctrica El Guavio, se encuentra ubicada en la provincia del Guavio, Departamento de Cundinamarca, aproximadamente a 80 km al oriente de Bogotá, D.C, cerca de las poblaciones de Ubalá, Gachalá y Mámbita. Una de las obras que conforman la central subterránea es el túnel de fuga, que se encarga de devolver el agua turbinada de la central subterránea al río Guavio. Este túnel se excavó en rocas sedimentarias de la Formación Fomeque (Kif), la Formación Une (Ksu) y la Formación Bata (KiJb), compuestas con intercalaciones de estratos permeables (arenisca friable y arenisca cementada) y poco permeables (limolitas y lutitas). El túnel tiene una longitud de 5258 m y una sección de excavación de 8,40 m de diámetro.

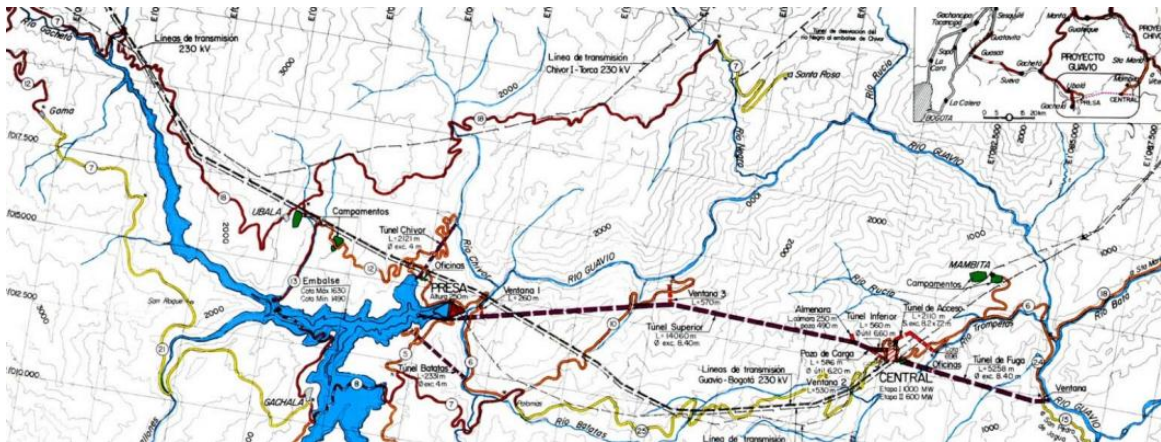


Figura 13.11. Ubicación general de la Central Hidroeléctrica El Guavio y del túnel de fuga. Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

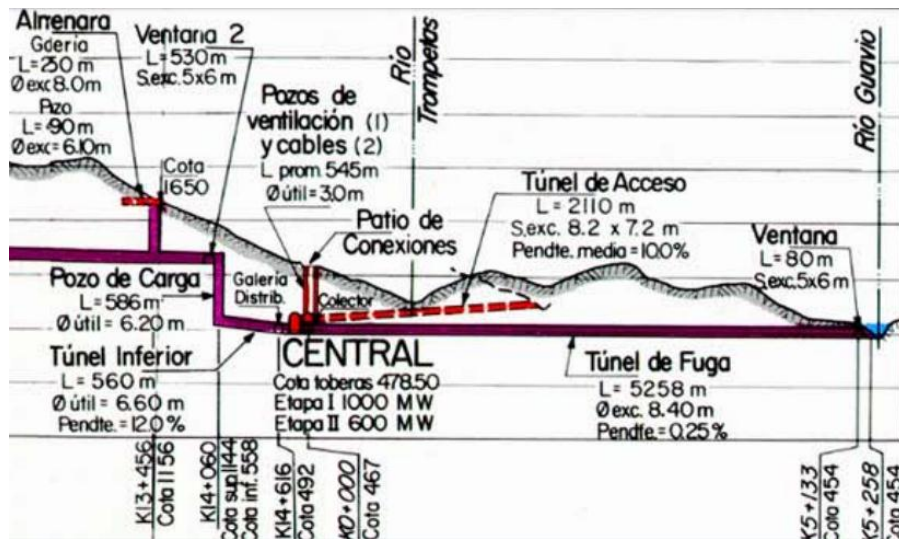


Figura 13.12. Perfil del túnel de fuga de la Central Hidroeléctrica El Guavio. Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

Debido a que la excavación del túnel de fuga, presento avalanchas de material hacia la excavación por fenómenos de terreno que fluye (numeral 3.3.4.7), fue necesario ejecutar durante la excavación del túnel un tratamiento con inyecciones y drenajes en el frente de excavación donde se presentó el fenómeno.



Fotografía 13.4. Flujos y avalanchas de material hacia la excavación en el túnel de fuga.
Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

El fenómeno de terreno que fluye se concentró en una zona de areniscas friables con un banco de roca muy triturada llamada “*Rockflour*”, o harina de sílice, con agua a presión, alcanzando cerca de los 30 bares.

Para identificar el estrato de arenisca friable (*Rockflour*) que generó las avalanchas, se realizaron una serie de investigaciones geotécnicas con perforaciones en abanico hacia adelante. Estas permitieron, identificar los estratos de arenisca friable y sirvieron de drenajes hacia adelante del frente de la excavación, para disminuir las presiones hidrostáticas. En estos drenajes se instalaron sistemas antiavalancha que permitieron medir los caudales y presiones, así como controlar los flujos de arena.

En la Figura 13.13, se muestra un esquema de las perforaciones de exploración y drenajes instalados en el frente de excavación para identificar los estratos de arenisca friable, que generaron las avalanchas.

En la Figura 13.14, se muestra el sistema de antiavalancha empleado en los drenajes instalados en el frente de excavación.

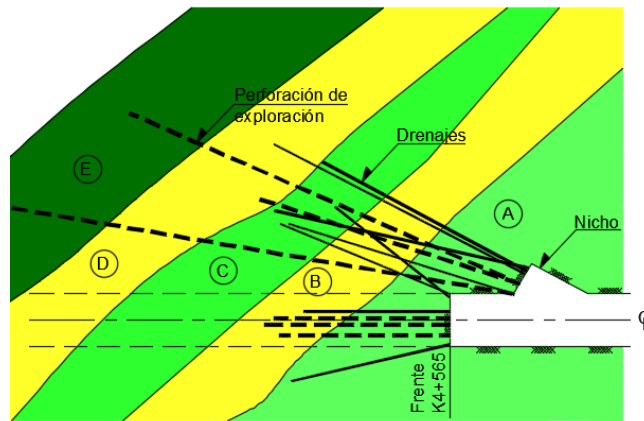


Figura 13.13. Planta túnel de fuga en sector donde se realizaron perforaciones de exploración y drenajes.

(A) Arenisca cementada; (B) Arenisca friable; (C) Arenisca cementada; (D) Arenisca friable y (E) limolitas y lutitas

Adoptado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

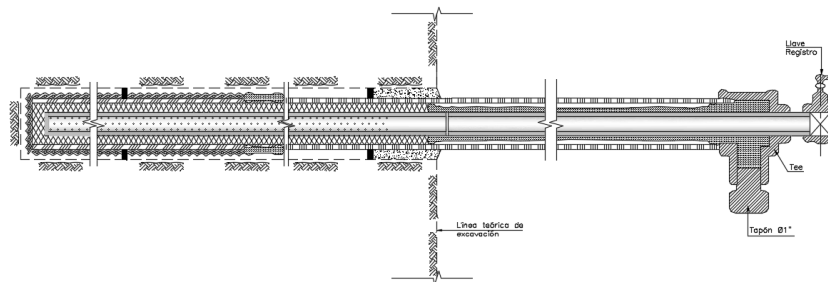


Figura 13.14. Sistema Antiavalancha utilizado en los drenajes.
Fuente del autor.

Con las investigaciones realizadas en el frente de excavación, se ubicaron los estratos de arenisca friable que no pudieron ser identificados en la etapa inicial de estudios y diseños con las perforaciones desde superficie, como se observa en la Figura 13.15.

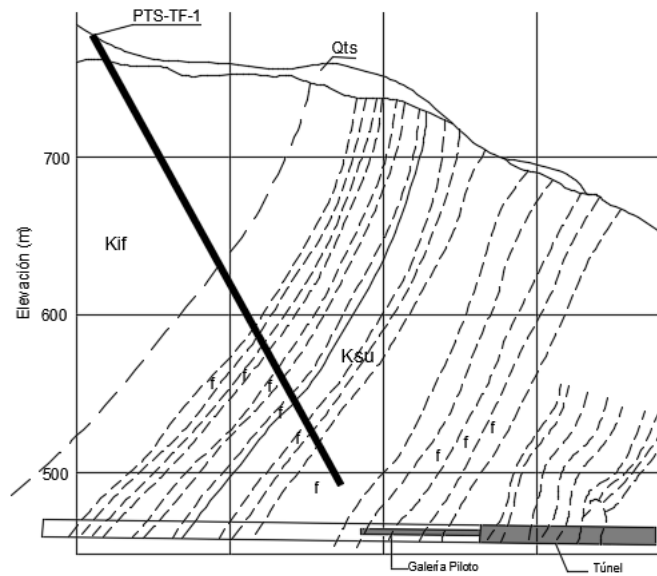


Figura 13.15. Perfil túnel de fuga detallando la perforación inicial que no se alcanzó a identificar los estratos de arenisca friable.

(Kif) Formación Fomeque; (Ksu) Formación Une y (f) Arenisca friable

Adoptado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

Para pasar a través de estos estratos de arenisca friable, se excavó una galería piloto. Para excavar la galería en tramos, se realizaron inyecciones en el frente de excavación y alrededor de la galería piloto. Inicialmente se procedió a inyectar hacia adelante con mezclas a base de cemento. No obstante, dada las condiciones del material compuesto por “*Rockflour*” o roca molida, no se pudo impregnar la masa. Debido a esto, se tuvo que modificar el procedimiento de inyección mediante inyecciones químicas, con geles de silicato de sodio que podían impregnar y consolidar el material alrededor del túnel. Estas inyecciones químicas (silicatos) lograron penetrar intergranularmente en la arenisca friable y las discontinuidades muy cerradas, donde las mezclas a base de cemento y bentonita no lograron penetrar. Estos tratamientos mejoraron las propiedades mecánicas de la arenisca y redujeron sustancialmente la permeabilidad primaria, aglutinando el material fino, densificándolo y dándole cohesión que en su estado natural no tenía (EEEB, 1989).

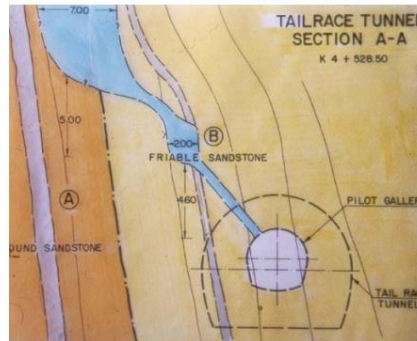


Figura 13.16. Sección de galería piloto detallando las condiciones geológicas particulares. Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

El tratamiento con inyecciones ejecutadas desde la galería piloto, cubrió una zona de hasta dos (2) metros por fuera de la línea teórica de excavación de la galería. La secuencia de inyecciones se ejecutó en dos etapas, la primera con un tratamiento con mezclas a base de cemento y bentonita con el fin de rellenar las diaclasas, fisuras y oquedades existentes, además de consolidar la arena suelta con presiones de hasta 6 MPa. Posterior a esto en la siguiente etapa se inyectó la mezcla química a base de gel de silicato de sodio, con el propósito de consolidar y aglutinar las areniscas friables, la arena suelta y material fino que no alcanzo a ser tratado con las inyecciones en la primera etapa, estas mezclas químicas se inyectaron hasta una presión de 3 MPa.

En la Tabla 13.4, se muestran las mezclas de inyección utilizadas para los tratamientos de mejoramiento de los estratos de arenisca friable.

Tabla 13.4. Mezclas utilizadas en el tratamiento desde la galería piloto

Mezcla a base de cemento y bentonita		Mezcla química viscosa		Mezcla química fluida	
Agua	0.75 a 1.5	Silicato	70%	Silicato	41%
Cemento	1	Agua	18%	Agua	51%
% bentonita	2 a 9	Endurecedor	12%	Endurecedor	8%

Adoptado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

En primera instancia se realizaron inyecciones hacia adelante en el frente de excavación (A), con el procedimiento en dos etapas descrito anteriormente alcanzando tomas de aproximadamente 46.000 litros de mezcla a base de cemento y bentonita y tomas de aproximadamente 67.000 litros de mezcla química.

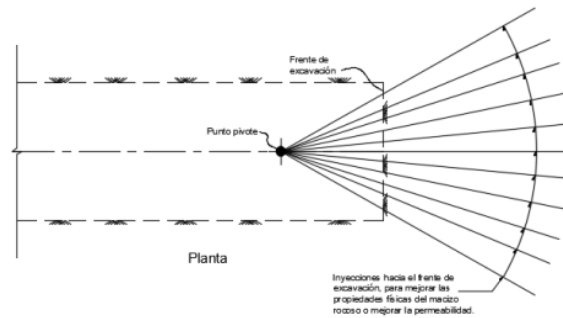


Figura 13.17. Planta detallando las inyecciones hacia adelante para tratar el frente de excavación de la galería piloto.
Fuente del autor.

Una vez inyectado el frente de excavación, se procedió a la excavación de la galería piloto (Figura 13.18), con perforación y voladura y rozadoras, en sección completa soportada con arcos TH-21, pernos spiling de 6.0 m de longitud y concreto lanzado reforzado con malla de 0.15 m.

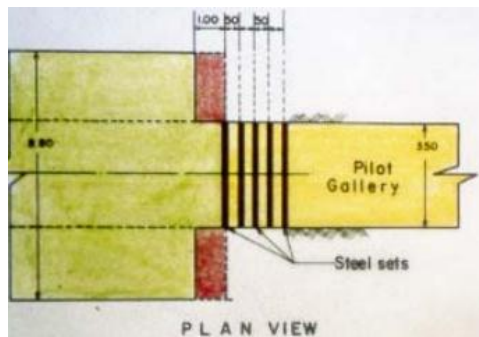


Figura 13.18. Planta del inicio de excavación de la galería piloto.
Adoptado de "Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos". Marulanda, C. 2015.

Después de excavar una parte de la galería piloto, se realizó una segunda pantalla de inyecciones en el frente de excavación e inyecciones radiales desde la galería piloto, con tomas de aproximadamente 105.000 litros de mezcla a base de cemento y bentonita y tomas de aproximadamente 121.000 litros de mezcla química.

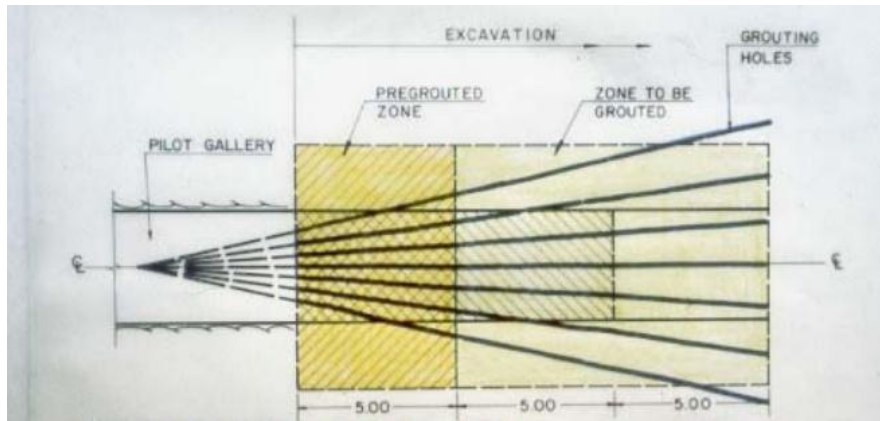


Figura 13.19. Planta con el esquema de inyecciones desde el frente de excavación de la galería piloto.

Adoptado de "Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos". Marulanda, C. 2015.

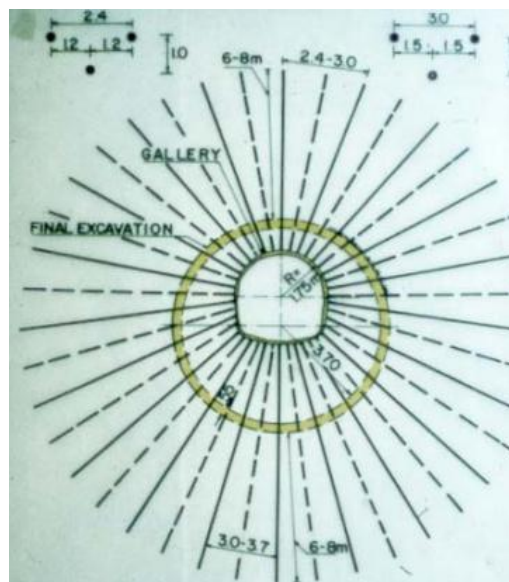


Figura 13.20. Sección con esquema de inyecciones radiales ejecutadas desde la galería piloto.

Adoptado de "Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos". Marulanda, C. 2015.

Luego de terminar con la segunda pantalla de inyecciones se inició de nuevo la perforación del túnel piloto con excavación mecánico-manual, soportada con Arcos TH-21 cada 0.8 m y una capa de concreto lanzado reforzado con malla de 0.15 m.



Fotografía 13.5. Excavación de galería piloto en el frente de excavación.
Tomado de "Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos". Marulanda, C. 2015.

Una vez realizada la excavación de otro tramo de la galería piloto, se realizó una tercera pantalla de inyecciones en el frente de excavación e inyecciones radiales desde la galería piloto, con tomas de aproximadamente 41.000 litros de mezcla a base de cemento y bentonita y tomas de aproximadamente 119.000 litros de mezcla química.

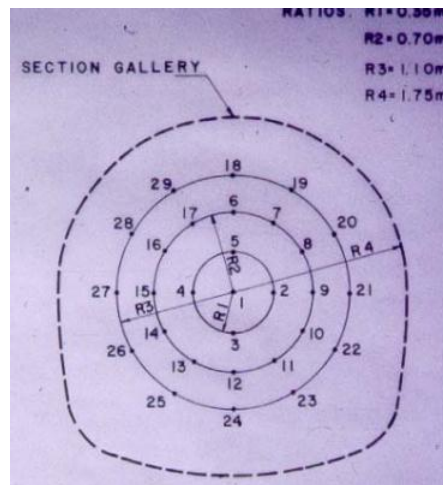
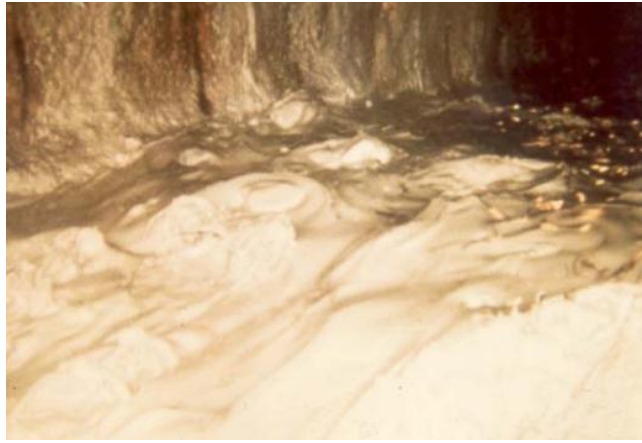


Figura 13.21. Esquema de distribución de inyecciones hacia adelante en el frente de excavación de la galería.

Adoptado de "Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos". Marulanda, C. 2015.

Se avanzó nuevamente con la excavación de la galería piloto, presentándose avalanchas intermitentes de material en el frente de excavación, alcanzando un volumen de 2.000 m^3 , por consecuencias de estas avalanchas se generó una caverna que se identificó por

medio de una inspección en el sitio. Esta caverna fue rellenada después con inyecciones de cemento y bentonita.



Fotografía 13.6. Avalanchas de material en el frente de excavación de la galería piloto.
Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

En esta etapa, durante la excavación de la galería piloto, ocurrieron tres (3) avalanchas que hicieron perder el frente de excavación tres veces a medida que avanzaban. Para proteger el frente de excavación se colocaron escudos metálicos contruidos en el sitio, que ayudaron a recuperar el frente de excavación. La recuperación de los frentes, se realizaron por medio de inyecciones hacia adelante con sistema antiavalancha para tratar el material suelto.



Fotografía 13.7. Uso del sistema Antiavalancha en el frente de excavación de la galería piloto.

Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

Luego de recuperar los frentes de excavación, se continuó con la secuencia de inyección del frente e inyecciones radiales y luego excavación, hasta pasar los estratos de arenisca friable.



Fotografía 13.8. Excavación de galería piloto a través de estratos de arenisca friable. Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

Después de pasar por estos estratos con el anterior procedimiento, se observó la estabilidad de estos sectores por medio de instrumentación instalada y al dar resultados satisfactorios, se inició la excavación del túnel de 8.4 m de diámetro en secciones, por medio de road header que excavaban el material aglutinado con las inyecciones químicas.

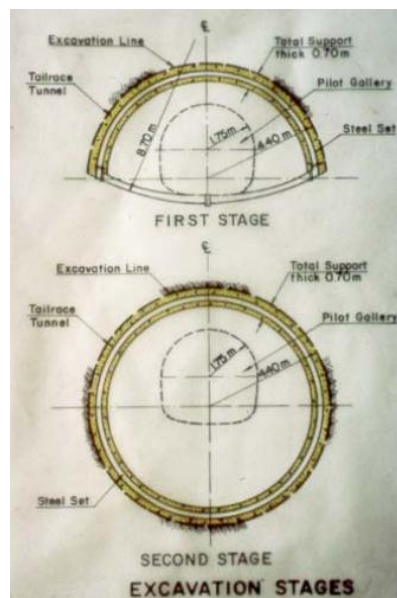


Figura 13.22. Etapas de excavación de la sección total del túnel de fuga. Adoptado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.



Fotografía 13.9. Excavación por medio de road header de la sección del túnel de fuga en sector tratado con inyecciones.

Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.



Fotografía 13.10. Excavación de la sección superior del túnel de fuga.



Fotografía 13.11. Excavación de la sección completa del túnel de fuga.

Tomado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

En la Figura 13.23, se muestran las tomas totales de la inyección desde la galería piloto.

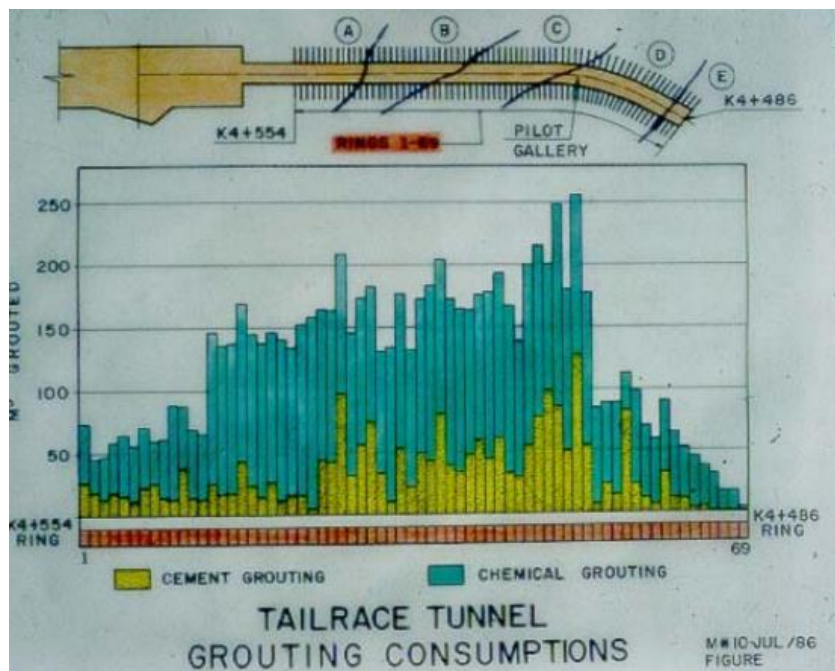


Figura 13.23. Tomas del tratamiento con inyecciones en la zona de la galería piloto. Adoptado de “Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos”. Marulanda, C. 2015.

En la figura anterior se detalla que las tomas más altas, tanto de mezcla a base de cemento y las mezclas químicas, ocurrieron en el sector de las areniscas friables.

Las lecturas de los piezómetros instalados en este sector, reportaron un reducción de las presiones hidráulicas del orden de 20 bares con el sistema de inyección y drenaje ejecutado.

Igualmente, la instrumentación instalada de deformímetros vibratorios y medidas de convergencia, indicaron que las deformaciones eran bajas de 7.0 a 12.5 mm. Mostrando que, el túnel de fuga se encontraba completamente estable y por lo tanto no requirió la colocación de soporte adicional.

Las inyecciones ejecutadas con tubo A Manchette, demostraron excelentes resultados cuando se presentan estos fenómenos de terreno que fluye.

Con estos tratamientos, sistemas combinados de inyección y drenaje, dieron los resultados deseados para reducir los gradientes hidráulicos, con esto se pudo excavar la galería piloto y luego con la excavación a sección completa del túnel de fuga.

14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones generales del documento son las siguientes:

- Un tratamiento efectivo con inyecciones se realiza cuando, se tiene un conocimiento completo de las condiciones geológicas y geotécnicas, estas condiciones afectaran el proceso de inyección y su programación durante construcción.
- Una de las consideraciones geológicas principales a tener en cuenta en el proceso de inyección son, las estructuras geológicas en especial las discontinuidades, fallas, diaclasas y cizallas. Estas estructuras y sus características (apertura, rugosidad, espaciamiento, relleno, etc.) definirán los diseños del tratamiento, el proceso de inyección y el tipo de mezcla para tener un adecuado tratamiento.
- Para conocer las condiciones geológicas del sitio donde se realizará el tratamiento, se debe caracterizar el sitio del tratamiento. En primera fase, investigando y revisando información secundaria de los datos disponibles del sitio (mapeos geológicos existentes, fotografías aéreas, fotointerpretación, entre otros). Luego, se deben realizar mapeos geológicos en superficie en el sitio donde se realizara el tratamiento, estos mapeos deben tener celdas geotécnicas apropiadas para su interpretación y conocer las propiedades de las estructuras geológicas. Con la información anterior, se debe preparar un plan de investigaciones geotécnicas (perforaciones, métodos geofísicos y ensayos de permeabilidad) en los sitios apropiados, para complementar la información anterior y así tener un modelo geológico – geotécnico apropiado de las condiciones del macizo.
- Dentro las consideraciones para el diseño de los tratamientos, se deben realizar los estudios hidrogeológicos, para conocer las condiciones de flujo, filtraciones y gradientes hidráulicos en el macizo rocoso.
- Los objetivos principales de los tratamientos con inyecciones en macizo rocosos es reducir o detener los flujos de agua (impermeabilización), reducir gradientes hidráulicos, mejorar las propiedades físicas y mecánicas y rellenar discontinuidades

existentes. En la mayoría de los tratamientos se utilizan mezclas a base de cemento, aunque en algunos casos se realizan inyecciones químicas, inyecciones con resinas o con otros materiales.

- En grandes obras civiles como presas y túneles, los tratamientos con inyecciones, sirven para reducir y/o controlar la infiltración de agua, reducir gradientes hidráulicos, mejorar las propiedades del macizo y rellenar grietas, discontinuidades y otras particularidades geológicas.
- Para diseñar un adecuado programa de inyecciones se necesitan los resultados de las investigaciones geotécnicas y los estudios hidrogeológicos, para verificar las condiciones reales que se encuentra el macizo rocoso. Sin embargo, con esta información no se tendrá la correlación definitiva del estado del macizo, solo se tendrá como guía inicial para programar y estimar adecuadamente el tratamiento, solo durante la ejecución de los tratamientos se podrán verificar las condiciones reales del macizo.
- Si se desea tener mayor detalle de las condiciones del macizo rocoso, antes del inicio de los tratamientos. Se podrán solicitar pruebas de inyecciones en el sitio, para resolver dudas en el diseño del programa de inyección. Con estas pruebas, se tendrá información técnica con datos del sitio en escala real, para mejorar los diseños y los procedimientos de inyección.
- Durante el diseño de los tratamientos se pueden seguir los criterios de diseño sugeridos por varios autores como Houlsby (1990), Weaver y Bruce (2007), Bruce (2017), Wilson y Dreese (2003), Ewert (1985), Deere (1985), Lugeon (1933) y Lombardi (2003). Igualmente, se pueden seguir criterios de diferentes corporaciones y asociaciones de ingenieros del mundo como el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, 2017), la Sociedad American de Ingenieros Civiles (ASCE) y el *U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation* (USDIBR, 2014).
- Existen diferentes materiales utilizados en los tratamientos, que se clasifican según sus propiedades reológicas. Estas propiedades, en estado fluido y sólido, definen la

garantía de un tratamiento exitoso. En estado fluido, se deben tener propiedades adecuadas para que la mezcla sea estable (sin pérdida de agua y sin sedimentación de partículas) y pueda penetrar o “viajar” por las discontinuidades existentes del macizo rocoso. Estas mezclas en estado sólido deben ser resistentes para evitar fenómenos de disolución (*leaching*) del tratamiento.

- Las mezclas de inyección más utilizadas son aquellas de baja viscosidad, cohesión baja, baja exudación y bajos coeficientes de presión de filtración. Estas son mezclas a base de cemento con bajas relaciones de A: C con aditivos estabilizadores y plastificantes.
- Al cemento de las mezclas cementosas de inyección, se le pueden agregar puzolanas que proporcionan propiedades a la mezcla para modificar el tiempo de fraguado, mejorar la resistencia de la mezcla endurecida, mejorar la permeabilidad de la mezcla, mejorar la bombeabilidad y mejorar la cohesión.
- La adición de bentonita o arcillas en las mezclas ayuda a que durante los procedimientos de inyección no “viajen” más allá de lo requerido.
- El uso de otros materiales en las mezclas como las arenas, ayudan a rellenar más rápido las discontinuidades abiertas del macizo rocoso. Sin embargo, el uso de arenas en las mezclas para inyecciones no se utiliza por que tiende a sedimentarse y a obstruir los equipos, la arena también es abrasiva por lo que tiende a desgastar más rápido los equipos utilizados en el tratamiento.
- A las mezclas de inyección se le pueden adicionar aditivos para modificar sus propiedades, como acelerantes, aditivos de control de consistencia, retardantes, plastificantes, inhibidores y agentes estabilizantes.
- Cuando las condiciones particulares geológicas del macizo rocoso o por requerimientos del proyecto no permitan realizar el tratamiento con mezclas cementosas, se pueden utilizar inyecciones con mezclas con resinas para reducir la permeabilidad y mejorar las propiedades mecánicas de macizos rocosos muy

fracturados. Estas resinas al ser inyectadas se expanden y obtienen propiedades apropiadas para los tratamientos.

- Como procedimiento de control de calidad y verificación de la efectividad del tratamiento con inyecciones, se requieren ensayos de campo y laboratorio para verificar las calidades de las mezclas de inyección antes del inicio de actividades y durante los tratamientos.
- Se requiere criterio ingenieril y experiencia en tratamientos con inyecciones, para escoger una apropiada tasa de presión de inyección según el tipo de macizo rocoso, para que la mezcla penetre donde se requiere y que la presión no fracture el macizo, teniendo en cuenta el estado de esfuerzos del macizo en profundidad.
- Para los procedimientos de perforación e inyección se deben escoger los equipos apropiados según el tipo de macizo a tratar, para obtener un tratamiento efectivo con tiempos y costos apropiados.
- Los métodos para inyección, son apropiados para llenar las discontinuidades del macizo rocoso con presiones adecuadas para penetrar en ellas sin generar fractura hidráulica. Los métodos son el: método GIN y el método de engrosamiento sucesivo.
- Estos métodos se diferencian en la forma que es inyectada la mezcla, el GIN inyecta una única mezcla estable a presiones altas y el método de engrosamiento sucesivo inyecta una mezcla base que se engrosa (cambia propiedades reológicas), cuando el procedimiento de inyección lo requiera.
- En el método de engrosamiento sucesivo establece un límite de presión de inyección para evitar el fracturamiento del macizo. Mientras que el método GIN puede alcanzar presiones más altas generando posiblemente fracturamiento del macizo.

- Las presiones iniciales del método GIN son altas en las primeras etapas de inyección, o en la superficie del terreno, lo que llevaría a resurgencias de mezcla de inyección en superficie, o al levantamiento de estructuras.
- Cuando se malinterpretan o se aplican inadecuadamente ambos métodos de inyección, puede ocurrir un inadecuado tratamiento, por lo que se requiere la capacitación tanto del personal profesional como el operativo de obra, para evitar esta situación.
- Con el método de engrosamiento sucesivo, la mezcla sobrante se puede inyectar en el macizo, mientras que con el método GIN esta mezcla sobrante se tendrá que disponer en botaderos, porque el proceso es automático y no permite la inyección de mayor volumen establecido en los límites, lo cual generaría costos adicionales de transporte y disposición.
- Los volúmenes de inyección en las inyecciones iniciales (primarias y secundarias) con el método de engrosamiento sucesivo son altos y van disminuyendo conforme se realizan inyecciones adicionales (terciarias y cuaternarias), para realizar un cierre adecuado del tratamiento. Mientras que con el método GIN se pueden alcanzar niveles de inyección más altos (hasta septenarios), porque las inyecciones iniciales finalizan por límite de volumen establecido y dejando vacíos por llenar.
- Cuando en ambos métodos se alcancen niveles de inyección superiores (sextantarios y/o septenarios) con tomas altas, es posible que se esté llenando un gran vacío o una caverna, para estos casos se deben inyectar grandes cantidades de mezcla hasta obtener rechazo por volumen. Las mezclas utilizadas en casos son mezclas de baja viscosidad y mezclas de cemento- espuma que incrementa su volumen al ser inyectados en el macizo.
- El cierre o terminación de los trabajos de inyección es un método observacional de los datos obtenidos durante los procedimientos de inyección, que requieren un criterio ingenieril y asesoría de un experto en tratamientos con inyecciones.

- En los casos del uso de tratamientos con inyecciones en presas, se utiliza el criterio de cierre en términos de consumo de sacos de cemento y no de permeabilidad. Debido a, que en ambos casos el objetivo principal de los tratamientos era el rellenos de discontinuidades.
- Para los dos casos de tratamientos con inyección en presas, se observa que las mezclas utilizadas son estables y según lo observado en los resultados de los ensayos ejecutados en campo, mantienen las propiedades establecidas en el diseño de mezcla
- En la explicación de los casos históricos, se observa que se realizan adecuadamente los cierres de los tratamientos, haciendo una evaluación estadística por medio de histogramas de distribución. Observando una disminución en cada nivel de inyección. Sin embargo, cuando se utiliza el método de engrosamiento sucesivo el cierre ocurre en niveles más bajos (terciarios), mientras que con el método GIN se alcanzan niveles más altos de inyección (cuaternarios y quinaros).
- Cuando se tienen posibles fenómenos de terreno que fluye en túneles, se deben tomar una serie de medidas que permiten disminuir el efecto de este fenómeno: (1) Instalación de drenajes, con sistema antiavalancha, en el frente de excavación con el fin de disminuir las presiones en el frente. Así mismo, en estos drenajes se deja la instrumentación necesaria para medir presiones y caudales; (2) Tratar el frente de excavación con inyecciones hacia adelante e inyecciones de consolidación (radiales), para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de este tipo de material (que fluye). Las mezclas de inyección utilizadas para este tipo de tratamientos requieren materiales muy finos (cementos ultrafinos) o inyecciones químicas (silicatos), para que la mezcla pueda penetrar dentro de la matriz arenosa del material. El sistema de inyección en este tipo de material se realiza con Tubos A. Manchette y (3) Construcción de by pass para desviar los flujos de material hacia otro sitio.
- Las inyecciones realizadas desde excavaciones subterráneas mejoran las propiedades del macizo alrededor o al frente de la excavación, según el tipo de inyección si son hacia adelante o son inyecciones radiales. Estas inyecciones se

realizan en etapas, iniciando el procedimiento de inyección en el fondo de la perforación de inyección para tratar en una primera fase el macizo y crear de esta forma un anillo o capa protectora para las siguientes etapas de inyección hacia la superficie de excavación.

15. REFERENCIAS

- [1] American Petroleum Institute – API (2005). *API 10. Specifications for Materials and Testing for Well Cements*. Estados Unidos.
- [2] American Petroleum Institute – API (2009). *API RP 13B-1. Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids*. Estados Unidos.
- [3] ASTM (2014). *D2419-14, Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [4] ASTM (2015). *C143/C143M-15a, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [5] ASTM (2016a). *C939/C939M-16a, Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [6] ASTM (2016b). *C109/C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [7] ASTM (2016c). *C260/C260M-10a. Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [8] ASTM (2016d). *C940-16. Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [9] ASTM (2017a). *C157/C157M-17, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [10] ASTM (2017b). *C494/C494M-17. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [11] ASTM (2018a). *C94/C94M-18. Standard Specification for Ready-Mixed Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [12] ASTM (2018b). *C191-18, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- [13] ASTM (2018c). *C150/C150M-18, Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [14] ASTM (2018d). *C595 / C595M-18, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [15] ASTM (2018e). *C989/C989M-18a. Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org

- [16] ASTM (2018f) *C33/C33M-18. Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [17] ASTM (2019). *C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- [18] ANLA (2017). *Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA en proyectos de construcción de carreteras y/o túneles*. Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible. Bogotá, Colombia.
- [19] Baker, Wallace Hayward (1982). *Grouting in Geotechnical Engineering*. Estados Unidos: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.
- [20] Barton, N. y Quadros (1997). *Joint aperture and roughness, flow and groutability*. New York.
- [21] Barton, N (2002). *Rock Joint Sealing Experiments Using Ultra Fine Cement Grout*. North American Tunnelling.
- [22] Barton, N. (2004a). *The why's and how's of high pressure grouting - Part 1*. TTI p28-30 parte I.
- [23] Barton, N. (2004b). *The theory behind high pressure grouting- Part 2*. TTI p28-30 parte II.
- [24] Barton, N (2016). *Pre-grouting for water control and for rock mass property improvement*. Curso Empirical methods and rock mechanics for tunnels and slopes, faulted, weak and weathered rock masses. Cartagena, Colombia.
- [25] BASF Co. Ltd. (2011). *Pre-Excavation Grouting in Rock Tunnelling*. BASF Construction Chemicals Europe Ltda.
- [26] B. Amadei, W. Z. (2001). *Savage. An Analytical Solution for Transient Flow of Bingham Viscoplastic Materials in Rock Fractures*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci.38 pag. 285-296.
- [27] Bernarder, Stig. (2004). *Grouting in Sedimentary and Igneous Rock with Special Reference to Pressure Induced Deformations*. Luleå University of Technology.
- [28] Bruce, D.A. (2005). *Glossary of Grouting Terminology*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. Diciembre 2005. ASCE.
- [29] Bruce, D.A., D.M. Heenan, y D.B. Wilson. (2005). *Quality and Quantification in Rock Drilling and Grouting*. Geo-Frontiers Geotechnical Special Publications 130-142 and GRI-18; Sponsored by The Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers Geosynthetic Materials Association of the Industrial Fabrics Association International Geosynthetic Institute, January 24–26, Austin, Texas, 10 pp.
- [30] Bruce, D.A. (2007). *Pregrouting for Tunnels in Rock: The Case for New Thinking*. New Peaks in Geotechnics. ASCE.
- [31] Bruce, D.A. (2011). *Rock Grouting for Dams and the Need to Fight Regressive Thinking*. USSD Annual Conference, April 12-13, San Diego, CA, 16 pp.

- [32] Bruce, D.A. (2012). *Computer Monitoring in the Grouting Industry*. Geo-Institute GeoCongress, State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering Conference, San Francisco, CA, Marzo 25-29, 16 pp.
- [33] Bruce, D.A. (2013a) *Remedial techniques for dams and levees: a comparison of technologies*.
- [34] Bruce, D.A. (2013b). *Contemporary Rock Drilling and Grouting Practices*. New Zealand Society of Large Dams (NZSOLD) and the Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) Conference, Rotura, New Zealand, November 13-15, 2013, 12 pp.
- [35] Bruce, D.A. and G.M. Filz (2013). *A Brief History of Deep Mixing Methods*. Deep Foundations Institute Magazine, Special Issue: Landmarks, Noviembre/ Diciembre, pp. 53-56.a.
- [36] Bruce, D.A, B.H. Greene, B.E. Williams, and J.H. Williams (2014). *Evolution of Grouting in Karst at Logan Margin Dam, Alabama*. The Journal of Dam Safety, Volumen 12, Issue 4, p. 21-35.
- [37] Bruce, D.A. (2015). *RCC Dam Foundation Selection and Treatment*. International RCC Dam Seminar and Duck River Reservoir Project Study Tour, May 4-6, Nashville, TN, 105 slides.
- [38] Bruce, D.A. (2018). *Remedial Grouting of Existing Embankment Dam Foundations: Lessons Learned (and Ignored)*. IFCEE 2018 GSP 296. ASCE.
- [39] Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small dams*. Departamento del interior de los Estados Unidos de America.
- [40] Burwell, E. B., and Moneymaker, B. C. (1950). *Geology in Dam Construction*. In Application of Geology to Engineering Practice, Sidney Paige, chairman. Geological Society of America. Berkeley Volumen, 11–44.
- [41] Carter, T. G., Amaya, F., Jefferies, M. G., & Eldridge, T. L. (2003). *Curtain Grouting for the Antamina Dam, Peru: Part 1—Design and Performance*. Grouting and Ground Treatment. ASCE. Pag. 917–928.
- [42] Carter, T. (2012). *Improved Methods of Design for Grouting Fractured Rock*. Grouting and Deep Mixing 2012. ASCE.
- [43] Carter, T. G., Jefferies, M. G., Rombough, V., Hassler, L., & Granata, R. (2017). *A Retrospective Evaluation of the Progress of Computer Monitored Grouting*. Grouting. ASCE. Pag. 389–403.
- [44] ChemGrout (2019a). *Cohesion Testing System*. Recuperado de <https://www.chemgrout.com/products/accessories/grout-testing-equipment/cohesion-testing-system/> el día 25 de abril de 2019.
- [45] ChemGrout (2019b). *Mud balance with Marsh Funnel*. Recuperado de <https://www.chemgrout.com/products/accessories/grout-testing-equipment/mud-balance-with-marsh-funnel/> el día 25 de abril de 2019.

- [46] Deere, D. U. (1981). *Engineering Geology for Concrete Dam Foundations*. In Recent Developments in Geotechnical Engineering for Hydro Projects. Editado por F. H. Kulhawy, ASCE, New York, 166–176.
- [47] Deere, D. U., and Lombardi, G. (1985). Grout Slurries—Thick or Thin?” In Issues in Dam Grouting, Edited by W. H. Baker, ASCE, New York, 156–164.
- [48] Deere, D. U. and Patton, F. D. (1971). *Slope stability in residual soils*. Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, American Society of Civil Engineers, pp. 87-170.
- [49] Departments of the army and the air force. (1970). *Grouting methods and equipment*. Technical manual No. 5-818-6; Air force manual No. 88-32.
- [50] Duarte, Rafael. (Agosto, 2015). *Conceptos básicos geológicos*. Diplomado Túneles en Suelo y Roca. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- [51] Emmelin, Ann. (2007). *Rock grouting Current competence and development for the final repository*. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management.
- [52] Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá. (1989). *Proyecto Hidroeléctrico del Guavio. Túnel de Fuga. Reporte de tratamiento de inyecciones*. Bogotá.
- [53] Empresas Públicas de Medellín (2012). *Informe final de consolidación e impermeabilización de la Presa*. Asesoría Porce III. Medellín, Antioquia.
- [54] Empresas Públicas de Medellín (2019). *Descripción de las obras construcción de la presa de Porce III*. Recuperado de <https://www.epm.com.co/site/home/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/premio-por-construccion-de-presa-porce-iii> en mayo de 2019.
- [55] ENEL (2019). Periódico La buena energía del El Quimbo. Publicación bimestral Noviembre de 2015. Colombia. Recuperado de https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp%3%26B1ol/sobre_enel/generaci%3%26B3n/central-hidroelectrica-el-quimbo/periodico/periodico_la_buena_energia_de_el_quimbo_noviembre.pdf en mayo de 2019.
- [56] Ewert F-K. (1985). *Rock grouting with Emphasis on Dam sites*. Springer-Verlag: Berlín.
- [57] Ewert F-K. (1996). *The GIN-Principle – helpful method for rock grouting? Part 1 – Part 2*. International Water Power & Dam Constrution. Febrero 1996.
- [58] Ewert F-K. (1997). *The GIN-Principle revisited*. International Water Power & Dam Constrution. Octubre 1997, pp 33-36.
- [59] F. G. Bell. (2007). *Engineering Geology*. Reino Unido: Editorial Elsevier Ltd.
- [60] F.G.H. Blyth y M.H. de Freitas. (1984). *A Geology for Engineers*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Seventh Edition, pp 111-127.
- [61] Fetter, C. (1988). *Applied hydrogeology*. Nueva York: McMillan Publishing Company.

- [62] Five star products. (2012). *A Professional's Handbook on Grouting and Concrete Repair*. Five star products.
- [63] Goodman, R. E. (1976). *Methods of geological engineering In discontinuous rocks*. West publishing co.
- [64] Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*.
- [65] González de Vallejo, L. I. (2004). *Ingeniería geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- [66] Gutiérrez, Ramiro. (Enero-Mayo, 2016). *Curso de mecánica de rocas*. Maestría en Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá.
- [67] Gutiérrez, Ramiro. (Agosto-Diciembre, 2017). *Curso de ingeniería de rocas*. Maestría en Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá.
- [68] H. Stille (2015). *Rock Grouting – Theories and Applications*. Stockholm.
- [69] Harrinson, Donald M. (2013). *The Grouting Handbook. A Step-by-Step Guide for Foundation Design and Machinery Installation*. Elsevier Inc
- [70] Henn, Raymond W. (1996). *Practical guide of Grouting of underground structures*. Estados Unidos: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.
- [71] Henn, Raymond W. (2002). *AUA Guidelines for Backfilling and Contact Grouting of Tunneis and Shafts*. Estados Unidos: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.
- [72] Henn, Raymond W. y Soule. Nathan C. (2010). *Ultrafine cement in pressure grouting*. Estados Unidos: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.
- [73] Hoek, E. (2007). *Rock mass properties*. En *Practical Rock Engineering*.
- [74] Hoek, E. y Brown, E.T. (1980). *Excavaciones Subterráneas en Roca*. Mexico: McGraw-Hill.
- [75] Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (2000). *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Elsevier.
- [76] Houlsby, A. C. (1976). *Routine interpretation of the lugeon water-test*. Engng Geol. Vol 9 1976 pp. 303-313.
- [77] Houlsby, A. C. (1990). *Construction and Design of Cement Grouting*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [78] ICOLD (2019). *Inventario de presas construidas en Colombia*. Recuperado de https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/data_search.asp en 9 de mayo de 2019.
- [79] INGETEC (2009). *Informe de diseño geotécnico Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo*. Bogotá, Colombia.
- [80] INGETEC (2014). *Comentarios de obra construida del Proyecto Hidroeléctrica El Quimbo*. Asesoría Técnica en obra. Gigante, Huila.
- [81] Ingeominas (2004). *Programa de exploración de aguas subterráneas*. Bogotá: Ingeominas.

- [82] International Society for Rock Mechanics (1995). *Final report of the commission on rock grouting*. Portugal: ISRM
- [83] Khayat, K. and Yahia, A. (1998). *Simple Field Tests to Characterize Fluidity and Washout Resistance of Structural Cement Grout*. Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 20, No. 1, 1998, pp. 145-156, <https://doi.org/10.1520/CCA10448J>. ISSN 0149-6123.
- [84] Lugeon, M. (1933). *Barrages et Geologie Dunod*, Paris.
- [85] Lombardi, G. (2003). *Grouting of Rock Masses*. In Grouting and Ground Treatment, Editado por L. F. Johnsen, D. A. Bruce, and M. J. Byle. ASCE, Reston, Va., Geotechnical Special Publication No. 120, 164–197.
- [86] Lombardi, G., and Deere, D. (1993). *Grouting Design and Control Using the GIN Principle*. Intl. Water Power and Dam Constr. 45(6), June, 15–22.
- [87] Marulanda, C. (2015). *Experiencias de excavación de túneles con métodos convencionales y maquinas TBM en la cordillera de los Andes. Casos históricos*. Diplomado de Túneles en suelo y Roca. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.
- [88] Mitchell, J. K. (1970). *In-Place Treatment of Foundation Soils*. Soil Mechanics and Found. Div. SM 1, Enero, 73–110.
- [89] Norwegian tunnelling society. (2011). *Rock mass grouting in Norwegian tunneling*. Publication No. 20.
- [90] Nonveiller, E. (1970). *A rational approach to the design of grout curtains*. Segundo congreso de mecánica de rocas, Belgrade. V. 3, Publicación 6-13. Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), Lisboa, Portugal.
- [91] Nonveiller, E. (1989). *Grouting Theory and Practice*. Amsterdam, Holanda: Elsevier,
- [92] Pinzuar (2019). *Aparato de Vicat modificado*. Recuperado de <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/concretos/aparato-vicat-modificado/> en 25 de abril de 2019.
- [93] Quiñones, Camilo. (2010). *Lugeon test interpretation, revisited*. Collaborative Management of Integrated Watersheds. 30th Annual USSD Conference. Sacramento, California, Abril 12-16, 2010.
- [94] Rafi, Jaleddin. (2017). *Jacking of rocks fractures during pre-grouting in Scandinavian tunneling projects – a study of the effects from chosen grouting pressure*. BeFo. Rock Engineering Research foundation.
- [95] Ritchie, D. G.; Garcia, J. P.; Amaya, F.; y Jefferies, M. G. (2003). *Curtain Grouting for the Antamina Dam, Peru: Part 2—Implementation and Field Modifications*. ASCE, Grouting and Ground Treatment. Pag. 929–940
- [96] Ruiz, Luis Alejandro (2018). *Estado del arte en la impermeabilización de túneles en roca, casos, aplicaciones y recomendaciones*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

- [97] Singhal, B.B.S y Gupta, R.P. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Nueva York: Springer.
- [98] Sharpe C.J. y Deamen J.J. (1991). *Laboratory Testing of Cement Grouting of Fractures in Welded Tuff*. Department of Mining and Geological Engineering. University of Arizona.
- [99] Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Earth: an introduction to physical geology (8th ed)*. Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall.
- [100] U.S. Army Corps of Engineers. (1995). *Engineering and Design chemical grouting*. Manual No. 1110-1-3500.
- [101] U.S. Army Corps of Engineers. (1997). *Engineering and Design tunnels and shafts in rock*. Manual No. 1110-2-2901
- [102] U.S. Army Corps of Engineers. (2017). *Engineering and Design grouting technology*. Manual No. 1110-2-3506.
- [103] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014). *Design Standards No. 13. Embankment Dams Chapter 15: Foundation Grouting*. DS-13(15)-1: Phase 4 Final.
- [104] USACE Jacksonville District. Cerrillos Site Geology (Septiembre 1983). *Design morandum No. 4, Volume 2 of 5, Appendix C – Test Excavation and Test Grouting*.
- [105] Vélez, María Victoria; Ortiz, Carolina y Vargas, María Consuelo (2011). *Las aguas subterráneas: Un enfoque práctico*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- [106] Wang, L. K., Shammas, N. K., & Hung, Y.-T. (2007). *Biosolids Treatment Processes. Handbook of Environmental Engineering*. The Humana Press Inc., Totowa, NJ.
- [107] Warner, James. (2004). *Practical handbook of grouting. Soil, Rock, and Structures*. John Wiley & Sons, Inc.
- [108] Warner, James. (2007). *Proper grout rheology assures quality work*. ASCE.
- [109] Weave, Kenneth. y D. Bruce D. A. (2007). *Dam Foundation Grouting*. ASCE.
- [110] Wilson, D. B., y Dreese, T. L. (1998). *Grouting Technologies for Dam Foundations*. Acta de la conferencia anual de Association of State Dam Safety Officials. Las Vegas, Nevada.
- [111] Wilson, D. B., y Dreese, T. L. (2003). *Quantitatively Engineered Grout Curtains*. In *Grouting and Ground Treatment*, Editado por L. F. Johnsen, D. A. Bruce, and M. J. Byle, ASCE, Reston, Va., Geotechnical Special Publication No. 120, 881–892.
- [112] Wyllie, Duncan C. (2005). *Foundations On Rock*. Nueva York: Taylor & Francis e-Library.