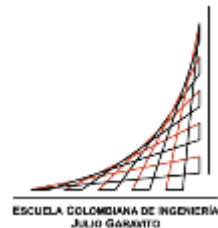


Maestría en Ingeniería Civil

Evaluación del comportamiento geomecánico de los mantos de carbón y materiales de respaldo de la Formación Guaduas en el Municipio de Sogamoso Departamento de Boyacá

Frankin Amaya Avendaño

Bogotá, D.C., 15 de agosto de 2019



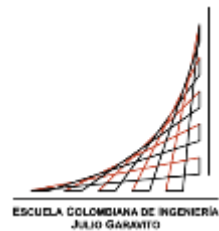
Evaluación del comportamiento geomecánico de los mantos de carbón y materiales de respaldo de la Formación Guaduas en el Municipio de Sogamoso Departamento de Boyacá

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

Ing. Ramiro Gutiérrez

Director

Bogotá, D.C., 15 de agosto de 2019



La tesis de maestría titulada “Evaluación del comportamiento geomecánico de los mantos de carbón y materiales de respaldo de la Formación Guaduas en el Municipio de Sogamoso Departamento de Boyacá”, presentada por Frankin Amaya Avendaño, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la tesis

Ing. Ramiro Gutiérrez

Jurado

Jairo Martín Espitia

Jurado

Edgard Robert Barbosa Cruz

Bogotá, D.C., 15 de agosto de 2019

Dedicatoria

A Dios, mis padres Gladys y Pablo, mi esposa Viviana, mis hijos Valeria y Francisco.

Agradecimientos

Al ingeniero Ramiro Gutiérrez por su guía compartiendo sus conocimientos y experiencia.

Al personal de los laboratorios de Geotecnia y Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería por su colaboración.

Al personal técnico y administrativo de la empresa INGEF S.A.S (Ingeniería, Geotecnia y Fundaciones), por su colaboración incondicional durante el desarrollo de las actividades de campo y laboratorio.

Resumen

Este estudio está enfocado a la profundización detallada de las variables o parámetros geomecánicos requeridos para el análisis, diseño y planeación de proyectos mineros para carbón dentro del sector Morcá en el municipio de Sogamoso-Departamento de Boyacá, incluyendo el reconocimiento geológico-geotécnico del área descrita y las zonas perimetrales, así como las observaciones en campo, la exploración del macizo rocoso mediante (15) quince estaciones de campo, *con* sus respectivos ensayos de campo y laboratorio; los cuales son aspectos fundamentales para la evaluación de las condiciones y parámetros geomecánicos de los diferentes niveles estratigráficos presentes en la Formación Guaduas, formación aflorante en el área de estudio.

Se presentan los resultados de estudio, ensayos de campo y laboratorio (Resistencia con Martillo Schmidt, resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la compresión uniaxial a partir del índice de carga puntual, resistencia a la tracción indirecta, expansión libre y controlada, resistencia a la compresión triaxial y petrografía, ya que son, junto con los análisis, la aplicación de los criterios de resistencia empíricos (Mohr-Coulomb y Hoek-Brown), clasificaciones geomecánicas (*RMR*, *GSI*), las características geológico-geotécnicas del macizo rocoso y las modelizaciones, las herramientas para determinar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso.

Se incluye las memorias de la investigación, registros de campo, ensayos de campo y laboratorio, planos esquemáticos correspondientes a la calidad de macizo rocoso, tablas de clasificación, análisis estadístico de resultados, parámetros de resistencia y modelos geológico-geotécnicos mediante programas de computador, que simulan las metodologías de explotación adoptadas en el sector de estudio.

Índice general

INTRODUCCIÓN.....	19
JUSTIFICACIÓN.....	20
OBJETIVOS 22	
Capítulo 1 Generalidades	23
1.1. Localización.....	23
1.2. Marco geológico	24
1.2.1. Geología regional (Reyes Chitaro, 1984).....	24
1.2.1.1. Estratigrafía regional	24
1.2.1.2. Tectónica	32
1.2.2.1. Estratigrafía local	34
1.2.2.2. Fallas	36
Capítulo 2 Marco teórico.....	38
2.1. Muestreo de los carbones y materiales de respaldo (ECOCARBÓN, 1995)	38
2.1.1. Objetivo del muestreo de carbones y materiales de respaldo	38
2.1.2. Tipos de muestreo en un proyecto minero	39
2.1.2.1. Muestreo durante la fase de exploración y desarrollo.....	39
2.2. Tipos de ensayos de mecánica de rocas efectuados para la caracterización geomecánica de los materiales rocosos.	41
2.2.1. Ensayos de campo	41
2.2.1.1. Medida del rebote con Martillo Schmidt.....	41
2.2.2. Ensayos de laboratorio de resistencia y deformabilidad	45
2.2.2.1. Ensayo de carga puntual.....	45
2.2.2.2. Ensayo uniaxial o de compresión simple.....	47
2.2.2.3. Ensayo de compresión triaxial.....	48
2.2.2.4. Ensayo de tracción indirecta o brasileño.	51
2.2.2.5. Ensayo para la determinación de materiales expansivos	52
2.2.3. Petrografía.....	55
2.2.3.1. Petrografía de carbones.....	55
2.2.3.2. Petrografía de los materiales de respaldo (limolita arcillosa)	59
2.3. Tipos de terreno	59
2.3.1. Roca intacta o matriz rocosa	62
2.3.2. Macizo rocoso	66
2.3.3. Comparación entre tipos de terreno.....	79
2.3.4. Distribución de esfuerzos en túneles	80
2.3.4.1. Esfuerzos en rocas duras.....	80

2.3.5.	Resistencia del terreno	82
2.3.5.1.	Resistencia de rocas blandas.....	82
2.3.5.2.	Resistencia de rocas duras	83
2.3.5.3.	Mecanismos de falla del terreno.....	84
2.4.	Modelos constitutivos o criterios de falla.....	97
Capítulo 3	Ejemplo representativo de mina de carbón para el municipio de Sogamoso	
	101	
3.1.	Descripción del ejemplo de mina de carbón para el municipio de Sogamoso..	102
3.2.	Terminología del componente geométrico de secciones de túneles y obras subterráneas de explotación de carbón. (Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA)	108
Capítulo 4	Caracterización geomecánica.....	111
4.1.	Metodología para la realización del proyecto	111
4.2.	Sectorización geotécnica.....	112
4.3.	Toma de muestras en campo	114
4.4.	Ensayos de campo realizados para caracterización geomecánica	116
4.4.1.	Medida de rebote con martillo Schmidt.....	116
4.5.	Ensayos de laboratorio realizados para caracterización geomecánica	117
4.5.1.	Ensayo de resistencia a la compresión uniaxial.....	117
4.5.2.	Peso unitario.....	121
4.5.3.	Carga puntual.....	122
4.5.4.	Tracción indirecta	123
4.5.5.	Compresión triaxial.....	124
4.5.6.	Expansividad de los materiales arcillosos.....	125
4.6.	Análisis petrográfico para caracterización física de los materiales estudiados.	126
4.6.1.	Análisis petrográfico del carbón.....	126
Capítulo 5	Resultados y análisis	129
5.1.	Resultados de ensayos en campo para caracterización geomecánica	129
5.1.1.	Resultados ensayo medida de rebote con Martillo Schmidt.....	129
5.1.1.1.	Análisis estadístico para los resultados de rebote con Martillo Schmidt	131
5.2.	Resultados de ensayos de laboratorio para caracterización geomecánica	133
5.2.1.	Resultados de pesos unitarios de los materiales rocosos analizados (carbón, limolita arcillosa de techos y pisos inmediatos).....	133
5.2.1.1.	Análisis estadístico para los resultados de pesos unitarios	136
5.2.2.	Resultados de compresión uniaxial de los materiales rocosos analizados (carbón, arcillolita de techos y pisos inmediatos).....	138
5.2.2.1.	Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión uniaxial.	
	140	
5.2.2.2.	Resultados de los parámetros elásticos en los materiales estudiados (carbón).	
	144	
5.2.3.	Resultados de carga puntual de los materiales rocosos analizados (carbón, arcillolita de techos y pisos inmediatos).....	146

5.2.3.1.	Análisis estadístico para los resultados de carga puntual.....	148
5.2.4.	Resultados de la resistencia a la tracción indirecta-método brasileiro de los materiales rocosos analizados (carbón, arcillolita de techos y pisos inmediatos).....	150
5.2.4.1.	Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la tensión indirecta.	152
5.2.5.	Resultados de compresión triaxial del material rocoso analizado (carbón).	154
5.2.6.	Resultados ensayos de expansión sobre los materiales rocosos analizados (arcillolita de pisos inmediatos).	155
5.2.6.1.	Caracterización de los materiales arcillosos del sector.....	156
5.2.7.	Correlación entre las distintas pruebas en laboratorio de resistencia sobre los materiales analizados.	159
5.3.	Resultados de análisis petrográfico del carbón.....	161
5.3.1.	Resultados petrográficos técnica de reflectancia	161
5.3.2.	Resultados petrográficos contenido maceral.	162
5.4.	Parámetros de resistencia de roca intacta y macizo rocoso.....	163
Capítulo 6	Evaluación geomecánica. Caso de estudio: Mina La Pared.....	166
6.1.	Características generales del sector de estudio.....	166
6.1.1.	Localización.....	166
6.2.	Modelización geotécnica de los problemas comunes detectados dentro de las labores subterráneas de explotación.	167
6.2.1.	Análisis de cuñas de roca dentro de las excavaciones	167
6.2.2.	Análisis de esfuerzos y deformaciones dentro de las excavaciones	171
CONCLUSIONES	185
Bibliografía	189

Índice de tablas

Tabla 1. Consolidado focos de accidentalidad en la Provincia de Sugamuxi.	21
Tabla 2. Clasificación geológica de las rocas.....	63
Tabla 3. Clasificación de roca intacta según su grado de meteorización.....	64
Tabla 4. Clasificación mecánica de la roca intacta – Deere y Miller.	64
Tabla 5. Clasificación mecánica de la roca intacta.....	65
Tabla 6. Clasificación mecánica de la roca intacta según su módulo relativo-Deere y Miller.	66
Tabla 7. Clasificación del macizo rocoso según el índice RQD.....	67
Tabla 8. Clasificación del macizo rocoso según el índice de velocidad relativa.....	68
Tabla 9. Carta para determinar el valor del índice GSI.....	69
Tabla 10. Parámetros de clasificación del macizo rocoso – RMR (Bieniawski, 1989).	71
Tabla 11. Factores de corrección por orientación de discontinuidades – RMR (Bieniawski, 1989).	71
Tabla 12. Clasificación del macizo rocoso – RMR (Bieniawski, 1989).....	72
Tabla 13. Clasificación del macizo rocoso – Q (Barton, 1994).	73
Tabla 14. Índice de diaclasado, $J_n - Q$ (Barton, 1994).....	74
Tabla 15. Índice de rugosidad de las discontinuidades, $J_r - Q$ (Barton, 1994).	74
Tabla 16. Índice de alteración de las discontinuidades, $J_a - Q$ (Barton, 1994).	75
Tabla 17. Coeficiente de influencia del estado de esfuerzos, SRF – Q (Barton, 1994).....	76
Tabla 18. Índice de diaclasado, $J_n - Q$ (Barton, 1994).....	77
Tabla 19. Coeficiente de influencia del estado de esfuerzos, SRF – Q (Barton, 1994).....	78
Tabla 20. Factor de reducción por la presencia de agua, $J_w - Q$ (Barton, 1994).	79
Tabla 21. Tipo de falla del terreno según el material que lo compone.....	85
Tabla 22. Mecanismos de falla en minería de carbón dentro del Municipio de Sogamoso.	97
Tabla 23. Resultados de constantes elásticas halladas en laboratorio sobre probetas de carbón.	145
Tabla 24. Resultados de los ensayos triaxiales-carbón.....	155
Tabla 25. Resultados de las pruebas de expansión en materiales arcillosos (arcillolita de piso).....	156

Tabla 26. Minerales reconocidos a través de la petrografía óptica de la roca de estudio (Mendivil,2019).	157
Tabla 27. Resultados obtenidos para el factor k	159
Tabla 28. Resultados reflectancia de la vitrinita.	161
Tabla 29. Contenido de vitrinoides.....	161
Tabla 30. Contenido maceral del material analizado.....	162
Tabla 31. Parámetros de resistencia del macizo rocoso obtenidos.	165
Tabla 32. Parámetros adoptados para la modelación de cuñas de roca.	167
Tabla 33. Geometría de las secciones analizadas dentro de las labores subterráneas..	168
Tabla 34. Parámetros empleados para el análisis de deformaciones.....	173
Tabla 35. Factor de reducción de la magnitud de la presión al interior de la excavación	176

Índice de figuras

Figura 1. Localización sitio de estudio	23
Figura 2. Columna estratigráfica regional.....	31
Figura 3. Columna estratigráfica local.....	35
Figura 4. Mapa geológico local.	37
Figura 5. Tipos de muestras de carbón.....	41
Figura 6. Gráfico de correlación para el martillo Schmidt entre resistencia a compresión, densidad de la roca y rebote (Miller, 1965).	44
Figura 7. Correlación entre el índice Is y la resistencia a la compresión simple de la roca.	46
Figura 8. Esquema de una celda triaxial (Hoek y Brown, 1980).	51
Figura 9. Esquema del ensayo de tracción indirecta (izquierda), imagen que muestra la rotura del espécimen después de la aplicación de la carga (derecha).	52
Figura 10. Perfiles de meteorización de diferentes autores.....	62
Figura 11. Evolución del proceso de creep en el tiempo.	90
Figura 12. Criterio de Mohr Coulomb.	98
Figura 13. Criterio de Hoek – Brown.	100
Figura 14. Esquema de explotación y preparación.	103
Figura 15. Corte esquemático del manto de carbón.....	104
Figura 16. Esquema de preparación.	105
Figura 17. Esquema de explotación.....	106
Figura 18. Esquema de puerta alemana utilizada para el sostenimiento en minas de carbón.	108
Figura 19. Partes de la palanca.	109
Figura 20. Tiples de madera usados en el sostenimiento de las excavaciones para explotación	109
Figura 21. Madera de forro utilizada para evitar desprendimientos de roca.	110
Figura 22. Metodología para la realización del proyecto.	111
Figura 23. Sectorización geotécnica zona de estudio	113
Figura 24. Representación gráfica del registro de deformaciones con deformímetros tipo Strain Gauge durante los ensayos de compresión uniaxial.	121

Figura 25. Representación esquemática de los resultados de resistencia comparativa a la compresión (martillo Schmidt) para los materiales geológicos estudiados.	130
Figura 26. Distribución normal valores de resistencia comparativa a partir de Martillo Schmidt en carbón.....	131
Figura 27. Distribución normal valores de resistencia comparativa a partir de Martillo Schmidt en arcillolita de piso.....	132
Figura 28. Distribución normal valores de resistencia comparativa a partir de Martillo Schmidt en arcillolita de techo.	133
Figura 29. Representación esquemática de los resultados de pesos unitarios para los materiales geológicos estudiados.	135
Figura 30. Distribución normal valores de pesos unitarios obtenidos - carbón.	136
Figura 31. Distribución normal valores de pesos unitarios obtenidos - arcillolita de piso.	137
Figura 32. Distribución normal valores de Pesos unitarios obtenidos - arcillolita de techo.	138
Figura 33. Representación esquemática de los resultados de resistencia a la compresión uniaxial para los materiales geológicos estudiados.....	139
Figura 34. Distribución normal valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos - carbón.	140
Figura 35. Distribución normal valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos – arcillolita de piso.	141
Figura 36. Distribución normal valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos – arcillolita de techo.	142
Figura 37. Clasificación según la resistencia a la compresión uniaxial de los tipos de rocas estudiadas.	143
Figura 38. Relación entre peso unitario y resistencia a la compresión de las rocas estudiadas	144
Figura 39. Clasificación de la roca analizada según el Módulo Relativo	145
Figura 40. Representación esquemática de los resultados de carga puntual para los materiales geológicos estudiados.	147
Figura 41. Distribución normal resistencia a la compresión uniaxial a partir del índice de carga puntual - carbón.....	148
Figura 42. Distribución normal resistencia a la compresión uniaxial a partir de índice de carga puntual – arcillolita de piso.	149

Figura 43. Distribución normal resistencia a la compresión uniaxial a partir de índice de carga puntual – arcillolita de techo.....	150
Figura 43. Representación esquemática de los resultados de resistencia a la tensión indirecta para los materiales geológicos estudiados.	151
Figura 45. Distribución normal resistencia a la tensión indirecta - carbón.	152
Figura 46. Distribución normal resistencia a la tensión indirecta – arcillolita de piso.	153
Figura 47. Distribución normal resistencia a la tensión indirecta – arcillolita de techo....	154
Figura 48. Macrofotografía de Limolita de grano grueso (Mendivil, 2019)	157
Figura 49. Difractograma de la Limolita arcillosa (Mendivil 2019).....	158
Figura 50. Correlación propuesta entre la resistencia a la compresión uniaxial y el índice de carga puntual-carbón.....	159
Figura 51. Correlación propuesta entre la Resistencia a la compresión uniaxial y el índice de carga puntual- arcillolita de piso.....	160
Figura 52. Correlación propuesta entre la Resistencia a la compresión uniaxial y el índice de carga puntual- arcillolita de techo.....	160
Figura 53. Microscopía del carbón analizado.....	163
Figura 54. Parámetros geomecánicos de roca intacta de acuerdo al criterio de rotura Hoek-Brown.	164
Figura 55. Análisis de cuñas sección 0+80 (inclinado principal).....	168
Figura 56. Análisis de cuñas sección 0+150 (inclinado principal).....	169
Figura 57. Análisis de cuñas sección 0+180 (Nivel 1).	169
Figura 58. Análisis de cuñas sección 0+193 (Nivel 2)	170
Figura 59. Análisis de cuñas sección 0+220 (Nivel 3)	170
Figura 60. Discretización del modelo	172
Figura 61. Sección de análisis para el inclinado principal.	174
Figura 62. Sección de análisis para las galerías de explotación.	174
Figura 63. Ábaco para determinar la deformación a partir de la zona plástica	177
Figura 64. Gráfico desplazamiento total vs etapa.	178
Figura 65. Modelo de deformación de la excavación sin sostenimiento-inclinado principal	180
Figura 66. Modelo de la excavación con sostenimiento- inclinado principal.....	181
Figura 67. Modelo de las excavaciones con sostenimiento-galerías de explotación	182

Figura 68. Modelo de excavación propuesto con sección circular y arcos en acero-inclinado principal 183

Índice de fotos

Foto 1. Manto de carbón en contacto con arcillolita de piso-Formación Guaduas.....	33
Foto 2. A. Equipo para ensayo de carga puntual en rocas. B. Mecanismo de puntas cónicas para rotura de probeta en carbón.....	45
Foto 3. Rotura de probeta en carbón- ensayo de compresión simple.	47
Foto 4. Probeta preparada para el ensayo de compresión simple, con bandas extensométricas para la medida de deformaciones axial y transversal o radial.....	48
Foto 5. Probeta preparada para el ensayo de compresión triaxial,.....	49
Foto 6. Rotura de probeta en carbón- ensayo de compresión triaxial.	50
Foto 7. Ensayo de expansión libre.	54
Foto 8. Consolidómetro usado para el ensayo de expansión controlada.....	55
Foto 9. Entrada a las labores de explotación subterránea (bocamina).	110
Foto 10. Muestreo realizado tipo columna de un litotipo.	114
Foto 11. Extracción de núcleos de roca para caracterización físico-mecánica en laboratorio	115
Foto 12. Toma de lecturas con Martillo Schmidt sobre afloramientos de carbón y materiales de respaldo tanto en superficie como en labores subterráneas de explotación.....	116
Foto 13. Refrentado de caras usando azufre para las muestras de roca ensayadas a compresión uniaxial.	118
Foto 14. Instalación de Strain Gauge para medición de deformaciones durante la prueba de resistencia a la compresión uniaxial.....	119
Foto 15. Equipo universal SHIMADSU UH-1000kNX empleado para las pruebas de compresión simple.....	119
Foto 16. Representación gráfica de los resultados de los ensayos de compresión uniaxial (software TRAPEZIUM X).	120
Foto 17. Toma de datos (dimensiones geométricas y pesos) en probetas cilíndricas de roca.	122
Foto 18. Pruebas de carga puntual en muestras cilíndricas e irregulares.	123
Foto 19. Ensayo de tracción indirecta sobre muestras cilíndricas de los materiales rocosos analizados.	124
Foto 20. Proceso para realización de ensayo triaxial en probetas de carbón.....	125
Foto 21. Ensayos de expansión.	126

Foto 22. Secuencia de la preparación de probeta pulida para análisis petrográfico	128
Foto 23. Rotura de las puertas de sostenimiento.....	179

Índice de Anexos

Anexo 1. ESTACIONES DE CAMPO	193
Anexo 2. ENSAYOS DE CAMPO.....	204
Anexo 3. ENSAYOS DE LABORATORIO	213

INTRODUCCIÓN

En nuestro país la industria minera constituye una de las principales ramas de la economía, estimula el desarrollo de la industria, asegura el abastecimiento de las principales materias primas e influye directamente en el desarrollo económico y social del país, ya que la construcción de obras subterráneas para la explotación de carbón ha aumentado en los últimos años. Para garantizar la estabilidad de dichas obras y por ende la seguridad, se deben realizar estudios del macizo rocoso, de una manera más racional, con el objetivo de conocer cuáles son sus características y, al menos, estimar cuál será su comportamiento durante el proceso de explotación y luego de su abandono o cierre.

En gran parte de la minería de carbón que se lleva a cabo en el departamento de Boyacá, específicamente en el Municipio de Sogamoso, no se realiza con estudios adecuados del macizo rocoso donde están emplazadas las labores mineras, o existen insuficiencias en el alcance y contenido de esos estudios, ya que las obras subterráneas se realizan muy artesanalmente por lo que continúan presentándose problemas de estabilidad. Al ser deficiente la investigación geotécnica, así como lo procedimientos es claro que las soluciones geotécnicas tienden a ser incorrectas, con gastos excesivos y afectaciones a la seguridad de los trabajadores durante las labores mineras que se realizan.

Se presenta en primer lugar el resultado de la revisión bibliográfica acerca del marco geológico regional y local, el estado del conocimiento sobre parámetros y variables geomecánicas, posteriormente, se incluye la metodología empleada para el desarrollo del proyecto y finalmente tanto los resultados como las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

JUSTIFICACIÓN

En gran parte de la minería de carbón que se desarrolla en el municipio de Sogamoso, los macizos rocosos no son diferenciados para su estudio y adopción de medidas, de acuerdo al comportamiento variado que puede presentar una misma litología en las excavaciones y obras subterráneas de explotación, causado por que, en la mayoría de los casos han sido afectadas por diferentes eventos tectónicos, o sencillamente, la zona en cuestión puede haber sido afectada por el método de explotación empleado. Por lo que habitualmente se fortifica o refuerza después que ya se han producido pérdidas de estabilidad, o sencillamente se fortifica toda la excavación, “preventivamente”, considerando que el comportamiento del macizo será igual al de otras labores mineras ya ejecutadas en la región.

La formulación del problema parte del hecho de que, si se realiza una caracterización geomecánica de los macizos rocosos en forma adecuada, entonces se posibilita la diferenciación de los mismos de acuerdo a su comportamiento, lo que permitiría alcanzar soluciones de proyecto y constructivas de las obras subterráneas más económicas y seguras., reduciendo así, el progresivo aumento de accidentalidad dentro de las labores de explotación.

➤ **Diagnóstico de la accidentalidad en la pequeña y mediana minería subterránea de la provincia de Sugamuxi¹**

Los registros acerca de la accidentalidad en la provincia del Sugamuxi, se discriminan por municipio y por año desde el 2009, dicha información muestra el comportamiento de la accidentalidad reportada por cada municipio de la provincia; donde se destaca el mayor número de accidentes en este periodo de tiempo se han presentado en Sogamoso con 691, seguido por Tópaga con 361, Mongua con 206 y Gámeza con 129 cada uno. Teniendo en

¹ R.Ramírez Carlos H, Sierra G Miguel A. Diagnóstico de la accidentalidad en la pequeña y mediana minería subterránea de la provincia de Sugamuxi. UPTC Facultad seccional Sogamoso.2016.

cuenta que las mayores causas de accidentalidad, corresponden a derrumbes, explosiones por CH₄ (gas metano) y por presencia de gases (CO₂-CO) o deficiencia de oxígeno.

CONSOLIDADO FOCOS DE ACCIDENTALIDAD								
MUNICIPIO	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	TOTAL
SOGAMOSO	47	44	65	126	122	145	142	691
TOPAGA	26	27	53	49	48	86	72	361
GAMEZA	5	10	26	20	27	25	16	129
MONGUI	6	12	20	16	20	19	18	111
MONGUA	7	17	41	78	22	19	22	206
IZA			5	1	8	10	4	28
CUITIVA			1			1		2
PESCA				1	1	1	1	4
TOTA	1	2						3
TOTAL	92	112	211	291	248	306	275	1535

Tabla 1. Consolidado focos de accidentalidad en la Provincia de Sugamuxi.

Fuente: Adaptado de Ramírez (2016).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general es caracterizar desde el punto de vista geomecánico los mantos de carbón y materiales de respaldo de la Formación Guaduas dentro de la zona de explotación del municipio de Sogamoso en el departamento de Boyacá y evaluar los procedimientos de excavación y sostenimiento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio geológico y geotécnico de los macizos rocosos en carbones.
- Revisar el sistema de explotación y sostenimiento de minas de carbón en la zona mencionada.
- Inspeccionar la metodología de análisis en minas de carbón para caracterización de macizos rocosos y de procedimientos de excavación y sostenimiento.
- Llevar a cabo la caracterización geomecánica con ensayos de laboratorio de muestras de roca tomadas de los mantos de carbón de varias minas dentro de la zona de explotación del municipio de Sogamoso.
- Determinar los parámetros geomecánicos de los macizos estudiados.
- Definir mecanismos de falla en varias minas de carbón en los sitios mencionados.
- Proponer los modelos geomecánicos más representativos de los macizos rocosos de las minas estudiadas.

Capítulo 1 Generalidades

1.1. Localización

Sogamoso está situado en el centro-orientado del departamento de Boyacá en la región del Alto Chicamocha. Es la capital de la Provincia de Sugamuxi, se encuentra a 228,5 km al noreste de Bogotá, la capital de Colombia, y a 75,8 km de Tunja, la capital del departamento de Boyacá. Posee una altitud de 2.569 m, tiene temperaturas promedio de 18 °C. La base económica de la ciudad es el comercio interregional entre los Llanos Orientales y el centro del país; la industria siderúrgica y de materiales de construcción; y la explotación de calizas y carbón. Se le conoce como la Ciudad del Sol y del Acero.

El área de estudio corresponde al sector Morcá del municipio de Sogamoso, el cual se encuentra aproximadamente a cuatro kilómetros hacia el sector norte del casco urbano de la ciudad, y es en este sector donde se encuentran concentradas las labores de explotación de carbón del municipio de Sogamoso.

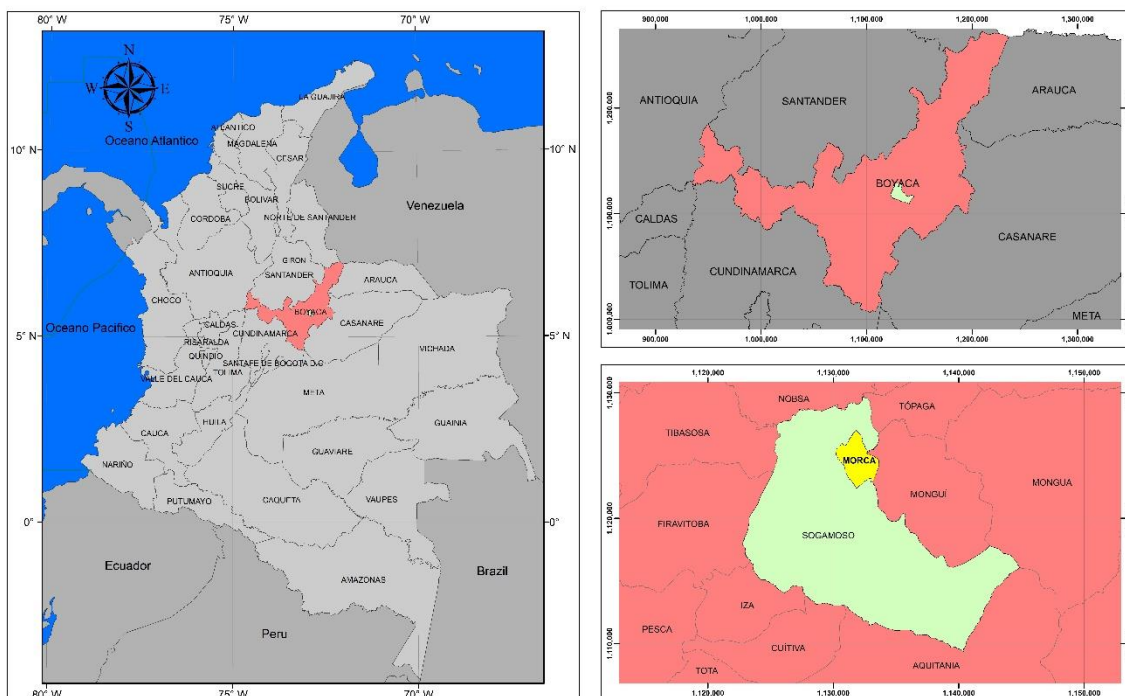


Figura 1. Localización sitio de estudio

Fuente: propia

1.2. Marco geológico

1.2.1. Geología regional (Reyes Chitaro, 1984)

1.2.1.1. Estratigrafía regional

Las cuatro grandes discordancias presentes en la región dividen la secuencia estratigráfica en cinco conjuntos principales: Basamento cristalino, Serie del Paleozoico superior, Serie Molásica Mesozóica, Serie Cretácico-terciaria, Depósitos Post- Andinos.

El basamento cristalino.

Existe un conjunto de rocas ígneas y metamórficas, que subyace a los estratos sedimentarios. Este basamento consiste de esquistos, cuarcitas y filitas sumamente plegados, asociados con gneis. Intrusiones ácidas de tipo granítico atraviesan las rocas metamórficas, pero no hay evidencia de que esto ocurra dentro de la serie sedimentaria. La edad de las rocas del basamento es claramente pre- devónica, quedando encuadrada dentro del cambro-ordovícico (Cediel 1969).

La serie del Paleozoico superior

- Formación Floresta-Dmf.

(Cediel 1969) dividió en dos miembros la formación de acuerdo a las características litológicas. El miembro inferior, denominado “El Tíbet”, está compuesto por areniscas de grano medio, a veces conglomeráticas, de color gris amarillento, con escasos interbankos de arcillolitas y con un conglomerado basal de elementos hasta de cuatro centímetros de diámetro, que se apoya sobre las rocas del basamento cristalino. El miembro superior, denominado “Floresta”, consta casi exclusivamente de arcillolitas amarillentas, a veces arenosas, con niveles de abundante fauna marina fósil.

- Formación Cuche-Cc.

Botero Restrepo (1950) denominó así a la secuencia de limolitas, arcillolitas y areniscas aflorante en el sector comprendido entre el caserío de Cuche y el pueblo de Nobsa.

En la región de Cuche pueden observarse claramente dos conjuntos. El inferior compuesto de arcillolitas y limolitas de color amarillento, bien estratificadas, sobre la que reposan unos bancos de arenisca masiva con estratificación cruzada y arcillolitas rojo vino tinto, que determinan una morfología suave del terreno. El conjunto superior consta de areniscas compactas pardas, bien estratificadas, con interbancos de arcillolita roja, que forman una morfología abrupta observable en los cerros al noroeste de Nobsa y en el cañón del Río Soapága.

La serie Molásica Mesozoica

- Formación Girón-Jg

Cediel (1969) anota: “consiste en una serie de conglomerados predominantemente, con intercalaciones de areniscas conglomeráticas, a veces de grano medio también, y ocasionalmente arcillolitas en capas delgadas.

La serie Cretácico-Terciaria

- Formación Tibasosa-Kit.

La formación se divide claramente en tres miembros característicos. El inferior, predominantemente arenoso, presenta un conglomerado de base, seguido por intercalaciones de limolitas moradas, azulosas y verdosas con areniscas friables de grano grueso, cuyos elementos son esencialmente de cuarzo, feldespato y fragmentos de rocas metamórficas y sedimentarias, en una secuencia muy característica. Las limolitas verdosas marcan el paso a una serie de bancos de arenisca compacta, de color pardo claro, de grano

fino, que se torna calcárea y friable hacia la parte superior. El miembro intermedio presenta una alternancia de limolitas verdosas con bancos de 3 m de caliza, en parte arenosa, con abundantes recristalizaciones en calcita que dan un aspecto travertinoso. El miembro superior consta esencialmente de arcillolitas fisibles verdosas con intercalaciones de capas delgadas y nódulos de caliza. Hacia el techo se localizan unos bancos de arenisca calcárea gris con interbancos de arcillolita gris.

- Formación Belencito-Kib.

La parte inferior consta de 30 m de arcillolitas negruzcas y algunos niveles arenosos, seguidos por bancadas de arenisca cuarcítica que pueden alcanzar los 80 m de espesor. Sobre éstas yace una serie netamente calcárea constituida por una continua alternancia de bancos de caliza, margas, arcillolitas calcáreas y areniscas. Una zona arcillosa de unos 80m de espesor separa la serie calcárea en dos conjuntos, fácilmente reconocibles en la región por la topografía abrupta que ocasionan. Los 20 m superiores están formados por arcillolitas negras fisibles, que se tornan gris claro hacia el techo.

- Formación Une-Kmu.

Renzoni (1981) denominó así el conjunto estratigráfico correspondiente a las Areniscas de Une, tal como fueron descritas por Hubach (1957).

En la base de la formación se halla un banco de arenisca cuarzosa amarilla o cuarcítica gris, intercalado entre arcillolitas fisibles de color gris claro. Encima yacen gruesos bancos de arenisca cuarcítica blanca (con acrecimiento de los granos de cuarzo), con estratificación cruzada y sumamente compactas, que resaltan en la topografía formando zonas escarpadas características.

- Formación Ermitaño-Kse.

Alvarado B. y Sarmiento R. (1944) denominaron así a la sección aflorante del Cretáceo Superior marino en la localidad de El Ermitaño al noreste de Paz de Río.

La formación consta de tres miembros. El inferior está constituido de chert negro y limolitas silíceas blancas en capas de 10 a 15 cm, con intercalaciones de bancos delgados de calizas y de areniscas fosfáticas. El miembro intermedio está formado de arcillolitas fisibles grises con algunas intercalaciones de areniscas calcáreas en la parte inferior, mientras que la parte superior consta de unos 30 m de areniscas grises duras en bancos gruesos. El miembro superior está constituido por 80 m de shale calcáreo, siendo característico un banco de 3 m de caliza lumaquéllica hacia la parte media. La parte extrema superior está compuesta de areniscas cuarzosas duras en bancos de 3 a 6 m, que forman escarpes característicos.

- Formación Guaduas-Ksg.

Alvarado B. y Sarmiento R. (1944) denominaron Formación Guaduas al conjunto de estratos que contiene los mantos de carbón explotables, por analogía con la formación homónima definida por Hettner (1892) en la región de Guaduas, Cundinamarca.

La formación está constituida de dos miembros. El inferior, compuesto casi exclusivamente de arcillolitas fisibles negruzcas, con esporádicas zonas arenosas, alcanza un espesor de 190 m (Guaduas estéril). El miembro superior consta de continuas alternancias de areniscas delgadas, arcillolitas y mantos de carbón, con un espesor total de aproximadamente 230 m. Las areniscas presentes en la parte media del miembro superior son típicamente lajosas, de grano fino a mediano y miden alrededor de 11 m de espesor. Un kilómetro al noreste de la estación de Peñablanca, en el ferrocarril Belencito-Paz de Río, las areniscas afloran en estratos de 50 cm con marcas de oleaje y color rojizo. Los mantos de carbón varían en número de 8 a 10, de los cuales los explotables tienen espesores entre 1 y 3.5 metros. Se trata de carbones bituminosos con contenido promedio de carbono fijo de 31% y un poder calorífico de 6500 a 7900 cal/g.

Espesor: en la sección de Tópaga la formación alcanza una potencia de 410 m, valor similar al que puede medirse 25 km al noreste en la zona de La Chapa (Paz de Río). Raras son las buenas exposiciones de la formación debido a que generalmente se encuentra disturbada por fallas longitudinales que alteran su espesor. Los mejores afloramientos pueden observarse entre Sochaviejo y la Mina La Chapa y en el sector de Morcá en Sogamoso. La

sección completa del miembro superior es observable sobre la margen izquierda del Río Gámeza (La Peña), sobre la margen izquierda del Río Chicamocha aguas abajo de Puente Reyes, en Tasco (Quebrada Carbonera).

Limites estratigráficos: La base de la Formación Guaduas se coloca en el contacto entre las arcillolitas fisibles del miembro inferior y las areniscas de techo del Ermitaño, que marcan la terminación de la sedimentación marina. El límite superior se localiza a la base de unos bancos característicos de arenisca dura, con estratificación cruzada, de gran continuidad regional.

Edad y origen: Van Der Hamen (1955) asigna a esta formación una edad Maestrichtiano Superior con base en el análisis palinológico de los mantos de carbón. el límite Cretáceo-Terciario coincide bien con el contacto Guaduas- Socha Inferior, tal como se propone para la zona estudiada. La Formación Guaduas es un clásico depósito de facies “parálica”, en lagunas y pantanos de gran extensión adyacentes a la línea de costa. Areniscas glauconíticas presentes en la parte media del miembro superior indican invasiones marinas temporales.

La alternancia de mantos de carbón con areniscas y arcillolitas significa constantes oscilaciones verticales de la zona costera.

Correlación: de acuerdo a las determinaciones de edad por vía palinológica, la Formación Guaduas de la región estudiada se correlaciona con la parte inferior y media del Guaduas de la cuenca de Lenguazaque-Samacá y la Formación Catatumbo de la serie de Norte de Santander.

- Formación Socha Inferior-Tpsi.

La formación consiste de potentes bancos de arenisca cuarzosa, de grano variable, que yacen sobre un conjunto de arcillolitas alternantes con areniscas en estratos delgados. Es característico en la base de la formación un banco de arenisca parda, dura, de grano mediano, con estratificación cruzada, cuyo espesor varía entre 9 y 15 m. las arcillolitas

localizadas por encima de esta arenisca son blandas, de color gris claro a lila, a veces con niveles carbonosos, y pasan a arcillas plásticas rojizas hacia arriba. Siguen arcillolitas grises alternadas con pequeños bancos de arenisca de grano fino.

Las areniscas principales (Areniscas de Socha), masivas, en bancos hasta de 30 m de espesor, pueden cubrir las 2/3 partes de la formación. Son frecuentes sobre la superficie de los estratos de arenisca las estructuras de sedimentación como “ripples” y otras marcas de corriente. Hay zonas con marcada estratificación cruzada.

- Formación Socha Superior-Tpss.

La formación está constituida esencialmente de arcillolitas con algunas intercalaciones características de areniscas. Hay tres niveles importantes de arenisca de gran continuidad regional. En general, la Formación Socha Superior puede dividirse en tres partes. La inferior consta de 37 m de arcillolitas y limolitas de color gris claro, sobre las que yacen varios bancos de arenisca con interbancos de arcillolita. Hay algunos mantos delgados de lignito de distribución irregular. Siguen luego 40 m de arcillolitas grises. La parte intermedia consta de intercalaciones de bancos de arenisca con arcillolitas limosas de color gris claro a verdoso, compactas, que alcanzan un total de 86 m de potencia. Un grupo de areniscas se concentra hacia la zona media con un espesor de 32 m en bancos hasta de 8 m. la parte superior mide alrededor de 70 m y está compuesta de arcillolitas abigarradas, de color rojo, verdoso, morado y lila (33 m), sobre las que yace un potente banco de arenisca de grano grueso y estratificación cruzada (10 a 20 m). Los 12 m superiores de la formación están constituidos de arcillolitas rojas con intercalaciones arenosas, culminando con arcillolitas verdosas fisibles.

- Formación Picacho-Tep.

La formación picacho es predominantemente arenosa. Las areniscas son de color blanco a pardo, bastante limpias, masivas, moderadamente duras a friables, de grano fino a grueso, con niveles conglomeráticos. El miembro inferior consta de gruesos bancos de arenisca (las bancadas en algunos casos pueden alcanzar los 50 m), que siendo muy porosa

frecuentemente tiene zonas impregnadas de asfalto. El miembro superior está constituido hasta en un 60% de arcillolita, en parte arenosa., con dos intercalaciones importantes de arenisca.

- Formación Concentración- Toc.

La Formación Concentración puede dividirse en dos conjuntos. El inferior presenta en la base una arenisca gris de grano fino, de uno a dos metros de espesor, sobre la que yace un banco de mineral de hierro oolítico rojizo de 2 a 12 m de potencia. Sobre el mineral descansa un conjunto de 150 m de arcillolitas negruzcas, piríticas, con rastros carbonosos de vegetales y una arenisca de grano fino, con sedimentación bioturbada (Arenisca Crespa), localizada 60 m por encima del banco de mineral. Siguen 110 m de arcillolita pizarrosa gris con intercalaciones importantes de arenisca de grano fino, micácea, y algunas cintas de lignito. Sobre esta parte yacen 150 m de arcillolitas fisibles gris-verdosas con frecuentes intercalaciones de bancos delgados de arenisca de grano fino, arcillosas, especialmente en la porción inferior.

- Depósitos Post-andinos

El plegamiento principal andino, que se inició en el Mioceno, culminó con la formación de la cordillera oriental. La gran cantidad de material proveniente del constante desmantelamiento erosivo se fue acumulando en las depresiones de la región.

Tratándose de cuencas sedimentarias intermontanas, los depósitos post-andinos presentan suma irregularidad y su historia geológica es compleja y difícil de descifrar. Tales depósitos consisten en rellenos aluviales, sedimentos lacustres y fluviales, terrenos glaciales y materiales coluviales, en muchos casos entrelazados unos con otros para formar depósitos mixtos.

En la Figura 2, se muestra la columna estratigráfica regional, correspondiente a la geología regional anteriormente descrita

SERIE CRETACICA										EDAD	DESCRIPCIÓN		
T E R C I A R I A										PERIODO			
E O C E N O - O L I G O C E N O										FORMACIÓN			
F. C O N C E N T R A C I Ó N										ESPESOR			
HAUTERVIANO - BARBASTROSA F. M. TRIBASOSA											520m	Q	Depósitos recientes Depósitos fluvio-lacustres Depósitos coluviales, Depósitos glaciales
											4.00m		Arcillolitas con intercalaciones de bancos de arenisca. En la base se presenta un banco de oolita ferrifera.
											210m		Areniscas conglomeráticas masivas, blancas, con intercalaciones arcillosas en la parte superior
											257m		Arcillolita con algunas intercalaciones de arenisca arcillosa.
											130m		Areniscas masivas con intercalaciones arcillosas en la parte inferior.
											420m		Arcillolitas grises carbonosas con intercalaciones de areniscas y mantos de carbón en la parte superior.
											500m		Arcillolitas fisibles negras con intercalaciones de areniscas fosilíferas y liditas de origen marino.
											300m		Lutitas grises con bancos gruesos de arenisca gris claro
											300m		Secuencia de lutitas grises con esporádicas capas de arenisca y limolita. Bancos de caliza.
											500m		Grandes bancos de arenisca dura con intercalaciones de arcillolita, mas frecuente en la parte superior.
											550m		Calizas, margas, arcillolitas y areniscas, fosilíferas de origen marino.
											520m		Alternancia de arcillolitas fisibles, calizas arenosas y areniscas. Conglomerado basal.

Figura 2. Columna estratigráfica regional.

Fuente: Adaptado de Reyes (1984)

1.2.1.2. Tectónica

En términos generales, hay que considerar dos distintas provincias tectónicas en la región:

- a- El Macizo de Floresta, que corresponde a una zona compleja levantada.
- b- La cobertura plegada, formada por la serie sedimentaria neocretácico-terciaria.

Las dos provincias están separadas por la falla de Soapaga, que representa el límite tectónico y geomorfológico de gran importancia.

Macizo de Floresta.

En la zona axial del macizo de floresta afloran las rocas más antiguas de la región (basamento cristalino), la serie del Paleozoico Superior y la Formación Girón. La disposición de la discordancia cretácea claramente indica que la deformación es un gran anticlinal con cabeceo hacia el suroeste, donde los estratos de la formación Tibasosa cierran la estructura (periclinal de Tibasosa).

El levantamiento de Floresta está delimitado longitudinalmente por las dos grandes fallas de Boyacá, al noroeste y de Soapaga al sureste, ambas con rumbo suroeste-noreste, lo que condiciona la configuración alargada del macizo en esa dirección.

Cobertura plegada.

Toda la faja de terrenos inmediatamente al oriente de la falla de Soapaga, constituidos por la serie neocretácico-terciaria, pertenece al flanco occidental de un gran levantamiento, que culmina fisiográficamente con las sierras y los páramos altos de este tramo de la cordillera oriental.

La deformación de la serie sedimentaria es una combinación de pliegues y fallas, pero predomina el estilo plicativo, conservando los mayores plegamientos la orientación SW-SE, que es la directriz tectónica normal de la cordillera en el departamento de Boyacá.

Estos plegamientos están dislocados por numerosas fallas, en sistemas con orientaciones variables. En general, las fallas inversas longitudinales acompañan los anticlinales y se localizan preferentemente sobre un flanco. Las fallas transversales dislocan los pliegues en sentido diagonal al rumbo de los ejes. Las fallas normales se agrupan en sistemas independientes y cortan las fallas inversas longitudinales indicando su origen en una fase posterior claramente distensiva.

1.2.2. Geología local

Cartografía Geológica Detallada. El mayor énfasis de la cartografía geológica se hizo en la secuencia que contiene los mantos de Carbón, la cual corresponde a la sección superior de la formación Guaduas.

El levantamiento geológico local se llevó a cabo con base en los datos tomados en las labores subterráneas y en afloramientos en superficie. El mapa geológico mostrado en la Figura 4, contiene la información levantada en campo donde se diferencian las formaciones geológicas, los depósitos recientes, así como también las diferentes estructuras geológicas presentes en el área de estudio.

Labores Mineras Subterráneas. Dentro del área de estudio se encuentra un número significativo de bocaminas activas, inactivas (labores de explotación abandonadas) y proyectadas; las cuales fueron de gran ayuda para el levantamiento de la columna estratigráfica local. Obsérvese la Foto 1.

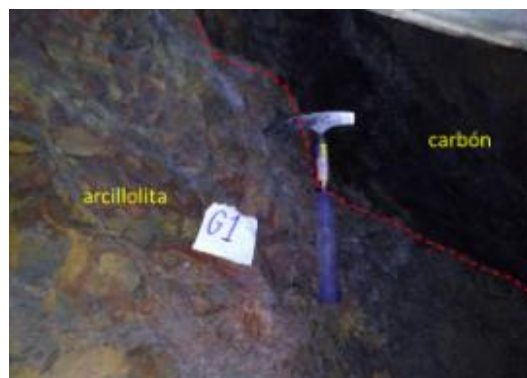


Foto 1. Manto de carbón en contacto con arcillolita de piso-Formación Guaduas.

Fuente: propia.

1.2.2.1. Estratigrafía local

Formación Guaduas.

Aflorando desde la parte Sur a Norte del área de estudio, se encuentra estratigráficamente desde la parte inferior con un paquete de arenisca, gris amarillenta, con manchas rojas y violetas por presencia de óxidos de hierro, grano fino a medio, cemento silíceo, en capas gruesas, roca compacta con espesor de 2.0 m; presentándose por encima de este un paquete de limolitas, grises con manchas rojas por oxidación con un espesor de 1.2 m; suprayaciendo a estas se encuentra Manto 6 con espesor de 1.5 m; seguido de un paquete de limolitas grises con espesor de 1.7 m; encontrándose por encima de este un paquete de arcillolitas grises, fisibles con espesor de 5,0 m; suprayaciendo a estas se encuentra Manto 7 con un espesor 1.10 m; por encima de este un paquete de limolitas arcillosas, grises con espesor de 1.10 m; suprayaciendo a estas se presenta un paquete arcillolitas grises claras con intercalaciones de areniscas cuarzosas, gris amarillenta, grano fino a medio, matriz arcillosa en capas delgadas de 0.15 a 0.2 m con espesor de 9.0 m; por encima de este un paquete de arcillolitas grises con espesor de 1.80 m; suprayaciendo se encuentra Manto 8 con espesor de 1.70 m; por encima de este un paquete de arcillolitas grises, amarillentas, fisibles con intercalaciones de areniscas arcillosas en capas delgadas de 0.1 m, espesor total de 23.5 m; por encima de este se encuentra un paquete de areniscas cuarzosa de color amarillo grisáceo, grano fino, matriz arcillosa en capas gruesas, con espesor de 4.0 m; suprayaciendo una capa de shale carbonoso meteorizado de 0.50 m de espesor, por encima de esta un paquete de arcillolitas grises de 1.0 m de espesor; suprayaciendo a esta se encuentra Manto 9 con espesor de 1.40 m; por encima de este un paquete de arcillolitas gris claro, fisibles con manchas rojizas con espesor de 1.40 m, suprayaciendo a esta se encuentra Manto 10 de 1.50 m de espesor; por encima de ese se encuentra un paquete de arcillolitas grises, friables e intercaladas con paquetes de areniscas arcillosas, de color amarillo, grano fino en capas de 0.50 a 0.80 m de espesor, con espesor total 32.0 m; suprayaciendo a estas se encuentra Manto 11, con espesor de 1.20 m. En la Figura 3, se muestra de manera esquemática la columna estratigráfica local, la cual se levantó en campo dentro de varias labores subterráneas de explotación del sector y en afloramientos en varios sitios recorridos durante la etapa de exploración geológica de campo.

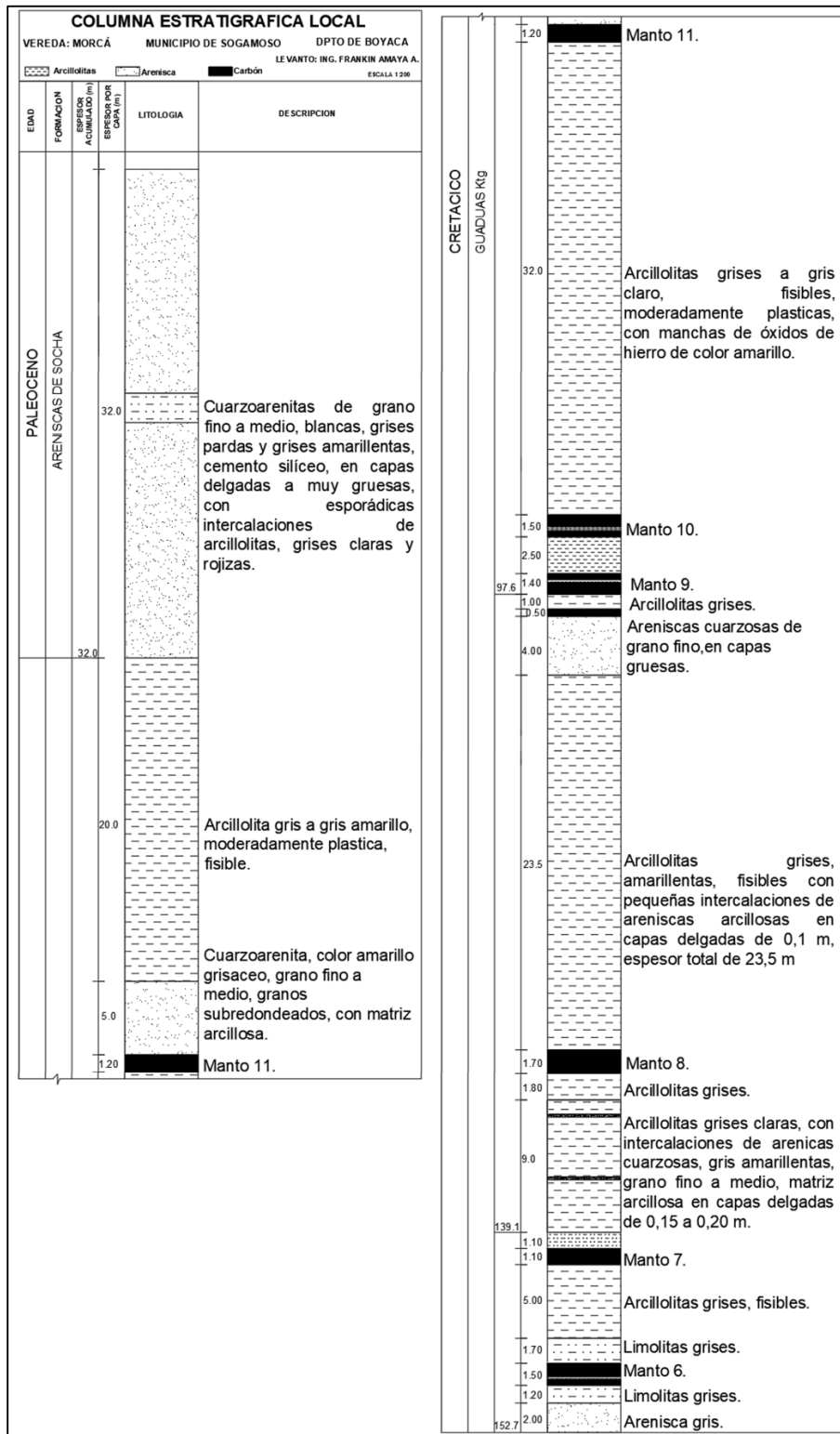


Figura 3. Columna estratigráfica local.

Fuente: Elaboración propia

1.2.2.2. Fallas

Falla de Gámeza

Es una falla de tipo inverso con una dirección SW-NE y con una inclinación al SE, en la zona afecta a las formaciones aflorantes en el sector occidental, su efecto se caracteriza por la repetición de la secuencia estratigráfica y la inversión que sufre la serie terciaria, que se coloca por debajo de serie cretácica.

El desplazamiento de la Falla Gámeza es de aproximadamente 200 m, el bloque sudeste de la falla sufrió levantamiento con respecto al bloque noroeste. En la zona su efecto involucra a las formaciones Areniscas del Socha (Socha Inferior), Arcillas del Socha (Socha Inferior) y Guaduas.

Falla de Tópaga

Esta falla tiene una dirección SW-NE y se inclina hacia el SE, es de tipo inverso; está afectando los estratos de la Formación Guaduas, su trazo se ha inferido de acuerdo a la forma de datos de rumbo y buzamiento, ya que en el sitio de estudio es difícil identificar su trazo en las arcillolitas de la Formación Guaduas.

Falla Satélite

Falla de tipo inverso de poco desplazamiento, entra en la zona sepultada por el cuaternario y luego aparece afectando a las Formaciones Guaduas y Socha Inferior.

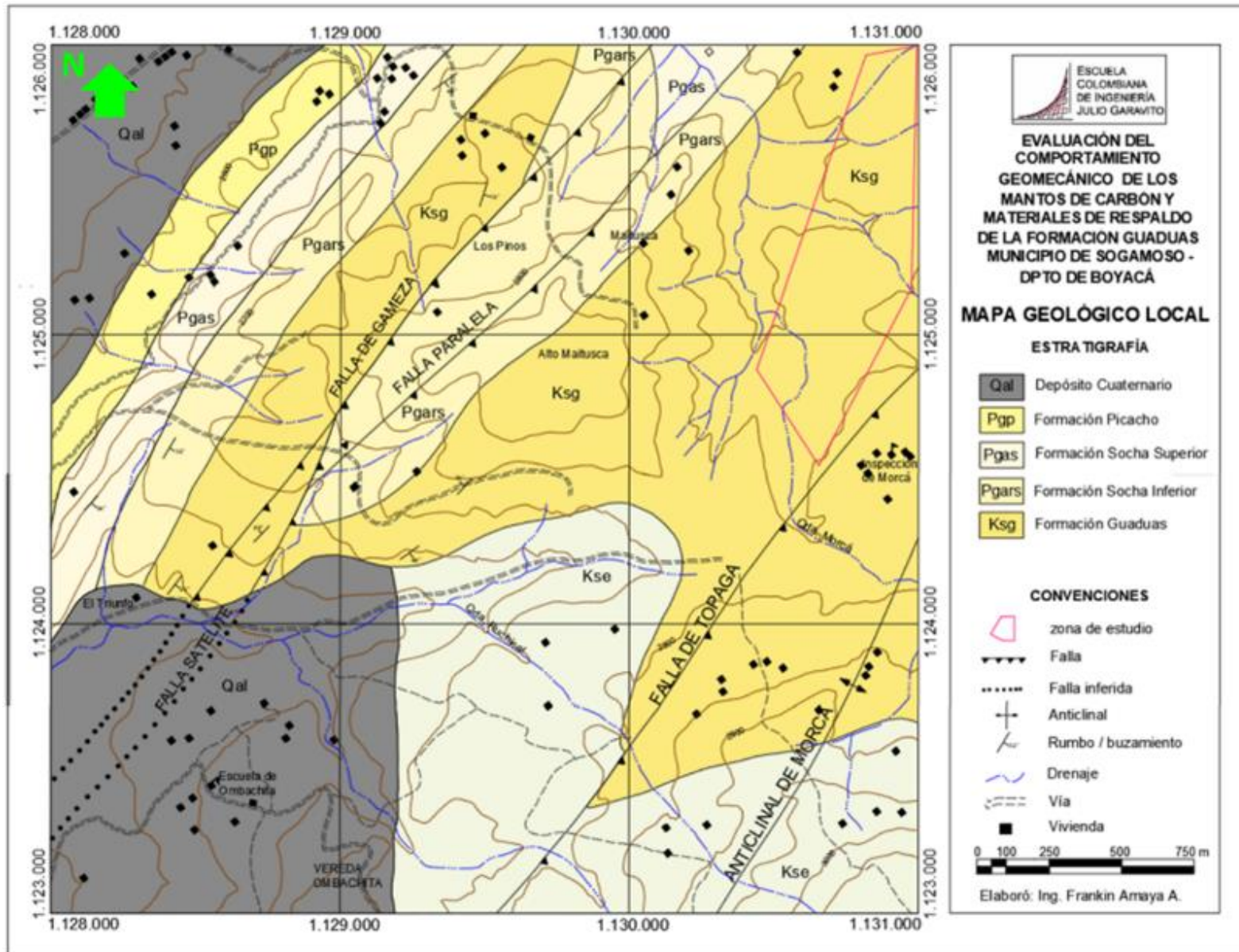


Figura 4. Mapa geológico local.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 2 Marco teórico

2.1. Muestreo de los carbones y materiales de respaldo (ECOCARBÓN, 1995)²

2.1.1. Objetivo del muestreo de carbones y materiales de respaldo

El objetivo de un muestreo de carbones y materiales de respaldo, es obtener una muestra parcial representativa de una unidad de muestreo, de tal manera que la distribución y proporción de sus variables físicas, químicas y petrográficas sean equivalentes a esa unidad de muestreo. Para muchos propósitos la muestra es luego reducida en tamaños de partículas y masa, proceso que se denomina preparación.

Antes de emprender un programa de muestreo, se debe tener en cuenta y haber definido los siguientes aspectos:

- El material a ser muestreado.
- La cantidad a ser muestreada.
- Los análisis requeridos.
- La precisión requerida.
- La logística necesaria durante la operación.

Como se sabe el carbón por la variabilidad en su composición, es uno de los materiales más difíciles de muestrear. Sin embargo, un muestreo adecuado permite evaluar o conocer entre otros los siguientes resultados:

- Caracterizar física, química, petrográfica y tecnológicamente los carbones.
- Conocer la variabilidad de los diferentes parámetros de calidad analizados.
- Planificar las etapas de desarrollo y producción de proyectos mineros.
- Definir usos industriales y tecnológicos del carbón.

² ECOCARBÓN. Normas generales sobre muestreo y análisis de carbones. EMPRESA COLOMBIANA DE CARBÓN LTDA. 1995.

La selección de muestras de carbón para investigación básica y aplicada debe hacerse teniendo en cuenta tanto la variedad composicional como el número de muestras y el número de mantos desde donde se han obtenido las muestras.

2.1.2. Tipos de muestreo en un proyecto minero

Los tipos de muestreo de carbones se pueden clasificar de acuerdo a las etapas de un proyecto geológico-minero así:

1. Muestreo durante la fase de exploración y desarrollo.
2. Muestreo durante la operación.

2.1.2.1. Muestreo durante la fase de exploración y desarrollo

Durante las fases de exploración y desarrollo de un proyecto minero se pueden tomar diversos tipos de muestras. Estas muestras pueden representar o bien el estrato continuo de carbón en todo su espesor y sus relaciones litológicas y texturales o, por otro lado, representar el espesor uniforme muestreado, aunque se mezclen durante su recolección.

- Un **Muestreo de afloramiento** es aquel que se toma de un manto de carbón aflorante en la superficie. Usualmente se toma mediante apiques, trincheras y túneles. El carbón a muestrear ha estado expuesto a las condiciones atmosféricas por un largo periodo de tiempo. Los efectos de la meteorización se extienden por varios metros, desde la superficie expuesta hasta el interior del manto de carbón. el túnel exploratorio permite que esta muestra de afloramiento se tome lo más fresca posible.
- **Muestreo de columna** es una muestra sólida en forma de pilar de aproximadamente 0,40 x 0,40 metros, por el espesor del manto de carbón muestreado, en donde se indica la orientación y se mantienen todos los componentes del manto en su posición original. Las muestras de columna sirven para responder cualquier interrogante acerca de las relaciones texturales o de la

posición relativa que puedan surgir en el estudio de una serie de muestras de bloque.

El objetivo del muestreo de columna es enviar a laboratorio un bloque monolítico de carbón o roca de los respaldos el cual representa un manto completo (ver la Figura 5).

Al empacar la muestra para su transporte, debe tenerse sumo cuidado, evitando el fracturamiento de ella.

- **Muestras de canal** son muestras de volumen de carbón triturado que incluyen el espesor total del manto tomado, de tal manera que cada uno de los estratos constituyentes están representados en igual proporción a su espesor. La muestra de canal se obtiene mediante un corte uniforme y continuo perpendicular a la estratificación.
- **Muestreo de perforación:** En un programa de perforación para un yacimiento carbonífero se pueden tener muestras de núcleos y muestras de ripios de pozos abiertos.

Las muestras de núcleo se obtienen mediante perforación con taladro (broca de diamante), con un diámetro de la muestra entre 1 a 3 pulgadas, por el espesor del manto de carbón. Si durante la operación de perforación la muestra recuperada no está fracturada y no ha habido pérdidas durante la operación, la muestra obtenida suministra excelente información sobre el manto de carbón en cuanto a sus componentes, posición original y orientación dando características del manto de carbón en profundidad.

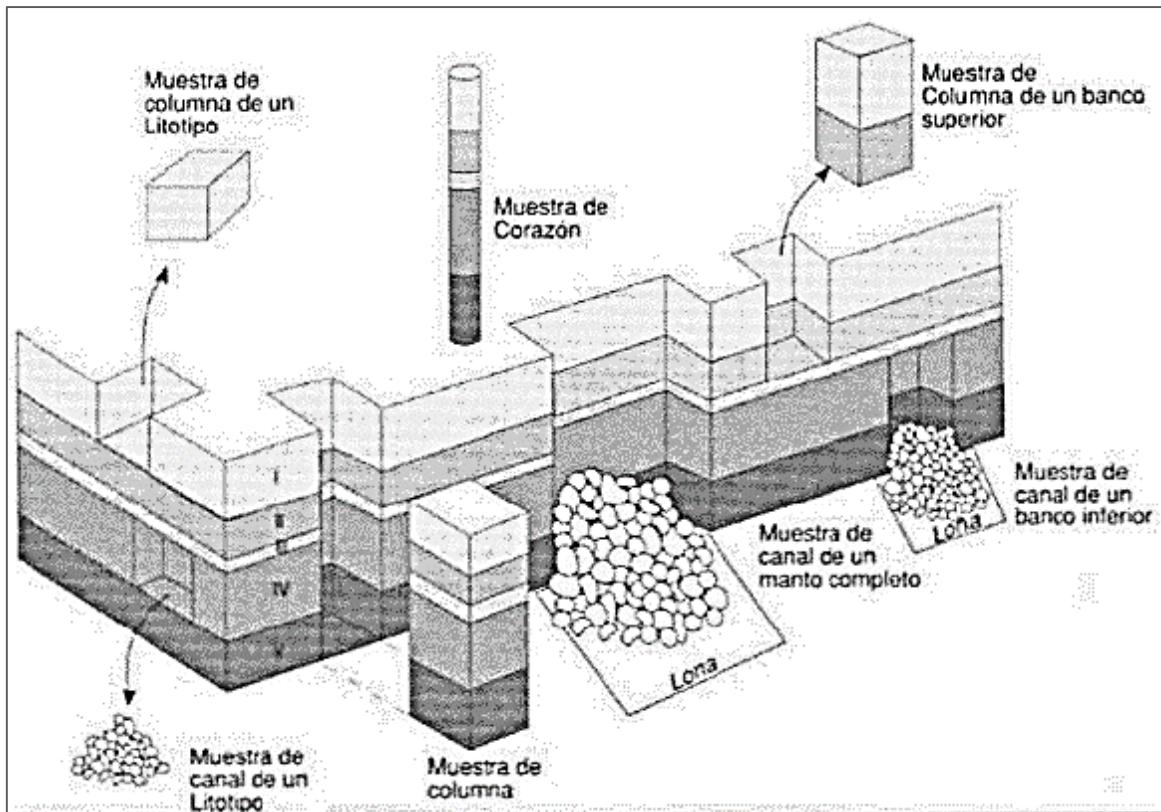


Figura 5. Tipos de muestras de carbón.

Fuente: ECOCARBÓN. Normas generales sobre muestreo y análisis de carbones. EMPRESA COLOMBIANA DE CARBÓN LTDA. 1995.

2.2. Tipos de ensayos de mecánica de rocas efectuados para la caracterización geomecánica de los materiales rocosos.

2.2.1. Ensayos de campo

2.2.1.1. Medida del rebote con Martillo Schmidt

Este ensayo permite estimar de forma aproximada la resistencia a compresión simple mediante una sencilla correlación, siendo aplicable fundamentalmente a matriz rocosa, pero también a discontinuidades.

El esclerómetro o Martillo Schmidt consiste en un pequeño aparato metálico de geometría cilíndrica que dispone de un muelle en su interior y de una punta retráctil, la cual, al ser presionada contra la roca hace que el muelle se dispare.

Tipos de martillo

En la práctica común se utilizan dos tipos de martillo, el tipo L con una energía de impacto de 0.735 N.m y el tipo N con una energía de impacto de 2.207 N.m. Los rebotes medidos con estos martillos se denotan con los símbolos RL y RN, respectivamente.

Ambos martillos proporcionan buenos resultados para valores de compresión simple de la roca o la discontinuidad ensayada dentro del rango 20-150 MPa.

Previamente al año 2009, la ISRM³ recomendaba únicamente el martillo de tipo L; ahora los dos están permitidos (Aydin, 2009). El martillo tipo N se usaba mayoritariamente para concreto. Sin embargo, es menos sensible a las irregularidades de la superficie ensayada y sería por tanto preferible para la realización de ensayos de campo. La norma ASTM D5873-05⁴ no especifica el tipo de martillo.

(Ayday y Gökten, 1992) obtuvieron, de acuerdo al procedimiento de toma de datos sugerida por la recomendación ISRM (1978c), la siguiente correlación empírica entre los números de rebotes de ambos martillos:

$$RN = 7.124 + 1.249 RL \quad (r^2 = 0.882)$$

siendo RN y RL el número de rebotes proporcionado por un martillo tipo N y L, respectivamente; y r^2 , el coeficiente de determinación lineal.

Mediante el martillo de Schmidt, o esclerómetro, se puede, por tanto, estimar la resistencia a compresión simple de la roca a partir de la resistencia al rebote de la superficie de roca

³ ISRM. Part 3. Suggested method for determination of the Schmidt rebound hardness. In ISRM suggested Methods (1981).

⁴ ASTM D5873-05. Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method.

ensayada. Como se ha comentado anteriormente, esta superficie deberá estar fresca y limpia, sin ningún signo de alteración ni fracturas.

Esta medida del rebote se correlaciona con la resistencia mediante el gráfico de Miller (Figura 6), que tiene en cuenta la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto al plano de roca ensayado.

La ISRM recomienda tomar 20 lecturas en diferentes zonas con la opción de parar cuando alguna de las lecturas siguientes a las diez primeras difiera de la inmediatamente anterior un máximo de 4 unidades de dureza del martillo Schmidt. La norma ASTM recomienda tomar 10 lecturas.

La ISRM sugiere utilizar el promedio de las diez lecturas con valores más altos. La ASTM recomienda descartar las lecturas que difieran más de 7 unidades de dureza del martillo Schmidt del promedio y después promediar las restantes. La ISRM revisada sugiere no descartar ninguna lectura y presentar los valores obtenidos mediante un histograma de frecuencias que incluya el promedio, mediana, moda y el rango.

Con el valor medio obtenido y conociendo la densidad de la roca se entra en el gráfico de Miller, obteniéndose el valor de resistencia a compresión para el material ensayado.

El valor estimado a partir del martillo de Schmidt debe ser obtenido estadísticamente, de tal manera que sea un valor representativo.

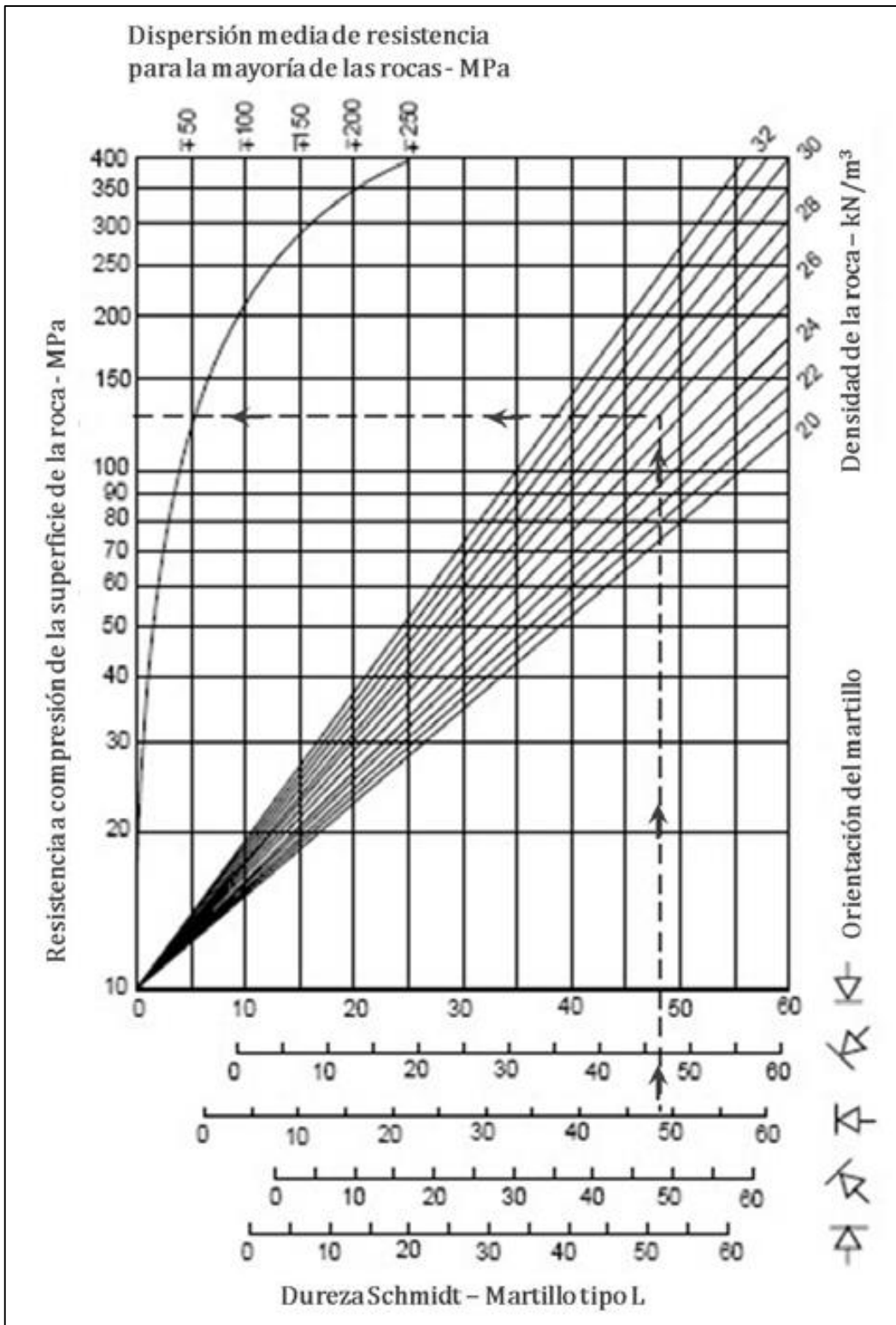


Figura 6. Gráfico de correlación para el martillo Schmidt entre resistencia a compresión, densidad de la roca y rebote (Miller, 1965).

2.2.2. Ensayos de laboratorio de resistencia y deformabilidad

2.2.2.1. Ensayo de carga puntual

También denominado PLT (*Point Load Test*) o ensayo Franklin. Se utiliza para determinar la resistencia a compresión simple de fragmentos irregulares de roca o de testigos cilíndricos de sondeos, a partir del índice I_s obtenido en el ensayo. Los resultados son más fiables si se ensayan testigos.

El procedimiento consiste en romper una muestra entre dos puntas cónicas metálicas accionadas por una prensa portátil (véase la Foto 2). A partir de la carga de rotura se obtiene un índice, I_s , que puede ser correlacionado con la resistencia a compresión simple del material ensayado:

$$I_s = P / D^2$$

Siendo P la carga de rotura y D el diámetro de la probeta o altura de la muestra ensayada (distancia entre puntas).

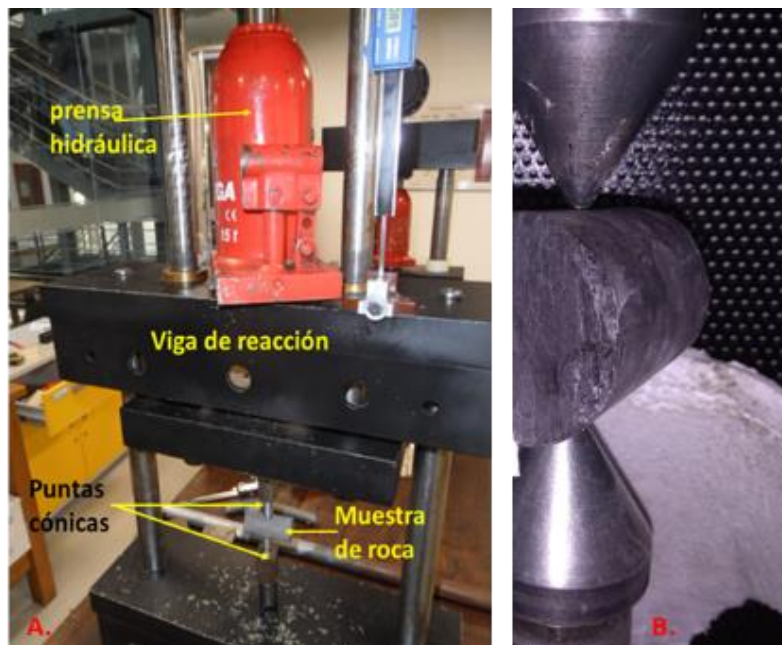


Foto 2. A. Equipo para ensayo de carga puntual en rocas. B. Mecanismo de puntas cónicas para rotura de probeta en carbón.

Fuente: Propia.

La longitud del testigo debe ser, como mínimo, de 1,5 veces el diámetro. La correlación entre el índice I_s y la resistencia a compresión simple de la roca, σ_c , es:

$$\sigma_c = k * I_s$$

Donde el factor k , es un factor de conversión dependiente del tipo de roca. El valor de k varía entre 8 y 30, con la mayoría de valores entre 15 y 25 (Rusnak y Mark,2000).

Para muestras con diámetros diferentes a 50mm es necesario corregir el valor de I_s con la ayuda del ábaco mostrado en la Figura 7.

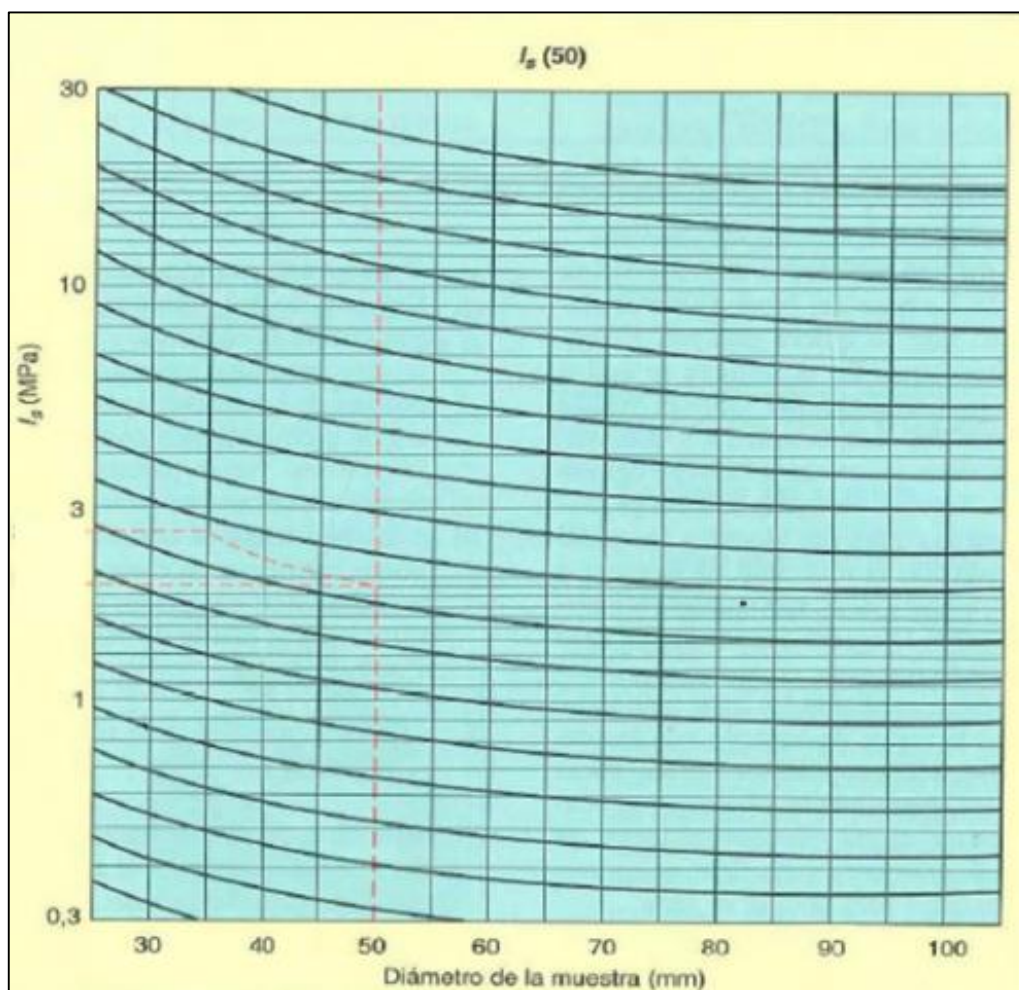


Figura 7. Correlación entre el índice I_s y la resistencia a la compresión simple de la roca.

Fuente: Tomado de González (2002)⁵.

⁵ González de Vallejo, Luis I. INGENIERÍA GEOLÓGICA. pág. 349.

2.2.2.2. Ensayo uniaxial o de compresión simple

El ensayo permite determinar en laboratorio la resistencia uniaxial no confinada de la roca, o resistencia a la compresión simple, σ_c , y sus constantes elásticas: el módulo de Young, E , relación de Poisson, ν . Es, por tanto, un ensayo para la clasificación de la roca por su resistencia y para la determinación de su deformabilidad. La relación entre los esfuerzos aplicados en el ensayo es: $\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

- **Procedimiento:** el ensayo se realiza sobre un cilindro de roca, al que se aplica gradualmente fuerza axial hasta que se produce su rotura (Foto 3). En máquinas de ensayo convencionales, la variable de control es la fuerza, cuya magnitud y velocidad de aplicación puede ser controlada. Las deformaciones axiales que se van produciendo en la probeta se miden mediante comparadores o bandas extensiométricas (Foto 4). Durante el ensayo se van registrando las curvas esfuerzo-deformación axial σ - ϵ_{ax} de la probeta. Pueden igualmente medirse las deformaciones radiales o transversales de la probeta, obteniéndose la curva σ - ϵ_r .



Foto 3. Rotura de probeta en carbón- ensayo de compresión simple.

Fuente: Propia

La ISRM (1979) establece una serie de recomendaciones con respecto al tallado de las probetas:

- Las probetas deben ser cilindros con una relación $L/D=2,5-3$ y con $D>54\text{mm}$.
- El diámetro D será al menos 10 veces mayor que el mayor tamaño de grano de la roca.
- Las bases de la probeta deben ser planas, paralelas y perpendiculares al eje del cilindro.



Foto 4. Probeta preparada para el ensayo de compresión simple, con bandas extensométricas para la medida de deformaciones axial y transversal o radial.

Fuente: Propia

2.2.2.3. Ensayo de compresión triaxial

Este ensayo representa las condiciones de las rocas *in situ* sometidas a esfuerzos confinantes, mediante la aplicación de presión hidráulica uniforme alrededor de la probeta. Permite determinar la envolvente o línea de resistencia del material rocoso ensayado, a partir de la que se obtienen los valores de sus parámetros resistentes cohesión c y fricción

φ. El ensayo de compresión triaxial es el más extendido de los ensayos de compresión multiaxial en mecánica de rocas.

La relación entre los esfuerzos aplicados a la probeta es: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$.

- **Procedimiento:** El ensayo se realiza sobre probetas semejantes a las del ensayo uniaxial, que se introducen en cilindros de acero en cuyo interior se aplica la presión hidráulica sobre las paredes de la probeta. Esta se rodea de una membrana impermeable flexible para aislarla del líquido a presión (Foto 5).



Foto 5. Probeta preparada para el ensayo de compresión triaxial, Obsérvese la membrana impermeable. Fuente: Propia

Al inicio del ensayo se aplican simultáneamente la carga axial y la presión confinante, de tal forma que sean aproximadamente iguales los rangos de ambos esfuerzos. Una vez alcanzado el nivel de presión confinante deseado, se aplica carga axial hasta conseguir la rotura de la probeta. La presión confinante debe mantenerse constante a lo largo de todo el ensayo.

Los datos a registrar durante el experimento son la carga o el esfuerzo axial σ_1 , la deformación axial, al ángulo del plano de fractura y, en su caso, el ángulo que forman los planos de anisotropía con respecto a la dirección de la carga axial.

En la Figura 8, se esquematiza una celda triaxial con los componentes necesarios para la realización del ensayo.

Cuando la probeta comienza a ser cargada, se comprime radialmente (a causa de la presión confinante) hasta un momento en que comienza a dilatarse como resultado de la fracturación interna del material, posteriormente se aplica el esfuerzo desviador σ_1 hasta llegar al punto de rotura del material (Foto 6).



Foto 6. Rotura de probeta en carbón- ensayo de compresión triaxial.

Fuente: Propia.

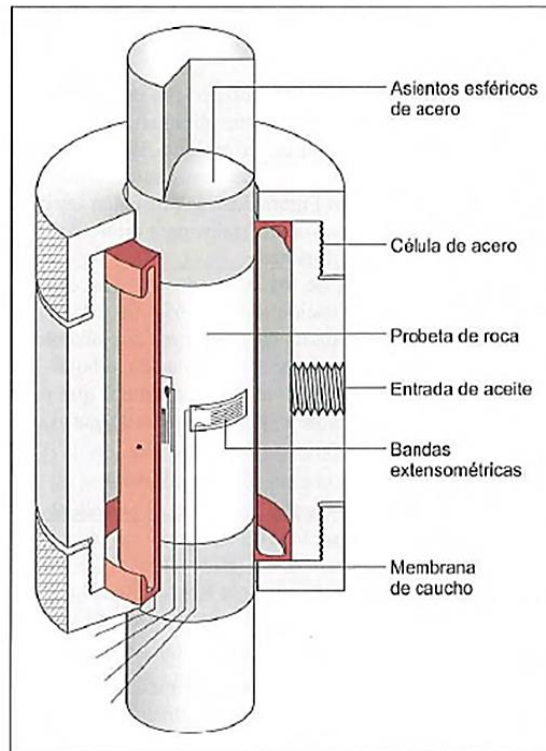


Figura 8. Esquema de una celda triaxial (Hoek y Brown, 1980).

2.2.2.4. Ensayo de tracción indirecta o brasileño.

Consiste en medir la resistencia a tracción uniaxial de una probeta de roca indirectamente, asumiendo que la rotura se produce por tracción cuando la roca se somete a un estado de esfuerzos biaxial, con un esfuerzo principal traccional y otro compresivo de magnitud no superior a 3 veces el esfuerzo traccional.

Se aplica una carga vertical compresiva sobre un disco o cilindro de roca, que se coloca en horizontal entre dos placas a través de las cuales se transmite la fuerza, hasta conseguir su rotura. Se pueden emplear placas planas o esféricas cóncavas para transmitir las cargas, que deberían ser perfectamente paralelas (Figura 9).

La carga se aplica con un rango tal que se consiga la rotura de la roca en unos 15-30 segundos; la ISRM (1981) recomienda un rango de 200 N/s.

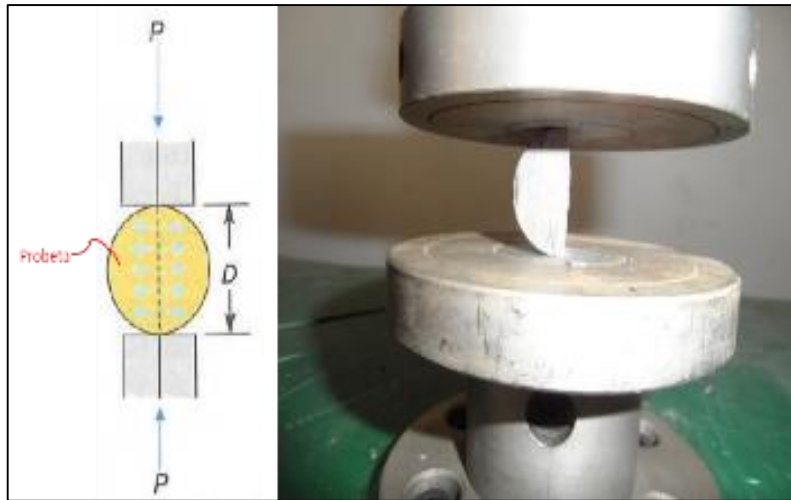


Figura 9. Esquema del ensayo de tracción indirecta (izquierda), imagen que muestra la rotura del espécimen después de la aplicación de la carga (derecha).

Fuente: Propia.

2.2.2.5. Ensayo para la determinación de materiales expansivos

Expansión es el aumento en elevación o dilatación de una columna de roca después de absorción de agua.

- **Presión de expansión (Ps):** Definida como la presión aplicada en el laboratorio sobre una muestra de suelo expansivo para que, una vez en contacto con agua, la probeta mantenga constante su volumen inicial, es decir que la variación de volumen sea nula.
- **Hinchamiento (H):** Definido como el porcentaje (%) de la elevación máxima para presión nula en relación a la longitud inicial de la probeta.

Expansión libre, es el porcentaje de levantamiento, después de absorción de agua a la presión de asentamiento σ .

$$\% = \frac{\Delta H}{H} \times 100$$

Para obtener información de cómo y en que magnitud puede dañar un suelo expansivo una estructura, existen dos tipos de ensayo:

Expansión libre.

Este ensayo consiste en colocar en una probeta normalmente cilíndrica un volumen conocido de suelo o roca pulverizada (compactada en un molde a su densidad) y sumergirlo en agua sin aplicación de sobrecarga alguna, mientras se mide la expansión. La diferencia entre el volumen final e inicial, expresado como un porcentaje del volumen inicial es la expansión libre.

En colocar la muestra en agua durante 1 o 2 horas e ir controlando la deformación. El dial se deberá colocar con unas vueltas siquiera para empezar el ensayo, puesto que ahora las agujas del dial guiaran en sentido contrario. La diferencia de lectura dividida para la altura inicial, ($3/4 = 0,75$) y multiplicada por 100, dará el porcentaje de deformación.

La muestra es confinada en un anillo que permita solo deformaciones verticales y no horizontales, como el que se usa para los ensayos de consolidación, esta será colocada en un recipiente con agua durante 1 o 2 horas, posteriormente se observará un aumento del volumen como se muestra en la Foto 7.

$$\% \varepsilon = (L_i - L_f) \times 100 / H$$

$$\% \varepsilon = (L_i - L_f) \times 100 / 0.75'' \text{ (En caso de ser utilizado el consolidómetro)}$$



Foto 7. Ensayo de expansión libre.

Fuente: Propia

Expansión Controlada:

En este ensayo se aplican cargas en el consolidómetro de modo de controlar que la aguja del mismo se mantenga en cero, hasta que finalmente deja de moverse. Aplicando cargas de modo que el dial permanezca en cero durante media hora o más, hasta que ya no se mueva el dial. Al terminar el ensayo se anota la carga final se determina el esfuerzo de expansión según el brazo de palanca del consolidómetro, previamente se han determinado las humedades inicial y final con lo que se aprecia el porcentaje de agua absorbida por la muestra.

Esa carga final determinará el esfuerzo de expansión según el brazo de palanca del consolidómetro.



Foto 8. Consolidómetro usado para el ensayo de expansión controlada.

Fuente: Propia

2.2.3. Petrografía

2.2.3.1. Petrografía de carbones

- Composición y estructura del carbón

El carbón es una roca sedimentaria compuesta principalmente por una fracción orgánica y, en una menor proporción, por sustancias minerales, que contiene asimismo agua y gases en los poros submicroscópicos. Estos compuestos orgánicos mayoritarios resultan de la formación y condensación de anillos polinucleares carbocíclicos, donde el carbono (C), hidrógeno (H), y oxígeno (O) son los elementos fundamentales, y el azufre (S) junto con el nitrógeno (N) son complementarios.

La composición y estructura del carbón depende principalmente del proceso de carbogénesis que este ha sufrido. En este caso, la caracterización de un carbón hace referencia a su composición petrográfica, es decir, a la proporción y distribución de sus respectivos macerales y minerales constituyentes.

➤ Terminología

MACERAL

Los macerales son los componentes orgánicos que constituyen el carbón, y representan algo similar a los que son los minerales para las rocas inorgánicas, aunque hay marcadas diferencias, tales como que los macerales no tienen una composición definida ni tienen estructura cristalina.

Definición de macerales: Constituyentes individuales de materia orgánica reconocibles con el microscopio óptico (Taylor et al., 1998). El término «maceral» fue utilizado por primera vez por Stopes (1935) para referirse a los componentes del carbón que se separaban por maceración.

Algunos macerales representan restos de plantas que constituyen algún tipo de estructura preservada. En otros casos son productos de degradación que están tan alterados que no se puede reconocer su procedencia de una parte concreta de las plantas.

Los distintos macerales se definen atendiendo a las características ópticas, pues se estudian con un microscopio petrográfico, normalmente de luz reflejada. Se describen a partir de su forma, color, reflectancia, dureza, relieve de pulido etc. que se observa con el microscopio.

Las descripciones del Comité Internacional de Petrografía del Carbón (ICCP) están definidas para microscopios de reflexión con objetivos de inmersión en aceite que es como se consigue un mayor contraste entre los macerales. Sin embargo, estos objetivos son menos habituales que los de aire y no están disponibles con tanta facilidad.

Existen tres grupos macerales según su composición química y propiedades ópticas:

➤ GRUPO VITRINITA

Los macerales del grupo huminita (en lignitos), vitrinita (en carbones bituminosos) presentan un color gris intermedio y bastante homogéneo cuando son observados con el microscopio de luz reflejada.

* La clasificación de los macerales dentro del grupo se establece en función del grado de preservación de los tejidos.

* Deriva de la celulosa y lignina presente en los tejidos de las plantas superiores (ramas, raíces, tallos, hojas).

* Tiene comparativamente mayor contenido en OXÍGENO, que disminuye al aumentar el rango.

* Es un grupo maceral abundante en la mayoría de los carbones, siendo mayoritario en muchos de ellos.

Los componentes de este grupo cambian de nombre al cambiar el rango: En los lignitos se denominan grupo huminita, y en los carbones bituminosos y antracitas vitrinita.

➤ GRUPO LIPTINITA

* Los macerales del grupo liptinita presentan un color gris oscuro a negro en inmersión en aceite, a veces algo transparente (baja reflectancia). Siempre más oscura que la vitrinita de la misma muestra.

* Presenta fluorescencia al ser iluminada con luz azul-violeta.

* Deriva de organismos específicos (algas, bacterias) o de partes de plantas superiores constituidas por sustancias no humificables: órganos de protección, reproducción, secreciones. Se incluye en el grupo algunos productos generados durante la carbonificación.

* Tiene comparativamente a los otros grupos macerales un mayor contenido en Hidrógeno.

Los macerales del grupo liptinita se identifican por sus morfologías características. Muchas de sus características distintivas solo son visibles utilizando luz fluorescente. Los macerales de este grupo convergen en sus propiedades ópticas con la vitrinita y dejan de ser identificables en el paso de carbón bituminoso B a A (ISO 2005) alrededor de 1.4% de reflectancia de la vitrinita.

➤ **GRUPO INERTINITA**

El grupo inertinita incluye tejidos de plantas superiores en varios estados de compactación o fractura y fragmentos de material amorfo gelificado alterados por procesos redox o bioquímicos, tejidos de hongos, material finamente granular formado durante la carbonificación y secreciones celulares.

Esta alteración consiste fundamentalmente en procesos de combustión parcial (rápida) en incendios forestales, o alteración lenta debida a microorganismos (alteración bioquímica) o a oscilaciones del nivel freático, con lo que el material queda expuesto al aire (meteorización). El resultado es un incremento de la reflectancia debido a una pérdida de volátiles, acompañada de un aumento de la aromaticidad.

Características generales:

- * Color gris claro a blanco amarillento, más clara que la vitrinita del mismo carbón y de mayor reflectancia que esta última.
- * Comparado con los otros macerales del mismo carbón tiene mayor contenido en Carbono.
- * Los componentes de este grupo no suelen ser fluorescentes.
- * Suele tener relieve de pulido debido a su dureza, que aumenta con la reflectancia.

2.2.3.2. Petrografía de los materiales de respaldo (limolita arcillosa)

Técnica de fluorescencia de Rayos X (FRX).

La fluorescencia de rayos X (XRF, sigla en inglés) consiste en emisión de rayos X secundarios (o fluorescentes) característicos de un material que ha sido excitado al ser «bombardeado» con rayos X de alta energía o rayos gamma. Este fenómeno es muy utilizado para análisis elemental y análisis químico, particularmente en la investigación de metales, vidrios, cerámicos y materiales de construcción, así como en la de geoquímica, ciencia forense y arqueología (Beckhoff, *et al.* 2007).

Técnica de Difracción de Rayos X (DRX).

Torres, (2011) explica, que la técnica consiste en impactar la muestra con un haz de rayos X que se difracta en diversos ángulos dependiendo del mineral que encuentre en su recorrido y el ángulo de inclinación con el que se dé la difracción del haz. Las reflexiones pueden ser hasta de tres modos y en función de ellas se puede determinar el mineral presente a partir de modelos de difracción preestablecidos, de acuerdo con la ley de Bragg.

La norma ASTM D934–13 da las líneas prácticas que proporcionan la identificación cualitativa de los componentes cristalinos en los geomateriales a analizar.

2.3. Tipos de terreno

La descripción del tipo de terreno se basa en el estudio de su estructura geológica (origen, historia geológica, estratificación, etc.), clasificación geológica y mineralogía. Con base en estos estudios se determinan las características del terreno y es posible determinar su respuesta esperable. Por lo tanto, el tipo de terreno determina no solo el tipo de soporte a emplear sino también el método de excavación y el avance del frente.

En geología el término “roca” se refiere a todos los depósitos, y el término “sedimentos no consolidados” (que en túneles se conocen como terrenos blandos), se refiere a depósitos de arcillas, limos, arenas y gravas.

La construcción de túneles en terrenos blandos y en roca es diferente, la principal diferencia es que las propiedades elásticas y de resistencia de la roca no se modifican considerablemente por la presencia de agua y permiten que el túnel sea auto soportante, contrario a lo que ocurre con los túneles en terrenos blandos, en los cuales la resistencia es muy baja y sus propiedades dependen de la presencia y comportamiento del agua en los poros.

Los suelos duros o rocas blandas cuentan con resistencia a compresión simple de muestras de roca intacta inferior a 10 MPa, y presentan contenido de vacíos muy superior a una roca común.

Los sedimentos no consolidados son típicos de valles y llanuras en donde es común el establecimiento de ciudades, lo que hace usual la construcción de túneles en terrenos blandos. Dentro del perímetro urbano también se pueden tener túneles a baja profundidad o a través de zonas de relleno. Los túneles en montañas se excavan a través de lugares que han resistido erosión debido a la presencia de roca dura. En túneles bajo cuerpos de agua se puede tener cualquiera de los dos tipos de terreno.

Meteorización

Se conoce como meteorización a la desintegración y/o descomposición de los materiales geológicos en superficie, debido a alteraciones de las características y propiedades de los materiales, producidas por agentes químicos, físicos y biológicos.

Los procesos de meteorización están dados por factores climáticos como temperatura, humedad, precipitación, vientos, etc.

Dentro de los agentes físicos se encuentran:

- Hielo y deshielo.

- Gradientes de temperatura.
- Sales.
- Hidratación.
- Capilaridad.

Los procesos químicos se dan por presencia de agua, en función de la temperatura y son más críticos en zonas tropicales. El proceso incluye la formación de minerales o compuestos a partir de los minerales existentes. Los agentes químicos más comunes son:

- Disolución.
- Hidratación.
- Hidrólisis.
- Oxidación y reducción.

La acción biológica es producida por agentes bacterianos que inducen la putrefacción de materiales orgánicos y al mezclarse con otras partículas actúan como catalizadores.

El resultado de los procesos de meteorización de los macizos son los denominados suelos y se clasifican en:

- Suelos residuales: permanecen en su lugar de origen, se observa una transición gradual a roca.
- Suelos transportados: han sido transportados por procesos aluviales, eólicos, glaciares, etc.

Se denomina **saprolito** al macizo rocoso cuando aún conserva su estructura rocosa, aunque la matriz se haya alterado. La profundidad de meteorización depende de factores como el tipo de roca, el clima y tiempo de exposición a los agentes. El grado de meteorización del macizo se basa en el índice RQD y el valor del índice de velocidad sónica.

La acción de los procesos descritos da lugar al perfil de meteorización. A continuación, se presentan los perfiles propuestos por diferentes autores:


Perfil esquemático	Love (1951) Little (1961)	Vargas (1951)	Sowers (1954, 1963)	Chandler (1969)	Geological Soc. Eng. Group (1970)	Deere y Patton (1971)		
	Rocas ígneas	Ígneas, basálticas y areniscas	Ígneas y metamórficas	Margas y limolitas	Rocas ígneas	Ígneas y metamórficas		
	VI Suelo	Suelo residual	Zona superior	V completamente alterada	VI Suelo residual	Horizonte IA		
	V Completamente alterada	Suelo residual joven	Zona intermedia	Parcialmente alterada	IV	V Completamente alterada	Suelo	Horizonte IB
	IV Altamente alterada	Capas de roca desintegrada	Zona parcialmente alterada		III	IV Altamente alterada	Zona de transición	IIA Transición con roca meteorizada saprolito
	II Moderadamente alterada				II	III Moderadamente alterada		IIB Parcialmente meteorizada
	II Algo alterada				II Debilmente alterada	IB Muy poco alterada		
	I Roca sana	Roca Sana	Roca inalterada		I Roca inalterada	IA Roca sana	Roca Sana	

Figura 10. Perfiles de meteorización de diferentes autores.

Fuente: (González, 2002).

2.3.1. Roca intacta o matriz rocosa

Las rocas son agregados naturales duros y compactos de partículas minerales con fuertes uniones cohesivas permanentes, que habitualmente se consideran un sistema continuo. (González, 2002).

Las características de las rocas son:

- Generan mecanismos y superficies de fractura en procesos de deformación.
- Tienen módulos de deformación altos.
- Presentan baja permeabilidad.

Una discontinuidad es un plano de origen mecánico o sedimentario, que independiza bloques de matriz rocosa. Cuenta con baja o nula resistencia a tracción. Su comportamiento mecánico está dado por su resistencia al corte o la del material de relleno.

La matriz rocosa o 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. En la siguiente tabla se presenta la clasificación de las rocas desde el punto de vista geológico:

Tabla 2. Clasificación geológica de las rocas.

Rocas sedimentarias	Detriticas	Cuarcita, arenisca, lutita, limolita, conglomerado.
	Químicas	Evaporitas, caliza dolomítica.
	Orgánicas	Caliza, carbón, rocas coralíferas.
Rocas ígneas	Plutónicas	Granito, gabro, diorita.
	Volcánicas	Basalto, andesita, riolita.
Rocas metamórficas	Masivas	Cuarcita, mármol.
	Foliadas o con esquistosidad	Pizarra, filita, esquisto, gneiss.

Fuente: (González 2002).

Los procesos de meteorización afectan a la roca intacta (matriz rocosa) y al macizo rocoso. El grado de meteorización influye en la resistencia y propiedades mecánicas de la roca intacta y del macizo rocoso.

La meteorización física de la roca intacta produce su rotura y disgregación permitiendo la entrada de agua; mientras que la meteorización química provoca cambios mineralógicos y descomposición. Los efectos de la meteorización dependen de la composición de la roca. Entre mayores sean las diferencias entre el ambiente de formación de la roca (temperatura y presión) y las condiciones a las que se encuentra expuesta, mayor será su facilidad de meteorización química; sin embargo, pueden ser más resistentes a la meteorización física.

La meteorización química ocasiona la reducción de la resistencia de la roca. La clasificación del grado de meteorización de la roca intacta se basa en descripciones

visuales e índices. A continuación, se presenta la clasificación de la roca intacta, según su grado de meteorización:

Tabla 3. Clasificación de roca intacta según su grado de meteorización.

Término	Descripción
Fresca	No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa.
Decolorada	Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el grado de cambio. Si se observa que el cambio de color se restringe a uno o algunos minerales se debe mencionar.
Desintegrada	La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniéndose la fábrica original. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos.
Descompuesta	La roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales están descompuestos.

Fuente: (González 2002).

Con el fin de incluir términos cuantitativos, además de la clasificación geológica, se emplea la clasificación mecánica, que incluye parámetros como la resistencia a compresión simple, con la cual se puede incluir el comportamiento mecánico.

Deere y Miller (1969) proponen la siguiente clasificación:

Tabla 4. Clasificación mecánica de la roca intacta – Deere y Miller.

Clase	Descripción	Resistencia a compresión simple	
		MPa	kg/cm²
A	Resistencia muy alta	>225	>2250
B	Resistencia alta	112-225	1120-2250
C	Resistencia media	56-112	560-1120
D	Resistencia baja	28-56	280-560
E	Resistencia muy baja	<28	<280

Fuente: (Gutiérrez, 2015).

Otras clasificaciones mecánicas son las siguientes:

Tabla 5. Clasificación mecánica de la roca intacta

Resistencia a compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Geological society of London (1970)	Bieniawski (1973)
<1	Suelos		
1-5	Muy blanda	Blanda >1.25	Muy baja
5-12.5	Blanda	Moderadamente blanda	
12.5-25		Moderadamente dura	
25-50	Moderadamente dura		Baja
50-100	Dura	Dura	Media
100-200	Muy dura	Muy dura	Alta
>200		Extremadamente dura	Muy alta
>250			

Fuente: Adaptado de (González, 2002).

Definiendo el módulo relativo como la relación entre el módulo de elasticidad y su resistencia a compresión simple:

$$MR = E/\sigma_c$$

Donde:

MR= Módulo relativo

E= Módulo Young

σ_c = Resistencia a compresión simple

Es posible hacer la siguiente clasificación de la roca según Deere y Miller:

Tabla 6. Clasificación mecánica de la roca intacta según su módulo relativo-Deere y Miller.

Clase	Descripción	Módulo relativo
H	Elevado módulo relativo	>500
M	Módulo relativo medio	200-500
L	Módulo relativo bajo	<200

Fuente: (Gutiérrez, 2015).

2.3.2. Macizo rocoso

Los macizos rocosos son el conjunto formado por los bloques de matriz o roca intacta y los planos de discontinuidad que los separan en bloques. Su comportamiento está dado tanto por la matriz como por las discontinuidades, ya que le proporcionan una naturaleza discontinua con respecto a sus propiedades y comportamiento, así como un comportamiento anisótropo (las propiedades mecánicas varían según la dirección considerada) y heterogeneidad (variación de propiedades físicas y mecánicas en distintas zonas del macizo).

Además de la discontinuidad, anisotropía y heterogeneidad, también afectan el comportamiento mecánico del macizo las estructuras tectónicas como los pliegues, tensiones naturales o estado de esfuerzos *in situ*, las condiciones hidrogeológicas y geoambientales.

Las clasificaciones geomecánicas permiten establecer de manera preliminar los parámetros mecánicos del macizo; sin embargo, se debe tener en cuenta que con dichas clasificaciones se infieren propiedades muy superiores a las reales, en el caso de macizos rocosos blandos, tectonizados y alterados, ya que no se tiene en cuenta su deformabilidad.

Las clasificaciones de macizos rocosos se basan en los siguientes parámetros:

- ✓ Propiedades de la roca intacta.
- ✓ Discontinuidades, grado de fracturación, bloques del macizo, hidrogeología.
- ✓ Grado de meteorización o alteración.

✓ Estado de esfuerzos.

✓ Presencia de agua.

De acuerdo con los anteriores parámetros, se establecen diferentes grados de calidad del macizo. Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas son:

a. *Bieniawski (1989)*: Rock Mass Rating (RMR).

b. *Barton (2000)*: Quality Index (Q).

Existen índices asociados a las clasificaciones como el RQD (*Rock Quality Designation*), GSI (Índice de resistencia geológica), el índice de velocidad relativa y el grado de meteorización.

✓ Índice RQD

Es la relación entre la suma de las longitudes de los fragmentos de testigo con longitud superior a 10cm, con respecto a la longitud del tramo considerado, es decir:

$$RQD = \frac{\sum \text{Longitud de los trozos de testigo} > 10\text{cm}}{\text{Longitud total}} \times 100$$

La longitud total se refiere a cada maniobra del sondeo, o en cambios de formación o tipo de roca. En general es recomendable que la maniobra del sondeo no supere 1.5 m.

Con el valor de RQD es posible describir la calidad de la roca según la siguiente tabla:

Tabla 7. Clasificación del macizo rocoso según el índice RQD.

Calidad del testigo RQD		RQD (%)
A	Muy mala	0-25
B	Mala	25-50
C	Media	50-75
D	Buena	75-90
E	Excelente	90-100

Fuente: (González, 2002).

✓ Índice de velocidad relativa

Es la relación entre la velocidad de onda longitudinal *in situ* del macizo rocoso y la velocidad medida en muestras de roca intacta en el laboratorio, es decir:

$$\text{Índice de velocidad relativa} = (V_{\text{situ}} / V_{\text{lab}})^2$$

En un macizo de buena calidad con pocas discontinuidades cerradas, la relación debe ser cercana a 1.

A continuación, se presenta la clasificación del macizo rocoso según el índice de velocidad relativa:

Tabla 8. Clasificación del macizo rocoso según el índice de velocidad relativa.

Índice de velocidad relativa $(V_F/V_L)^2$	Calidad del macizo rocoso
<0.2	Muy mala
0.2-0.4	Mala
0.4-0.6	Media
0.6-0.8	Buena
>0.8	Muy buena

Fuente: (González, 2002).

✓ Índice GSI

Es un índice que se obtiene a partir de una gráfica, que incluye parámetros provenientes de observación visual de la estructura del macizo y condiciones de las discontinuidades. Permite obtener parámetros para aplicarlos en simulaciones numéricas, con el fin de establecer características de deformabilidad y resistencia del macizo rocoso, con base en parámetros de la matriz. Es aplicable en macizos de rocas de baja calidad y heterogéneos. El valor del GSI se determina según la siguiente tabla:

Tabla 9. Carta para determinar el valor del índice GSI.

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (Geological strength index) A partir de la clasificación, seleccionar el cuadro correspondiente al valor medio del índice GSI		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas con oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar, bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno	80	70			
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado, bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos		60	50		
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30	
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos				20	10

Fuente: Hoek (1994).

Con base en el valor del GSI, es posible establecer un valor aproximado de la resistencia uniaxial a compresión del macizo y el módulo elástico cuando se tiene una compresión simple mayor de 100 MPa.

Las siguientes son las expresiones que se pueden emplear para determinar dichos parámetros:

Resistencia uniaxial a compresión del macizo

$$\sigma_{cm} = (0.0034mi^{0.8}) \sigma_{ci} [1.029 + 0.025e^{-0.1mi}]^{GSI}$$

El módulo elástico para $\sigma_{ci} < 100\text{MPa}$

$$E_m \text{ (GPa)} = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}}$$

En las que:

m_i : constante de Hoek y Brown, característica de cada roca intacta.

σ_{ci} : resistencia uniaxial a compresión

GSI: valor del GSI

La aplicación de cada sistema de clasificación debe tener en cuenta el tipo de macizo rocoso y los parámetros que incluyen. A continuación, se resume cada sistema de clasificación:

a. Clasificación geomecánica RMR (*Bieniawski*)

Desarrollada por Bieniawski, permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo. Se basa en los siguientes parámetros:

- ✓ Resistencia uniaxial de la roca intacta.
- ✓ RQD.
- ✓ Separación y características de las discontinuidades.
- ✓ Condiciones hidrogeológicas.
- ✓ Orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

Para cada parámetro se establece una puntuación, que se va sumando y luego se corrige de acuerdo con la orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación, finalmente, se obtiene un índice de calidad RMR (*Rock Mass Rating*) que varía de 0 a 100. A continuación, se presenta el detalle de los parámetros de clasificación y corrección:

✓ Parámetros de clasificación

Tabla 10. Parámetros de clasificación del macizo rocoso – RMR (Bieniawski, 1989).

1	Resistencia de la matriz rocosa	Ensayo de carga puntual	>10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple (MPa)	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	<0.06m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		<1m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m		
	Puntuación		6	4	2	1	0		
	Abertura		Nada	<0.1mm	0.1-1.0mm	1-5mm	>5mm		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
	Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
	Relleno		Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm		
	Puntuación		6	4	2	2	0		
	Alteración		Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10m de túnel	Nulo	<10 lt/min	10-25 lt/min	25-125 lt/min	>125 lt/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		

Fuente: Bieniawski (1989).

Tabla 11. Factores de corrección por orientación de discontinuidades – RMR (Bieniawski, 1989).

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: Bieniawski (1989).

✓ Clasificación y calidad del macizo rocoso

Tabla 12. Clasificación del macizo rocoso – RMR (Bieniawski, 1989).

Clase	Calidad	RMR
I	Muy buena	100-81
II	Buena	80-61
III	Media	60-41
IV	Mala	40-21
V	Muy mala	<20

Fuente: Bieniawski (1989).

Según la clasificación RMR, un macizo rocoso de **Clase I** es un macizo duro, poco fracturado, con pocas filtraciones y poco meteorizado, que presenta pocos problemas de estabilidad, de capacidad portante alta, permitirá el corte de taludes con pendientes elevadas y no requiere soporte en túneles.

b. Clasificación geomecánica de Barton: Quality Index (Q)

Es una metodología desarrollada por *Barton, Lien y Lunde* en 1974, permite clasificar macizos, determinar parámetros geotécnicos y diseñar de manera preliminar sostenimientos de túneles. Se basa en la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

En la cual:

J_n: índice de diaclasado que indica el grado de fracturación del macizo.

J_r: índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas.

J_a: índice que representa la alteración de las discontinuidades.

J_w: coeficiente de reducción por la presencia de agua.

SRF (*Stress Reduction Factor*): coeficiente de influencia del estado de esfuerzos del macizo.

A su vez, dentro de la expresión, los factores representan:

RQD/Jn: el tamaño de los bloques.

Jr/Ja: resistencia al corte de los bloques.

Jw/SRF: influencia del estado de esfuerzos.

El valor del índice **Q** oscila entre 0.001 y 1000. La clasificación se obtiene por medio de la siguiente tabla:

Tabla 13. Clasificación del macizo rocoso – Q (Barton, 1994).

Q	Clasificación roca
0.001-0.01	Excepcionalmente mala
0.01-0.1	Extremadamente mala
0.1-1	Muy mala
1-4	Mala
4-10	Media
10-40	Buena
40-100	Muy buena
100-400	Extremadamente buena
400-1.000	Excepcionalmente buena

Fuente: (Barton, 1994).

A continuación, se describe resumidamente cada uno de los parámetros incluidos dentro de la clasificación Q:

✓ Índice de diaclasado, **Jn**

Representa el grado de fracturación del macizo y se obtiene de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 14. Índice de diaclasado, J_n – Q (Barton, 1994).

Índice de diaclasado		J_n
A	Roca masiva, sin diaclasar o con fisuración escasa	0.5-1.0
B	Una familia de diaclasas	2
C	Una familia y algunas diaclasas aleatorias	3
D	Dos familias de diaclasas	4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias	6
F	Tres familias de diaclasas	9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias	12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca con terrones, etc.	15
J	Roca triturada, terrosa	20

Fuente: (Barton, 1994).

En intersecciones de túneles se utiliza la expresión $3J_n$.

En los portales de túneles se emplea la expresión $2J_n$.

✓ Índice de rugosidad de las discontinuidades, J_r

Tabla 15. Índice de rugosidad de las discontinuidades, J_r – Q (Barton, 1994).

Índice de rugosidad de las discontinuidades		J_r
a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad.		
b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10cm		
A	Diaclasas discontinuas	4
B	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares	3
C	Diaclasas onduladas, lisas	2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas	1.5
E	Diaclasas planas, rugosas o irregulares	1.5
F	Diaclasas planas, lisas	1
G	Diaclasas planas, perfectamente lisas.	0.5
c) No existe contacto entre las caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante		
H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad	1
J	Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad	1

Fuente: (Barton, 1994).

Cuando la separación en la familia principal de discontinuidades es superior a 3 m, se debe incrementar el índice J_r en una unidad.

En el caso de las diaclasas planas, perfectamente lisas, que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor $J_r = 0.5$.

✓ Índice de alteración de las discontinuidades, J_a

Tabla 16. Índice de alteración de las discontinuidades, $J_a - Q$ (Barton, 1994).

Índice de alteración de las discontinuidades		ϕ	J_a
a) Contacto entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios)			
A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo	-	0.75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas	25°-35°	1
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	25°-30°	2
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda)	20°-25°	3
E	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	8°-16°	4
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10cm (minerales de relleno en pequeños espesores)			
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	25°-30°	4
G	Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5mm)	16°-24°	6
H	Sobreconsolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5mm)	12°-16°	8
J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorillonita (continuos, pero con espesores inferiores a 5mm), el valor de J_a depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas	6°-12°	8-12
c) No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos de mineral de gran espesor)			
K	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G, H y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	6,8 u 8-12
L			
M			
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles	-	5
O	Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver clases G, H y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	10,13 ó 13-20
P			
R			

Fuente: (Barton, 1994).

✓ SRF (Stress Reduction Factor) o coeficiente de influencia del estado de esfuerzos del macizo.

Tabla 17. Coeficiente de influencia del estado de esfuerzos, SRF – Q (Barton, 1994).

Condiciones tensionales de la roca			SRF	
a) Las zonas débiles intersectan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando				
A	Múltiples zonas débiles, contenido de arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad)		10	
B	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación < 50m)		5	
C	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación > 50m)		2.5	
D	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad)		7.5	
E	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad)		5.0	
F	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de la excavación > 50m)		2.5	
G	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad)		5.0	
b) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas				
		σ_0/σ_1	σ_0/σ_c	SRF
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas	>200	<0.01	2.5
J	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables	200-10	0.01-0.3	1
K	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas	5-3	0.5-0.65	5-50
M	Lajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas	3-2	0.65-1	50-200
N	Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas	<2	>1	200-400
c) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas				
		σ_0/σ_c	SRF	
O	Presión de deformación baja	1-5	5-10	
P	Presión de deformación alta	>5	10-20	
d) Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua				
			SRF	
R	Presión de expansión baja		5-10	
S	Presión de expansión alta		10-15	

Fuente: (Barton, 1994).

✓ Índice de alteración de las discontinuidades, **Ja**

Tabla 18. Índice de diaclasado, Jn – Q (Barton, 1994).

Índice de alteración de las discontinuidades		ϕ_r	J_a
a) Contacto entre los planos de la discontinuidad (sin minerales de relleno intermedios)			
A	Discontinuidad cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo	-	0.75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas	25°-35°	1
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.	25°-30°	2
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda)	20°-25°	3
E	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción, es decir, caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	8°-16°	4
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10cm (minerales de relleno en pequeños espesores)			
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	25°-30°	4
G	Fuertemente sobreconsolidados, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos, pero con espesores inferiores a 5mm)	16°-24°	6
H	Sobreconsolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5mm)	12°-16°	8
J	Rellenos de arcillas expansivas, es decir, montmorillonita (continuos, pero con espesores inferiores a 5mm), el valor de J_a depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas	6°-12°	8-12
c) No se produce contacto entre los planos de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos de mineral de gran espesor)			
K L M	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G, H y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	6,8 u 8-12
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles	-	5
O P R	Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver clases G, H y J, para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6°-24°	10,13 ó 13-20

Fuente: (Barton, 1994).

✓ SRF (Stress Reduction Factor) o coeficiente de influencia del estado de esfuerzos del macizo.

Tabla 19. Coeficiente de influencia del estado de esfuerzos, SRF – Q (Barton, 1994).

Condiciones tensionales de la roca			SRF	
a) Las zonas débiles intersectan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando				
A	Múltiples zonas débiles, contenido de arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad)		10	
B	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación < 50m)		5	
C	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación > 50m)		2.5	
D	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad)		7.5	
E	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libres de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad)		5.0	
F	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de la excavación >50m)		2.5	
G	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (a cualquier profundidad)		5.0	
b) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas				
		σ_c/σ_1	σ_0/σ_c	
			SRF	
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas	>200	<0.01	2.5
J	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables	200-10	0.01-0.3	1
K	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L	Lajamiento moderado de la roca después de 1 hora en rocas masivas	5-3	0.5-0.65	5-50
M	Lajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas	3-2	0.65-1	50-200
N	Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas	<2	>1	200-400
c) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas presiones litostáticas				
		σ_0/σ_c	SRF	
O	Presión de deformación baja	1-5	5-10	
P	Presión de deformación alta	>5	10-20	
d) Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua				
			SRF	
R	Presión de expansión baja		5-10	
S	Presión de expansión alta		10-15	

Fuente: (Barton, 1994).

✓ Factor de reducción por la presencia de agua, **J_w**

Tabla 20. Factor de reducción por la presencia de agua, J_w – Q (Barton, 1994).

Factor de reducción por la presencia de agua		Presión de agua (kg/cm ²)	J _w
A	Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5 lt/min, de forma localizada	<1	1
B	Afluencia a presión media, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades	1-2.5	0.66
C	Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno	2.5-10	0.5
D	Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas	2.5-10	0.33
E	momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo	>10	0.2-0.1
F	Afluencia excepcionalmente alta, o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable	>10	0.1-0.05

Fuente: (Barton, 1994).

2.3.3. Comparación entre tipos de terreno

Gutiérrez (2015) explica que, comúnmente se emplea el valor de resistencia a compresión simple, para establecer límites entre suelo y roca. En la zona de transición se encuentran los suelos duros y las rocas blandas. En el caso de los suelos, la resistencia está dada por una gran deformabilidad y no por la fractura de partículas; cuando el terreno corresponde a un macizo rocoso, su respuesta está dada por la resistencia de la roca, zonas de alteración y discontinuidades. Los macizos rocosos son afectados por diaclasas tectónicas y planos de debilidad, también se encuentran sometidos a esfuerzos tectónicos, mientras que los suelos están sujetos a estados de esfuerzos debidos a fuerzas litostáticas.

Las propiedades de resistencia de la matriz de roca están dadas por el tipo de roca y su grado de alteración.

2.3.4. Distribución de esfuerzos en túneles

Los esfuerzos en un macizo rocoso se relacionan con el peso de los estratos y con su historia geológica. En estado natural, la roca se encuentra sometida a un estado de esfuerzos *in situ*, en el que se admite que el esfuerzo principal mayor corresponde a compresión vertical debida al peso del terreno y a los esfuerzos horizontales, que a su vez corresponden a una fracción del vertical. Cuando se excava, estos esfuerzos se redistribuyen y se generan esfuerzos adicionales.

En la parte superior de la excavación (bóveda) se generan esfuerzos a tracción y en las paredes se generan esfuerzos a compresión. Si el terreno corresponde a roca sólida y homogénea, en la excavación se genera un efecto de arco y es posible que no haya necesidad de emplear elementos de soporte. En terrenos blandos se produce un efecto similar a la presión hidrostática, y es necesario el empleo de un sostenimiento que resista la presión de sobrecarga. En zonas con pliegues y fallas los esfuerzos pueden ser elevados e irregulares. (Gutiérrez, 2015).

2.3.4.1. Esfuerzos en rocas duras

Gutiérrez (2015), explica que la distribución de esfuerzos resultante de una excavación depende de factores como el estado tensional anterior a la excavación, el comportamiento mecánico del terreno, el método de excavación, el tipo de sostenimiento y el proceso constructivo.

En las inmediaciones de la excavación, las trayectorias de los esfuerzos principales se desvían, dejando de ser verticales u horizontales. Ya que el terreno se encuentra sometido a compresión uniaxial se presentan zonas de concentración de esfuerzos tanto de tracción como de compresión. En una zona de aproximadamente 3 veces el diámetro, las trayectorias de esfuerzos no se ven influenciadas por la excavación.

La forma y orientación de los esfuerzos pueden inducir condiciones adversas. El radio de curvatura influye sobre las concentraciones de esfuerzos en las esquinas de la excavación. A menor radio de curvatura del límite del perímetro, se tiene mayor concentración de

esfuerzos de compresión. La condición más favorable se obtiene con el radio de curvatura más grande para esa periferia; por lo tanto, la forma óptima es un círculo, cuando el radio de curvatura toma el valor más alto posible.

Así mismo, cuando se excava, se pierde confinamiento y hay una disminución de la tensión radial alrededor de la excavación. El nivel de deformación del terreno en la falla y la resistencia dependen del confinamiento.

En algunos casos se inducen esfuerzos que exceden la resistencia de la roca y se presenta su debilitamiento en el perímetro de la excavación, conllevando a la inestabilidad, que se manifiesta con un cierre gradual de la excavación (Convergencia), derrumbes en la bóveda, desprendimientos e incluso estallidos de roca.

A profundidades menores de 500 m los esfuerzos horizontales son mayores que los verticales. Los esfuerzos verticales tienden a equilibrarse con los horizontales a profundidades mayores de 1 km. Si se presentan grandes diferencias de esfuerzos se generan fracturas, flujo plástico o deformaciones relacionadas con el tiempo, que tienden a reducir la diferencia entre esfuerzos horizontales y verticales. (Hoek y Brown, 1980).

Para calcular los esfuerzos inducidos se emplea la teoría elástica, basada en un sistema de coordenadas polares que divide los esfuerzos en una componente radial, una tangencial y una cortante, en los límites de la excavación el esfuerzo radial y el esfuerzo cortante son cero.

En el perímetro de la excavación, la tensión radial que existe equivale a la que está siendo soportada por el sostenimiento; la excavación será estable si el terreno puede soportar el estado tensional resultante.

La distribución de los esfuerzos alrededor de la excavación varía si el comportamiento del terreno es frágil o dúctil; también depende de la geometría y de los esfuerzos aplicados.

El modelo de esfuerzos es independiente del material, siempre y cuando se trate de un material elástico lineal. Los esfuerzos son independientes del tamaño de la excavación; sin embargo, en el caso de macizos fracturados, la estabilidad de la excavación depende de la relación entre el tamaño de la excavación y el tamaño de los bloques en el macizo.

Es decir, que “al aumentarse el tamaño de la excavación en una formación de roca típicamente fisurada no aumentarán los esfuerzos, aunque se provocará una disminución de la estabilidad” (Hoek y Brown, 1980).

Cuando el material se encuentra en el rango de las deformaciones elásticas, al retirar la carga aplicada, se recuperan las deformaciones. A partir de un nivel de deformación dado, la roca no puede mantener el comportamiento elástico y se producen deformaciones plásticas. En este punto, la relación entre el esfuerzo y la deformación deja de ser lineal. Una vez superado el límite de elasticidad, las deformaciones no se recuperan al retirar la carga.

2.3.5. Resistencia del terreno

2.3.5.1. Resistencia de rocas blandas

Según Gutiérrez (2015), cuando se da lugar a un cambio en el estado de esfuerzos de una roca, puede ocurrir de manera más habitual la falla por esfuerzo cortante. La resistencia al corte de un material rocoso blando depende especialmente del estado de esfuerzos al que se encuentra sometido.

En rocas blandas, para esfuerzos inferiores a la resistencia máxima se tienen deformaciones plásticas irreversibles y un incremento bajo de carga puede desencadenar la falla progresiva del material; este mismo efecto es producido por los procesos de meteorización y la acción de una carga constante en el tiempo.

En macizos rocosos blandos, la resistencia está controlada por la resistencia de la matriz o la combinación con la resistencia de las discontinuidades, dado que la resistencia de la matriz puede ser menor que la de las discontinuidades.

2.3.5.2. Resistencia de rocas duras

En macizos cuya matriz es resistente y se encuentra en buenas condiciones, las familias de discontinuidades controlan la resistencia (Gutiérrez, 2015)

La estabilidad de la excavación a baja profundidad depende en gran medida de las condiciones estructurales y grado de meteorización del macizo. En excavaciones profundas, la estabilidad depende del comportamiento del macizo (resistencia de la roca), con respecto a los esfuerzos inducidos alrededor de la excavación. (Hoek y Brown 1980).

Hoek y Brown (1980) exponen que, cuando se supera la resistencia máxima de una masa rocosa, se puede esperar uno de los siguientes comportamientos: (

- Comportamiento frágil: una vez que se alcanza la tensión máxima pierde súbitamente su resistencia, disminuyendo hasta un valor cercano a cero. Este comportamiento es típico de rocas duras de elevada resistencia, donde la roca presenta una pérdida casi inmediata de resistencia sin ninguna o baja deformación plástica. Se presentan diferencias importantes entre la resistencia máxima y la residual.
- Comportamiento frágil-dúctil: la resistencia decrece hasta cierto valor después de que se alcanzan grandes deformaciones. Este comportamiento se presenta típicamente en las discontinuidades o materiales arcillosos sobreconsolidados.
- Comportamiento dúctil: tan pronto es alcanzada la tensión máxima, se mantiene hasta llegar a una deformación unitaria en la cual se disgrega y se obtienen grandes deformaciones sin perder la resistencia. Las rocas blandas como las sales presentan este comportamiento. En este caso la resistencia pico y la residual son iguales.

La ductilidad aumenta a medida que aumentan la presión de confinamiento y la temperatura, también puede presentarse en macizos muy fracturados y en algunas rocas blandas.

La manera en que inicia y se propaga la fractura, depende de la composición mineralógica de la roca, tamaño de los cristales, su angularidad, orientación de los granos y los materiales cementantes entre los granos.

Tanto en zonas de esfuerzo de confinamiento bajo como en franjas cercanas a las superficies libres de las excavaciones subterráneas, se observa la formación de fracturas paralelas a la dirección del esfuerzo principal mayor.

La resistencia de la roca aumenta a medida que aumenta el esfuerzo principal intermedio, sin embargo, este aumento es despreciable para aplicaciones prácticas.

A medida que aumenta el número de discontinuidades en un macizo rocoso, su comportamiento tiende a ser más isotrópico. Cuando se tienen cuatro o más series de discontinuidades, su comportamiento se puede considerar como isotrópico a menos que una de las discontinuidades sea más importante que las demás.

A medida que aumenta el tamaño de la muestra de roca, disminuye la resistencia; sin embargo, en el caso de macizos fisurados, la variación en resistencia se relaciona con el tamaño y separación de las discontinuidades. (*Hoek, Brown. 1980*).

Cuando se tienen discontinuidades en el terreno, es necesario tener en cuenta el efecto de escala al evaluar las muestras y definir los parámetros de diseño. Es decir, al definir los parámetros de diseño a emplear, se debe tener en cuenta la cantidad de discontinuidades que tiene la muestra con respecto a la cantidad de discontinuidades que tiene la futura excavación. En general, los macizos presentan propiedades inferiores a las que se determinan en el laboratorio.

El comportamiento elástico o plástico depende de las propiedades de la roca y de las condiciones de aplicación de los esfuerzos. El esfuerzo de confinamiento puede hacer que el comportamiento de la roca cambie de frágil a dúctil.

En la post-rotura se produce un fenómeno de dilatación (incremento de volumen) cuando se comienzan a desarrollar las fisuras debido a la plastificación.

2.3.5.3. Mecanismos de falla del terreno

Gutiérrez (2015), explica que, los mecanismos de falla dependen de los niveles de esfuerzos *in situ* y de las características del macizo rocoso.

La excavación de un túnel en una masa de roca intacta es la condición ideal, ya que, en combinación con relativamente bajos niveles de esfuerzos, puede haber pocos o ningunos problemas de estabilidad y el soporte requerido es mínimo.

En rocas fisuradas se presentan problemas de estabilidad en la excavación, relacionados con caídas de bloques en la bóveda y paredes. A baja profundidad los esfuerzos son bajos y no tienen mucho efecto sobre este modo de falla, ya que cuando los esfuerzos en la roca circundante son menores que la quinta parte de la resistencia a compresión uniaxial de la roca, no se presenta este tipo de problema. Cuando aumenta la profundidad o se hacen varias excavaciones cercanas, aumentan los esfuerzos y se pueden producir desprendimientos.

A bajas profundidades, en donde el macizo cuenta con discontinuidades, los problemas de estabilidad se asocian a caídas de bloques o cuñas de la bóveda cuando el confinamiento es bajo.

A medida que la profundidad aumenta, el nivel de esfuerzos aumenta y puede alcanzar un nivel en el que se induce la falla del macizo de tipo descascaramiento, “*slabbing*” y “*rock burst*” (estallido de rocas).

Tabla 21. Tipo de falla del terreno según el material que lo compone.

Tipo de falla	Material
Empujes de montaña o squeezing	Roca blanda, suelos
Hinchamiento o swelling	Roca blanda
Estallido de rocas (popping, rock burst y slabbing)	Rocas duras
Desprendimientos del terreno	Suelos, túneles superficiales
Cuñas de roca	Roca dura y blanda
Zonas de falla, zonas fracturadas	Roca dura y blanda
Terreno que corre	Suelos, túneles superficiales
Terreno que fluye	Roca blanda, suelos, túneles superficiales
Agresividad	Roca dura
Gases (explosivos y venenosos)	Roca dura y blanda
Subsidencia	Roca blanda, túneles superficiales
Creep	Roca blanda

Fuente: (US. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2009).

a. Empujes de montaña o *squeezing*

Ocurre cuando se produce una redistribución de esfuerzos alrededor de la excavación que supera la resistencia del macizo rocoso. El terreno irrumpe plásticamente dentro del túnel, sin fractura visible o pérdida de continuidad y sin un incremento perceptible del contenido de humedad. Se produce una fluencia plástica - dúctil y flujo debido a los sobreesfuerzos.

Los esfuerzos radiales caen a cero y los esfuerzos tangenciales incrementan hasta tres veces los esfuerzos de sobrecapa. Si la resistencia a compresión de la roca es menor que el esfuerzo tangencial aumentado, se da lugar a la falla denominada "*squeezing*" o empujes de montaña. Debido a la falla, se reduce la capacidad de carga del terreno y la carga se transfiere por cortante interno al terreno adyacente, hasta que se alcance el equilibrio. Si el terreno desarrolla falla frágil e irrumpe desde las paredes del túnel, entonces no hay resistencia residual al corte del terreno fallado en la redistribución de cargas. Si el terreno es lo suficientemente débil o la sobrecarga demasiado grande, el túnel puede cerrarse completamente (Gutiérrez, 2015).

Desde el punto de vista del diseño de túneles, un macizo rocoso se considera débil cuando su resistencia a compresión uniaxial es significativamente menor que los esfuerzos inducidos actuando sobre el macizo que rodea el túnel.

Se produce en terrenos con baja resistencia friccional, donde la cantidad de deformación depende del grado de sobre-esfuerzos y ocurre a bajas y medias profundidades en arcillas de consistencia muy blanda a media.

b. Hinchamiento o *swelling*

Gutiérrez, 2015 anota que, se produce por la tendencia a la absorción de agua de algunas rocas, produciendo un aumento de volumen hacia el interior del túnel. Se presenta cuando el terreno cuenta con las siguientes características:

- ✓ Contenido de minerales expansivos.
- ✓ Estructura y fábrica de materiales arcillosos.

✓ Contenido de materiales cementantes.

Las rocas expansivas más comunes son la marga arcillosa, la argilita y la montmorillonita.

Las arcillas altamente preconsolidadas con índice de plasticidad superior a 30, generalmente contienen elevados porcentajes de montmorillonita.

Los daños que provoca este fenómeno incluyen el levantamiento y rotura de la solera, rotura de hastiales y clave.

El soporte debe diseñarse para resistir la presión de expansión, que puede determinarse por medio de ensayos de laboratorio. Para reducir los efectos de la expansión se recomienda el empleo de solera curva, anclajes o pernos, relleno con material blando, inyecciones y además conservar seca la excavación por medio de drenajes, túneles de desagüe o bombeo.

Se asocia con el squeezing, pero puede ocurrir sin la formación de una zona plástica. En campo es difícil distinguir entre “squeezing” y “swelling”; ya que el fenómeno de “squeezing” casi siempre se auto-limita, mientras que el “swelling” puede continuar indefinidamente mientras haya agua y minerales de arcilla.

c. Esfuerzos que inducen falla de la roca o estallido de rocas

El estallido de rocas se debe al desprendimiento repentino de rocas fracturadas producido por la liberación rápida de tensiones. A medida que aumenta la profundidad de un túnel, en condiciones de terrenos poco favorables, los esfuerzos que rodean el macizo incrementan y ocurre la falla cuando exceden la resistencia del macizo. Este tipo de falla puede variar de descascaramientos menores o “slabbing” en la superficie de la roca, hasta estallidos o “rockburst” en los cuales ocurre la falla de volúmenes grandes de roca.

d. Desprendimientos del terreno

Ocurre cuando fragmentos de material se desprenden progresivamente de la bóveda o paredes, algunas veces después de que el terreno ha sido expuesto, debido a que durante el avance de la excavación se produce una descompresión que tiende a abrir los sistemas de discontinuidades debilitándolos y produciéndose un aflojamiento (Gutiérrez, 2015)

e. Cuñas de roca

Se presentan cuando las dimensiones del túnel son mucho mayores que la separación entre las discontinuidades, en este caso, el comportamiento del material depende de las características de las discontinuidades. El diseño consiste en prevenir la tendencia del bloque a desprenderse, ya que ello puede desencadenar el desprendimiento de otros bloques llevando al colapso del túnel; sin embargo, el desprendimiento de algunas cuñas también puede terminar en el equilibrio, pues se detienen los desprendimientos (Gutiérrez, 2015).

Se debe realizar el diseño determinando la cuña que se debe soportar, para que se redistribuyan los esfuerzos y mantener la estabilidad general de la excavación. Esto hace que la roca forme un “efecto de arco” alrededor de la excavación y se redistribuyan las cargas, de manera que el terreno soporte la mayoría de la carga.

Para estabilizar los bloques o cuñas y por tanto la excavación, es necesario determinar el número, orientación y condición de las discontinuidades. El análisis puede realizarse empleando para túneles pequeños y de geometría común, una aproximación de cuerpo libre.

Para túneles mayores con geometría y sistemas de discontinuidades complicados, se recomiendan programas de computador como Unwedge.

f. Terreno que fluye

Se presenta cuando una mezcla de suelo y agua fluye dentro del túnel como un líquido viscoso. Ocurre en materiales no cohesivos como arena seca y grava limpia. El material puede provenir de la bóveda del túnel, paredes, frente y llegar incluso a llenar completamente el túnel (Gutiérrez, 2015).

Puede ocurrir bajo el nivel del agua en limos, arcillas o gravas sin suficiente contenido de arcilla que proporcione cohesión y plasticidad. También puede ocurrir en arcillas altamente sensibles cuando se disturban.

En roca de mala calidad y meteorizada, la estabilidad de la excavación se encuentra relacionada con suelos en compresión o que fluyen y que cuentan con tiempos de autosoporte muy cortos. En estos casos, es necesario implementar refuerzos de manera inmediata, a medida que avanza el frente de trabajo.

g. Subsistencia

Cuando se lleva a cabo la excavación se produce un nuevo estado de esfuerzos y deformaciones en el terreno alrededor del frente; si el terreno no puede soportar dichos esfuerzos se produce el colapso en el frente, que puede propagarse hacia la superficie del terreno generando un hundimiento o subsistencia.

h. Creep

(Gutiérrez, 2015) explica que, es un aumento de las deformaciones bajo esfuerzos constantes que presentan algunos materiales rocosos. El material puede llegar a la rotura cuando se mantienen unas condiciones de carga o deformación constantes en el tiempo. Es un comportamiento típico de las rocas de sal.

En este proceso el material sigue un comportamiento viscoso, es decir, con deformaciones lentas y continuas en el tiempo. Cuando se aplica la carga, se produce una deformación elástica, el proceso comienza con una desaceleración en el tiempo de la deformación o

creep primario, posteriormente se presenta el *creep* secundario en el cual las deformaciones aumentan y su rango llega a ser constante. Si los esfuerzos actuantes se encuentran cercanos al pico, se puede pasar a un *creep* terciario, en el cual, el nivel de deformaciones aumenta hasta llegar a la rotura.

El *creep* o fluencia se puede producir por micro fisuración o flujo. La siguiente figura ilustra la evolución del proceso de *creep* en el tiempo:

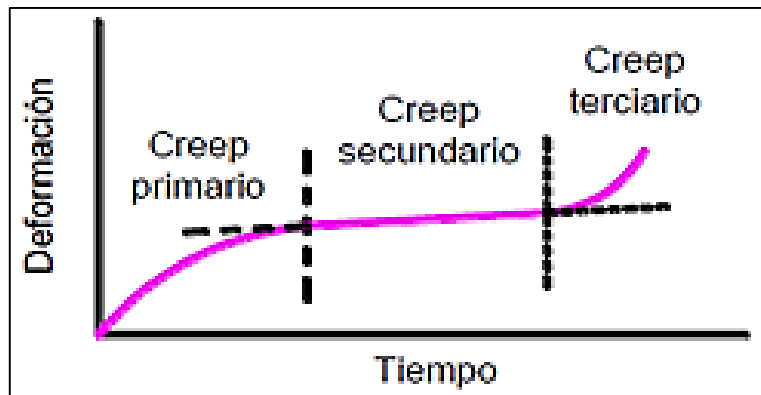


Figura 11. Evolución del proceso de creep en el tiempo.

Fuente: (González, 2002).

i. Explosiones por presencia de gas

Descripción de los principales gases en Minas Subterráneas. (Gutiérrez, 2015).

✓ Oxígeno (O₂)

- Gravedad específica: 1.1054
- Rango Explosivo e Inflamabilidad. El oxígeno no es un gas explosivo, pero ayuda a la combustión.
- Riesgos para la Salud. El oxígeno encontrado en el aire normal no es tóxico. De hecho, es esencial para la vida. Es riesgoso respirar aire que es bajo en oxígeno, y el hecho de respirar aire extremadamente deficiente en oxígeno puede matarle.
- Solubilidad. Moderadamente soluble en agua.

- Color / Olor / Sabor. Sin ninguno de ellos.
- Causa u Origen. El Oxígeno es el segundo componente más grande del aire normal. Alrededor del 21% del aire normal es oxígeno.
- Métodos de detección. Para detectar atmósferas deficientes en oxígeno, se usa un indicador de oxígeno o lámpara no inflamable. Dado que el oxígeno es solo ligeramente más pesado que el aire, se debe tener el detector portátil al nivel de la cintura cuando se pruebe la deficiencia de oxígeno.

✓ **Nitrógeno (N₂)**

- Gravedad específica: 0.9674
 - Rango Explosivo e Inflamabilidad: El nitrógeno no es un gas explosivo y no arderá.
 - Riesgos para la Salud: El nitrógeno no es tóxico. Sin embargo, en concentraciones oxígeno en el aire.
 - Causa u Origen: El aire normal contiene aproximadamente 78% de nitrógeno, haciéndolo el componente más grande del aire normal.
 - Una fuente de nitrógeno en minas subterráneas es la detonación de explosivos.
- Encontrado en: Los niveles aumentados de nitrógeno se encuentran presentes con frecuencia, después de que los explosivos han sido detonados.

✓ **Monóxido de Carbono (CO)**

- Gravedad Específica: 0.9672
 - Rango Explosivo e Inflamabilidad: El monóxido de carbono es explosivo e inflamable. Su rango explosivo en el aire normal es del 12.5% al 74.2%.
- Nota: Quizás usted quiera mencionar que el monóxido de carbono es el gas mortal asociado con las emisiones de los automóviles. El monóxido de carbono es así de tóxico porque se combina fácilmente con sus células rojas de la sangre (hemoglobina), las células que normalmente acarrear oxígeno a los tejidos de su cuerpo. Una vez que las células han tomado CO, ya no tienen la capacidad de llevar oxígeno. No se necesita mucho CO para interferir la capacidad del acarreo de oxígeno de su sangre debido a que el gas, se combina con la hemoglobina de 200 a 300 veces más rápido que el oxígeno.
- Solubilidad: El monóxido de carbono es ligeramente soluble en agua.

- Causa u Origen: El monóxido de carbono es un producto de combustión incompleta de cualquier material de carbono.
- Explosividad: El CO puede ser explosivo al acumularse arriba de 120,000 partes por millón, lo cual se podría dar como producto de un incendio grande, en un área confinada o sellada sin ningún flujo de ventilación o descarga de gases.

✓ **Dióxido de Nitrógeno (NO₂ o N₂O₄)**

- Gravedad específica: 1.5894
 - Rango Explosivo e Inflamabilidad: El NO₂ no arderá ni explotará.
 - Riesgo para la Salud: Los óxidos de nitrógeno son altamente tóxicos. El respirar aún pequeñas cantidades irritará la garganta.
- Solubilidad: Solubilidad muy ligera en agua.

✓ **Sulfuro de Hidrógeno H₂S, también conocido como Hidrógeno Sulfurado y Ácido Sulfhídrico.**

- Gravedad Específica: 1.1906
- Rango Explosivo e Inflamabilidad: El sulfuro de hidrógeno es inflamable y explosivo en concentraciones de 4.3% a 45.5% en aire normal. Es más explosivo a un 14.2 %.
- Riesgo para la Salud: El sulfuro de hidrógeno es uno de los gases más venenosos conocidos. En bajas concentraciones (0.005 a 0.010%) el sulfuro de hidrógeno provoca inflamación de los ojos y vías respiratorias. Las concentraciones un poco más altas (0.02% a 0.07%) pueden llevar a una bronquitis, o neumonía. Concentraciones más altas (0.07% a 0.10%) pueden causar una rápida pérdida del sentido, paro respiratorio y la muerte. Del 0.10% a 0.20% o más puede causar una muerte rápida.
- Solubilidad: Si es soluble en Agua.
- Color / Olor / Sabor: El sulfuro de hidrógeno no tiene color, tiene olor a huevo podrido y un ligero sabor dulce.

Causa u Origen: El sulfuro de hidrógeno es producido cuando los compuestos de sulfuro se descomponen. Es encontrado en ciertos campos de aceite y gas y en algunas minas de yeso. También puede ser liberado en minas con metano.

El sulfuro de hidrógeno es a menudo liberado cuando el agua ácida de mina contiene el gas en solución. El calentar los sulfuros en medio de humedad (cómo en incendios de mina) puede producir el gas también.

Dónde se encuentra: El sulfuro de hidrógeno es encontrado en lugares bajos de la mina debido a que es un gas relativamente pesado. Es a menudo, también encontrado en acumulaciones de agua.

Dióxido de Azufre (SO₂)

- Gravedad específica: 2.2638
- Rango Explosivo e Inflamabilidad: No arderá ni explotará.
- Riesgos para la Salud: El dióxido de azufre es un gas muy tóxico, irritante y que es peligroso aún en pequeñas concentraciones. Tan poco cómo un 0.04% al 0.05% es peligroso para la vida.
- Solubilidad: Altamente soluble en agua. (El dióxido de azufre es uno de los gases más solubles encontrados en las minas).
- Color / Olor / Sabor: El dióxido de azufre no tiene color, pero tiene un sabor amargo, ácido y fuerte olor sulfuroso.
- Causa u Origen: El dióxido de azufre puede ser producido por voladuras en metales de sulfuro y por incendios que contienen piritita). El dióxido de azufre puede ser liberado durante la quema de algunos combustibles diésel y por explosiones de metal sulfuroso y polvoso.
- Dónde se encuentra: Debido a que es relativamente pesado, el dióxido de azufre tiende a juntarse en lugares bajos de la mina y cerca de fosas.

Dióxido de Carbono (CO₂)

- Gravedad Específica: 1.5291
- Rango Explosivo e Inflamabilidad: El dióxido de carbono no arderá ni explotará
- Riesgo para la Salud: El aire normal contiene alrededor del 0.03% de dióxido de carbono.

- Solubilidad: El dióxido de carbono es soluble en agua.
- Color / Olor / Sabor: El dióxido de carbono no tiene color ni olor. Las altas concentraciones pueden producir un sabor ácido.
- Causa u Origen: El dióxido de carbono es un componente normal del aire. Es un producto de una combustión completa, se produce también durante una voladura con explosivos y es un subproducto del proceso de respiración.
- Los incendios, explosiones y las operaciones de voladura producen CO₂. En algunas minas, es liberado del estrato rocoso.
- Dónde se encuentra: Debido a que es relativamente pesado, el CO₂ será encontrado en grandes concentraciones a lo largo del piso y en lugares bajos en la mina. Con frecuencia, también aparece en trabajos abandonados, durante incendios, y después de explosiones o detonaciones de explosivos.

Metano (CH₄)

- Gravedad específica: 0.5545
- Rango Explosivo e Inflamabilidad: El metano es inflamable. Su rango explosivo es del 5% al 15% cuando hay al menos 12.1% de oxígeno en el aire. El metano es sin embargo más explosivo en el rango de 9.5% al 10%.
- El rango explosivo del metano no es una medida absoluta de seguridad. Hay otros factores que se deben considerar. Por ejemplo, la presencia de otros gases combustibles con rangos explosivos más amplios o puntos de ignición más bajos que el metano pueden resultar en una mezcla explosiva más alta.
- Riesgo para la Salud: El metano no es tóxico. Sin embargo, en altas concentraciones puede causar asfixia por la baja del contenido de oxígeno en el aire normal. El aspecto más peligroso del metano es el hecho de que es explosivo.
- Solubilidad: Ligeramente soluble en agua.
- Color / Olor / Sabor: Sin ninguno de ellos.
- Causa u Origen: El metano puede ser liberado por el estrato en minas de metal y de carbón cuando el esquisto carbonífero es penetrado, y ocasionalmente cuando la roca carbonífera es contactada o está en la cercanía.
- El metano puede producirse también en cantidades grandes por estallidos de roca

repentinos en algunas minas.

- Donde se encuentra: Debido a que el metano es relativamente ligero, se junta en lugares altos, así que se puede encontrar en las partes altas de las minas. Puede también encontrarse en áreas recientemente minadas, en áreas con poca ventilación y en secciones abandonadas o fuera de operación de la mina.

Debido a que es un gas relativamente liviano (baja gravedad específica), el metano es usualmente fácil de dispersar y remover de la mina por medio de la ventilación.

- Polvo de carbón: El polvo de carbón son partículas muy finas de la explotación de este mineral. Se acumula a lo largo de los túneles o galerías de la mina en techos, paredes y pisos, siendo los sitios de carga y descarga de carbón los de mayor acumulación de este material. El polvo de carbón es combustible, en contacto con una chispa, se enciende de inmediato. El tamaño de las partículas determina el grado de riesgo, es decir, entre más pequeñas sean las partículas de este mineral, más posibilidad hay de que se presente una explosión dentro de la mina.

- El polvo de carbón está formado por un pentágono de explosividad, este pentágono está compuesto por: **polvo en suspensión, fuente de calor, combustible, oxígeno y confinamiento**; para evitar una explosión hay que eliminar por lo menos uno de los factores del pentágono; es imposible evitar el oxígeno, el confinamiento, el polvo en suspensión y muy difícil la fuente de calor.

Acetileno (C₂H₂)

- Gravedad específica: 0.9107

- Rango Explosivo e Inflamabilidad: El acetileno es combustible, pero no apoyará la combustión. Su rango explosivo en aire normal es de 2.5% al 80%.

- Riesgo para la Salud: El acetileno es ligeramente tóxico. En concentraciones altas, puede causar asfixia al mermar el oxígeno en la atmósfera.

- Solubilidad: Muy ligeramente soluble en agua.

- Color / Olor / Sabor: El acetileno no tiene color ni sabor. Tiene un ligero olor a ajo.

- Causa u Origen: El acetileno se forma cuando el metano es quemado o calentado en aire con bajo contenido de oxígeno.

- Dónde se encuentra: El acetileno es encontrado después de explosiones de metano en aire con un bajo contenido de oxígeno.
- Significado de los Hallazgos: La presencia del acetileno podría indicar que una explotación ha tenido lugar en un área con un bajo contenido de oxígeno, como puede ser el caso de un área sellada.

Hidrógeno (H₂)

- Gravedad Específica: 0.0695
- Rango Explosivo e Inflamabilidad: El hidrógeno es un gas altamente explosivo. El aire conteniendo del 4% al 74.2% explotará aun cuando haya tan poco como un 5% de oxígeno presente. Las explosiones muy violentas son posibles cuando el aire contiene más del 7% al 8% de hidrógeno.

La presencia de pequeñas cantidades de hidrógeno aumenta en gran manera el rango explosivo de otros gases.

- Color / Olor / Sabor: Sin ninguno de ellos.
- Causa u Origen: El hidrógeno es producido por la combustión incompleta de materiales de carbón durante incendios o explosiones. También puede ser liberado cuando el agua o vapor tienen contacto con materiales calientes de carbón durante el combate de incendios.
- Dónde se encuentra: en la cercanía de estaciones de recarga de baterías, dónde se han detonado explosivos, y después de explosiones. Como el hidrógeno es un gas relativamente liviano, tiende a acumularse en lugares altos de la mina.

A continuación, en la Tabla 22, se presentan los mecanismos de falla más frecuentes dentro del desarrollo de las labores subterráneas de explotación en el Municipio de Sogamoso.

Tabla 22. Mecanismos de falla en minería de carbón dentro del Municipio de Sogamoso.

MECANISMO	APLICA	EVALUADO EN LA INVESTIGACIÓN
Squeezing ground	SI	SI
Swelling	SI	SI
Cuñas	SI	SI
Terreno que fluye	NO	-
Cargas de desprendimiento	NO	-
Gases	SI	N.A - Se maneja por medio de ventilación
Infiltraciones de agua	SI	N.A - Se maneja por medio de bombeo
Popping o Rockburst	NO	-

Fuente: Elaboración propia

2.4. Modelos constitutivos o criterios de falla

Gutiérrez (2015), expone que, el comportamiento mecánico del terreno depende de su resistencia y del estado de esfuerzos al que se encuentra sometido. El estado de esfuerzos se define con base en los esfuerzos principales mayor, menor e intermedio. La magnitud y dirección de los esfuerzos determina las deformaciones y la falla de la roca. Las rocas fallan en condiciones de esfuerzo diferencial y la relación entre esfuerzos determina el nivel de deformaciones. Conociendo las relaciones de estado de esfuerzos y deformaciones, es posible predecir el comportamiento del material para un estado de esfuerzos dado. Los modelos constitutivos o criterios de falla representan la relación entre los componentes del esfuerzo y deformaciones de un material.

Los modelos o criterios de falla más empleados que describen el comportamiento del terreno en ingeniería de rocas son:

- Mohr Coulomb
- Hoek-Brown

a. Criterio de Mohr Coulomb

El criterio de falla para suelos más empleado fue propuesto por Coulomb, modificado posteriormente para crear el modelo *Mohr-Coulomb*, que relaciona los esfuerzos efectivos normales y los esfuerzos cortantes que actúan sobre cualquier plano del suelo. También fue empleado para representar la resistencia de la matriz rocosa isótropa; sin embargo, debido a que se trata de un criterio lineal no se ajusta adecuadamente al comportamiento real de la roca, como sí lo hace el criterio *Hoek y Brown*.

De acuerdo con el criterio, para un suelo saturado, la resistencia al corte está dada por:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u)\tan\phi'$$

En la cual:

- τ : resistencia al corte del suelo.
- σ_n : esfuerzo normal.
- u : presión de poros.
- c' : cohesión efectiva.
- ϕ' : ángulo de fricción interno efectivo.

La expresión representa una línea o envolvente de falla del suelo que proporciona para cada valor de esfuerzo normal, su máxima resistencia a cortante. El criterio de *Mohr - Coulomb* se representa comúnmente por medio de la siguiente figura:

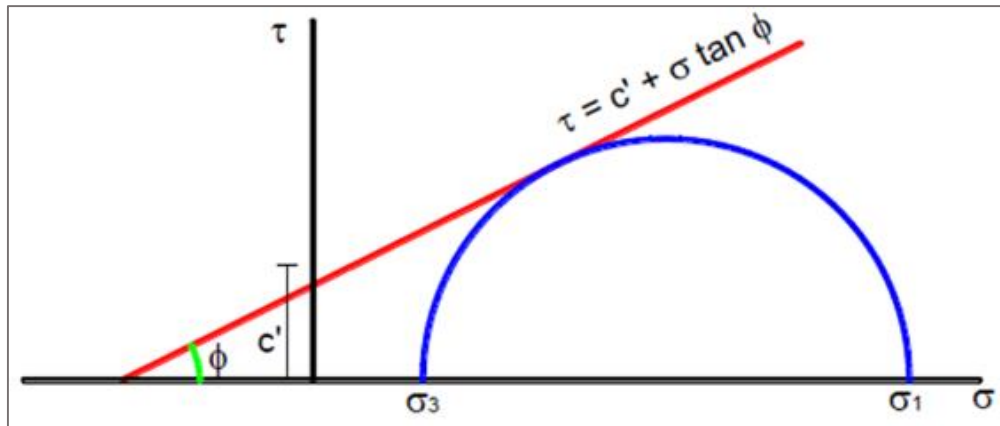


Figura 12. Criterio de Mohr Coulomb.

Fuente: Adaptado de (González, 2002).

b. Criterio de *Hoek-Brown*

Es un criterio empírico que permite describir el comportamiento previo a la falla de todo tipo de rocas en un rango amplio de esfuerzos de confinamiento. Se considera más adecuado para rocas dado que es un criterio no lineal, que se ajusta más a su comportamiento real.

Las expresiones matemáticas del criterio son:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + S \right)^a$$

En la cual:

σ_1 : Esfuerzo principal mayor

σ_3 : Esfuerzo principal menor

σ_c : Resistencia a compresión simple

m: Parámetro de fricción del terreno

S, a: Constantes que dependen de las características del terreno

$$S = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{cMR}}}$$

El parámetro m se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$m = m_i e^{\frac{RMR-100}{28}}$$

En donde:

RMR: Índice de Bieniawski

m_i : se calcula con la ecuación:

$$m_i = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - \sigma_c}{\sigma_c \sigma_3}$$

El parámetro S para el macizo se calcula con la expresión:

$$S = e^{\frac{RMR-100}{5}}$$

Se representa gráficamente de la siguiente manera:

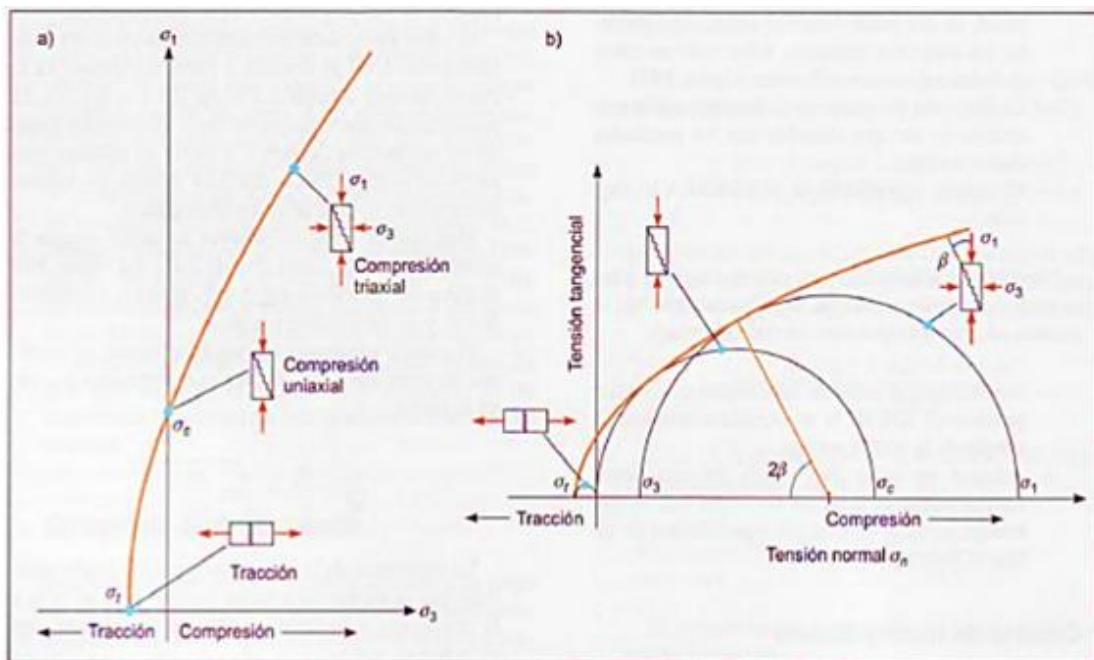


Figura 13. Criterio de Hoek – Brown.

Fuente: (González, 2002).

Capítulo 3 Ejemplo representativo de mina de carbón para el municipio de Sogamoso

Para determinar el ejemplo representativo de mina de carbón se debe tener como referencia la información geológica existente y la obtenida durante las visitas a las minas representativas de las diferentes áreas de explotación, además, se debe agrupar los siguientes objetivos:

- Que el sistema de explotación responda a la experiencia de la mano de obra de la región, a los hábitos de trabajo, a variaciones briscas de producción y logre una recuperación aceptable.
- Que contemple medidas mínimas de seguridad minera.
- Que los requerimientos de maquinaria y equipo en lo posible sean de producción nacional y su accionamiento sea con energía eléctrica.
- Que la meta de producción (tamaño o escala de la mina) permita la tecnificación paulatina de las actuales explotaciones y esté acorde con la capacidad de inversión.

El ejemplo de mina de carbón, además de permitir el cálculo del precio real en boca de mina, debe responder al propósito de las entidades estatales y particulares, vinculadas a la industria carbonífera, de racionalizar la explotación de las minas de carbón, para que de esta manera se aproveche mejor los yacimientos y se mejore las condiciones de trabajo y seguridad de los mineros.

El arranque de carbón se hace con pico manual, ocasionalmente con martillo neumático, adelantando sin plan previo las labores de preparación, desarrollo y explotación, dando como resultado el estado actual de la mayoría de las minas.

3.1. Descripción del ejemplo de mina de carbón para el municipio de Sogamoso.

En una propiedad minera que tenga unos 300 metros de longitud en sentido de rumbo, se avanzan dos inclinados, uno en cada extremo, hasta encontrar el carbón, ya sea atravesando estéril o trabajos antiguos y siguiendo en lo posible la línea de mayor pendiente.

La sección de los inclinados debe ser de 2.5 metros de ancho por el espesor del manto de carbón (altura). La altura tendrá un máximo de 2 metros. En casos de que el manto tenga mayor espesor, pero podrá ser menor de acuerdo a la inclinación del manto.

El avance del inclinado se divide en unidades de 40 metros medidos siguiendo la línea de mayor pendiente.

En cada unidad en la parte más inferior se avanza una galería (guía o fijo) que servirá de vía principal de transporte, siguiendo el rumbo del manto y 3 sobreguías paralelas a la anterior (ver Figura 14), dejando segmentos de carbón de 10 metros sobre la galería y de 8 metros sobre las sobreguías.

A partir de la galería y sobreguías se avanzarán tambores cada 21.5 metros, de 1.5 metros de ancho y de altura máxima igual al espesor del manto, en forma tal que se formen pilares de 20 m x 10 m encima de la galería y 20 m x 8 m encima de las sobreguías. Estas labores de preparación (Figura 16) si se inician en el inclinado 1 se avanzarán hasta el inclinado 2, en la Unidad 1.

En la unidad 2, se avanzará del inclinado 2 hacia el inclinado 1 y así sucesivamente. Una vez terminada la preparación en la Unidad 1, se inicia la explotación de ésta y la preparación de la Unidad 2.

La explotación consiste en partir los pilares (machones) de las sobreguías con tambores iguales a los de preparación y recuperación de los medios pilares en forma alternada, tal como se muestra en la Figura 17, dejando pilares de 8 m x 9,25 m. De esta manera se asegura un adecuado control del techo.



Figura 14. Esquema de explotación y preparación.

Fuente: Elaboración propia

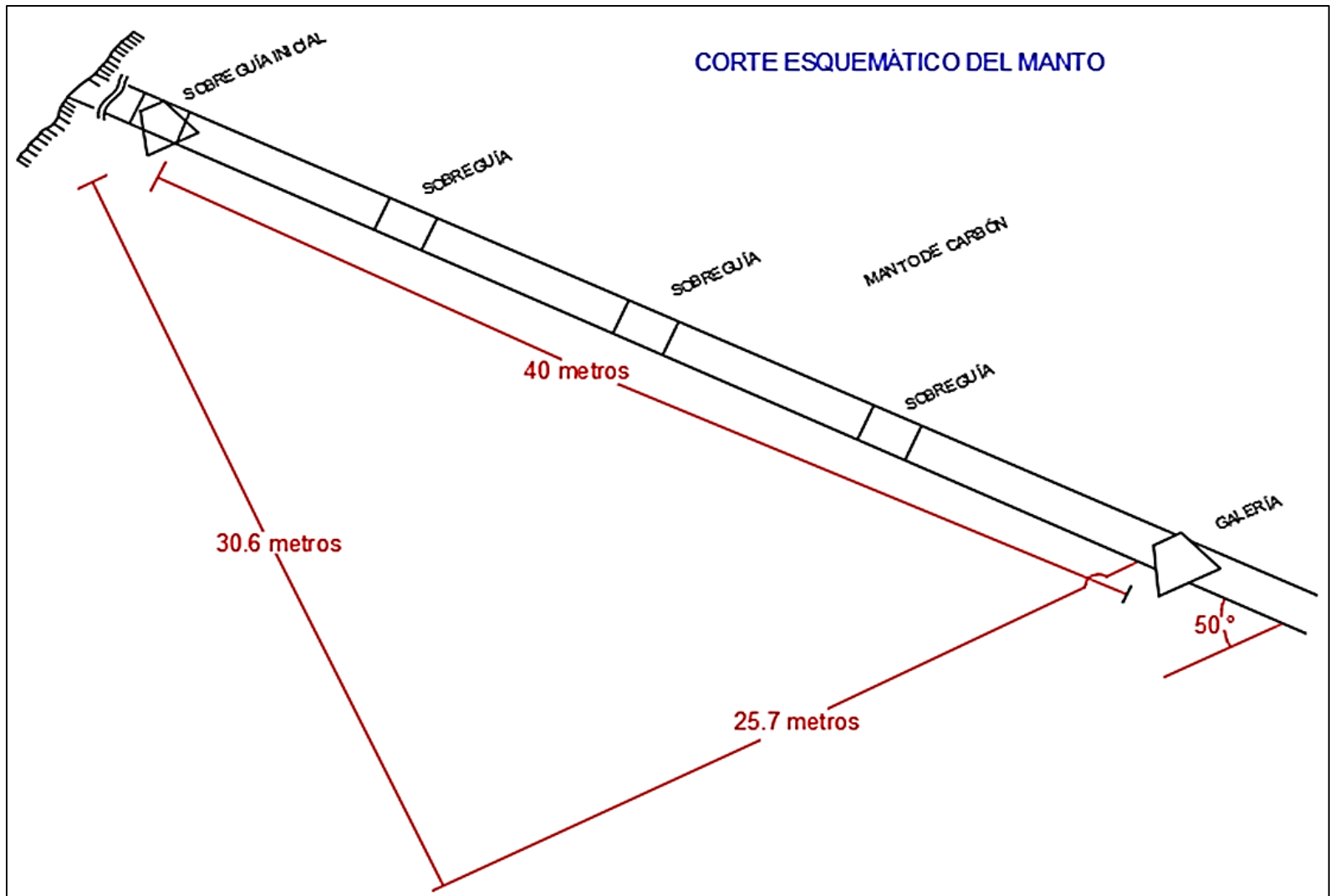


Figura 15. Corte esquemático del manto de carbón.

Fuente: Elaboración propia

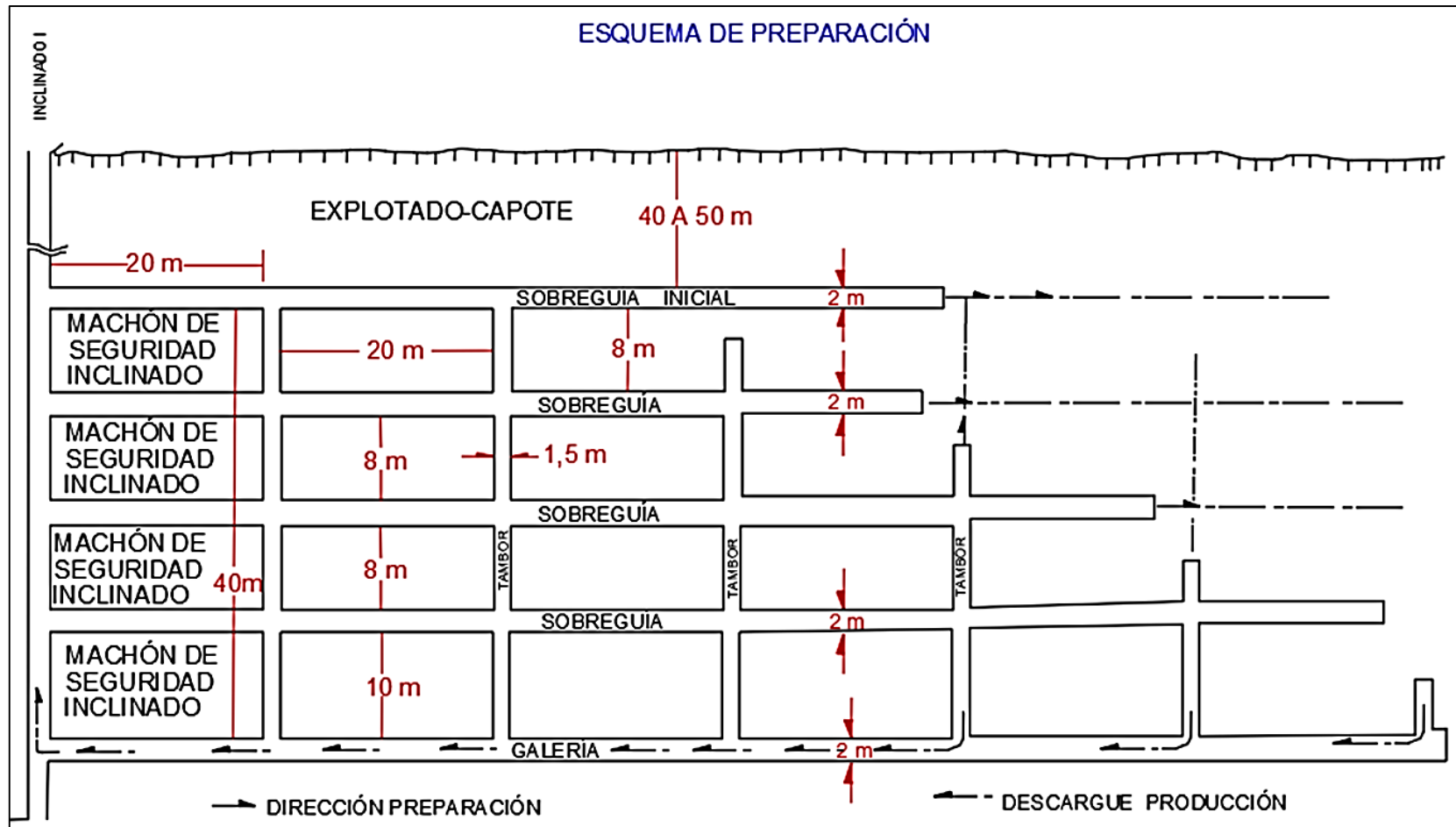


Figura 16. Esquema de preparación.

Fuente: Elaboración propia

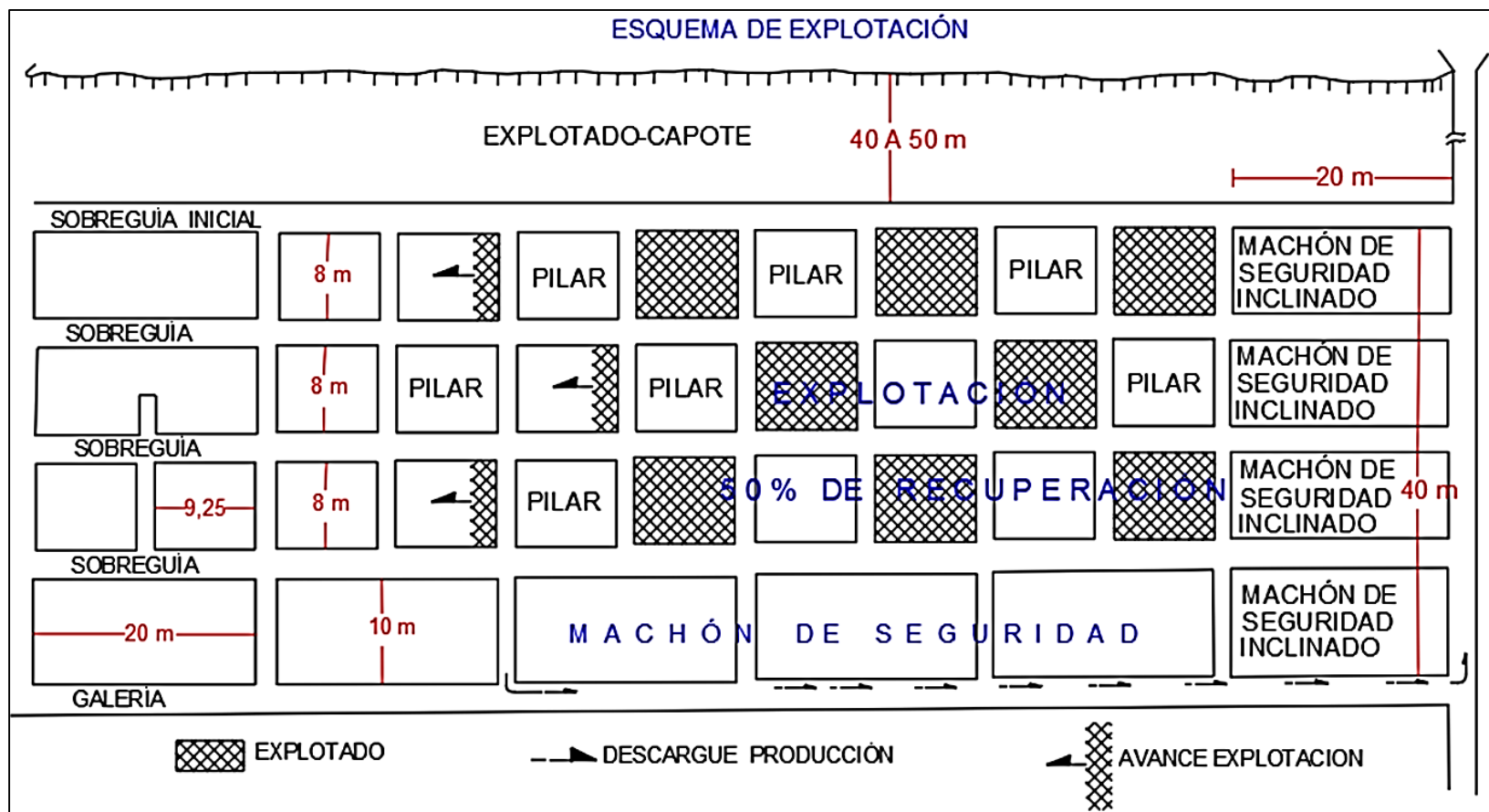


Figura 17. Esquema de explotación

Fuente: Elaboración propia

La mitad de los pilares que protegen la galería 1, se recuperarán cuando se explote la Unidad 1.

Se deja sin partir ni recuperar el pilar o machón adyacente a los inclinados para seguridad de los mismos.

El arranque se continuará haciendo con pico manual, el transporte de las sobreguías a la galería en carretillas o por gravedad cuando sea posible, el transporte en la galería en coches sobre riel de acero, accionados manualmente y en el inclinado en coches sobre el riel de acero accionado por un malacate.

La ventilación será forzada, con apoyo de un ventilador eléctrico en las labores “ciegas” y se complementará con la comunicación entre túneles de trabajos antiguos o abandonados los cuales se denominan bocavientos.

El equipo básico consistirá, en 1 subestación eléctrica, 2 malacates, 3 bombas para la extracción de agua, 1 ventilador, todos accionados con motores eléctricos y 6 coches. Este equipo es todo de fabricación nacional. Además 15 toneladas de riel de acero de 10 kg por metro.

El alumbrado se hará con lámparas eléctricas de seguridad recargables.

Con este sistema se puede profundizar entre 200 m y 400 m según sea mayor o menor la inclinación.

Se debe tener especial cuidado para prevenir accidentes:

- En el control de desgaste del cable de acero del malacate que debe ser mínimo de ½ pulgada, halando coches de 800 kg de capacidad.
- Empleo de mosquetón (gancho de seguridad) en vez de gancho simple, en la unión del cable con el coche.
- La conservación de la carrilera inclinada.
- Cuando el inclinado tenga una pendiente mayor del 100% (45°).

3.2. Terminología del componente geométrico de secciones de túneles y obras subterráneas de explotación de carbón. (Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA)

➤ Puerta alemana

Es un conjunto de tres maderas rollizas, que una vez armadas, forman un trapecio junto con el piso donde se colocan. (ver Figura 18).

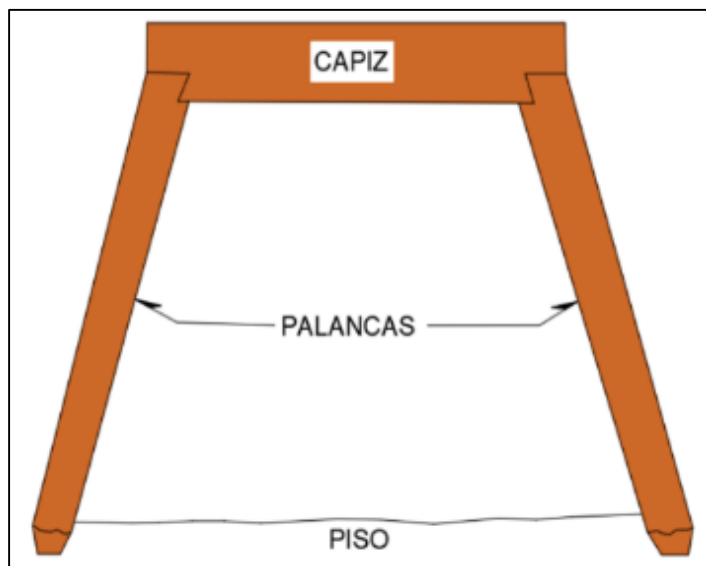


Figura 18. Esquema de puerta alemana utilizada para el sostenimiento en minas de carbón.

Fuente: Elaboración propia

Las partes que componen las puertas alemanas son:

- CAPIZ: es una madera rolliza que se coloca horizontalmente en la parte alta de la puerta. El capiz descansa sobre dos palancas.
- PALANCAS: son maderas rollizas que sostienen el capiz de la puerta mediante el plato de la palanca.

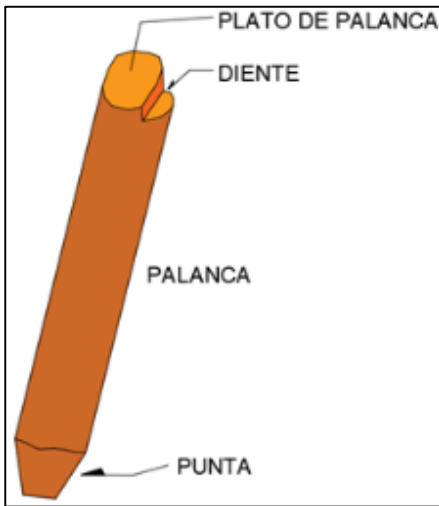


Figura 19. Partes de la palanca.
Fuente: Elaboración propia

➤ **Tiples**

Madera que se coloca entre las puertas, para evitar que la puerta se incline hacia delante o hacia atrás. Llevan la misma dirección de la vía y van perpendicular a las puertas, los cortes de los tiples se hacen en boca de pescado.

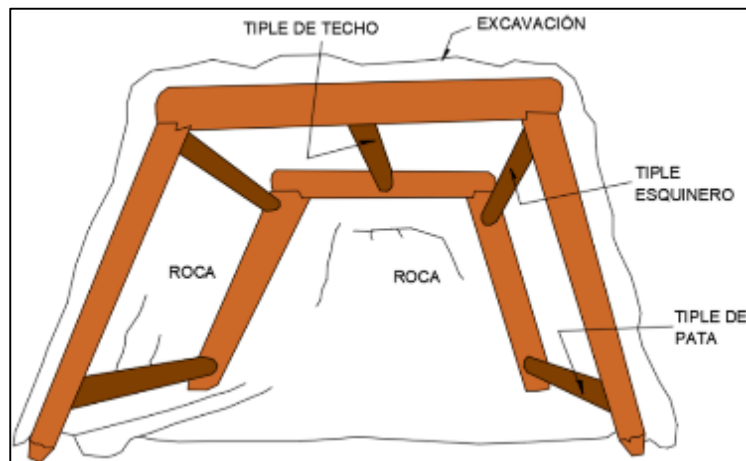


Figura 20. Tiples de madera usados en el sostenimiento de las excavaciones para explotación
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Maderas de forro**

Son maderas de grosor de 8 a 10 cm, que se colocan entre la puerta y la roca. Es utilizada para evitar el desprendimiento de la roca hacia la vía.

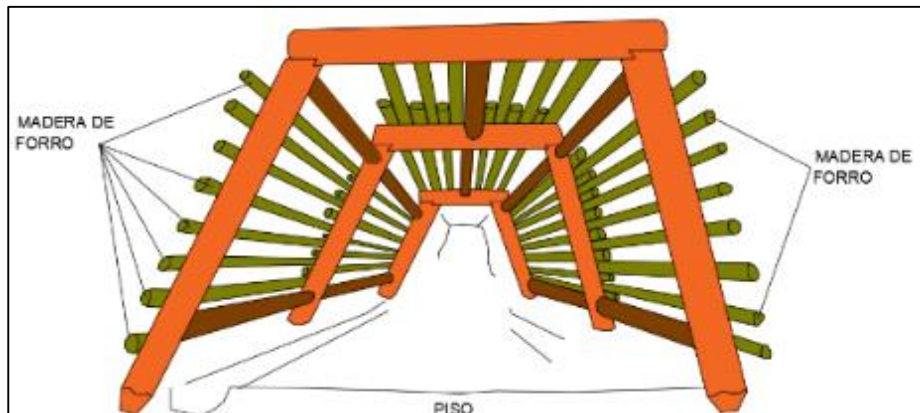


Figura 21. Madera de forro utilizada para evitar desprendimientos de roca.

Fuente: Elaboración propia.

➤ **Bocamina y sostenimiento**

A continuación, se muestra la entrada (bocamina) a una de las labores subterráneas de explotación dentro de la zona de estudio. Se puede observar los componentes de la infraestructura de sostenimiento de los túneles. Obsérvese componentes de sostenimiento.



Foto 9. Entrada a las labores de explotación subterránea (bocamina).

Fuente: Propia

Capítulo 4 Caracterización geomecánica

4.1. Metodología para la realización del proyecto

En la Figura 22, se esquematiza la metodología que se usó para el desarrollo de cada una de las etapas del proyecto.

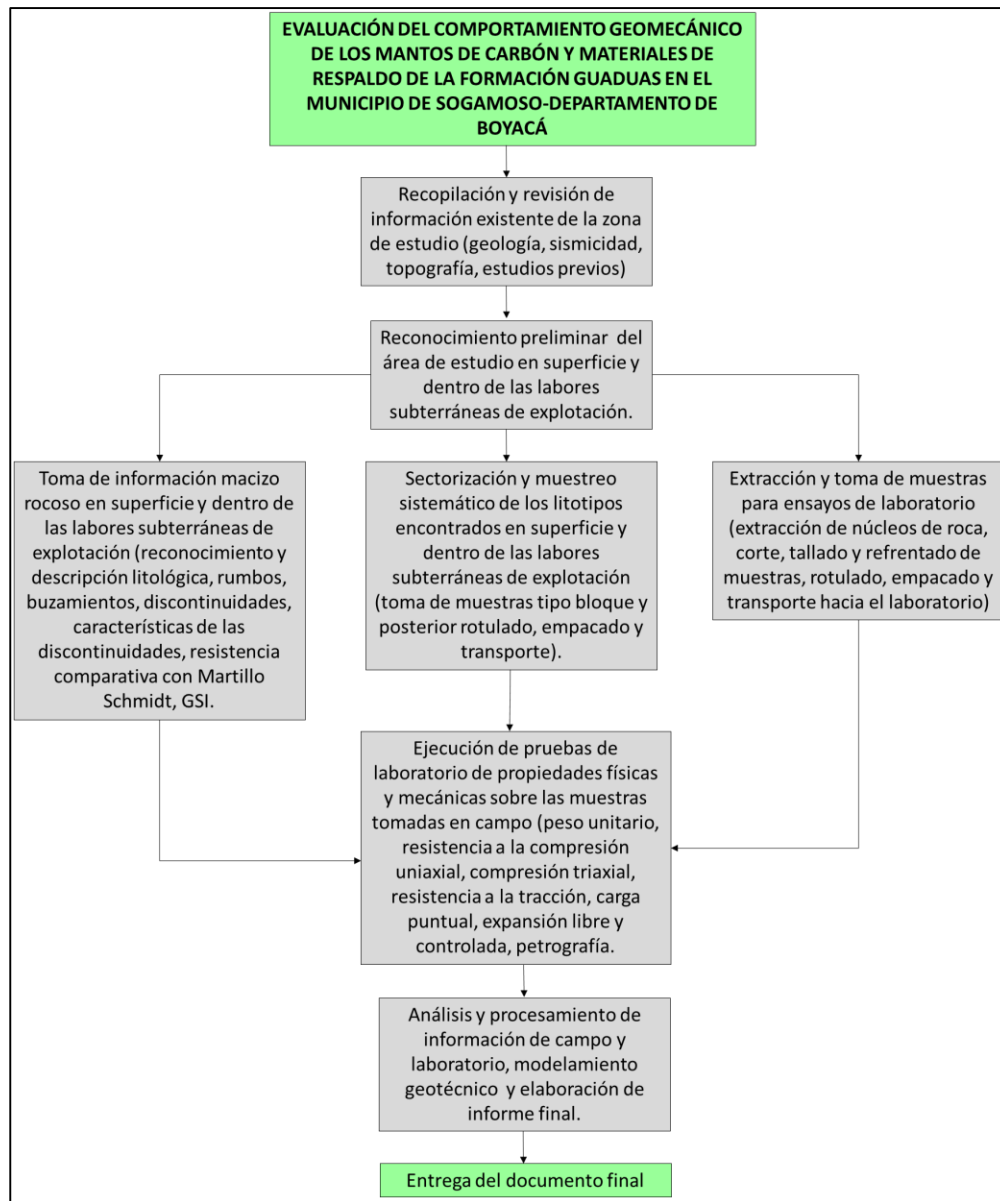


Figura 22. Metodología para la realización del proyecto.

Fuente: Elaboración propia

4.2. Sectorización geotécnica

La exploración geotécnica realizada en el sector de estudio está sujeta principalmente al levantamiento de diaclasas en diversos puntos del macizo rocoso, así como la recolección y ensayo de muestras provenientes de los afloramientos de carbón, techos y pisos inmediatos de los mantos de carbón aflorantes en superficie y dentro de las labores subterráneas de explotación dentro del área de estudio.

Con este fin se tiene un total de quince (15) sectores de levantamiento de información localizados dentro de todo el sector de estudio, enfocando la sectorización en el flanco occidental del Sinclinal de Morcá, sitio donde se concentra la mayoría de labores subterráneas de explotación minera de carbón (ver la Figura 23).

Para la consignación de los datos e información tomada en cada una de las estaciones geomecánicas, se construyó un formato para la toma de información en campo, en el cual se registró información como: localización, litología del afloramiento, estructuras geológicas encontradas (pliegues, fallas, otros), características de fracturación (# juntas /m³, espaciado, continuidad, abertura, rugosidad, relleno, meteorización, presencia de agua, resistencia), resistencia de la matriz rocosa, grado de meteorización, horizonte de meteorización, presencia de agua, resistencia "R" esclerómetro, rumbo y buzamiento, clasificación GSI, diagrama de representación planar para discontinuidades y registro fotográfico. En el anexo 1 se presentan los formatos obtenidos para cada una de las estaciones geomecánicas.

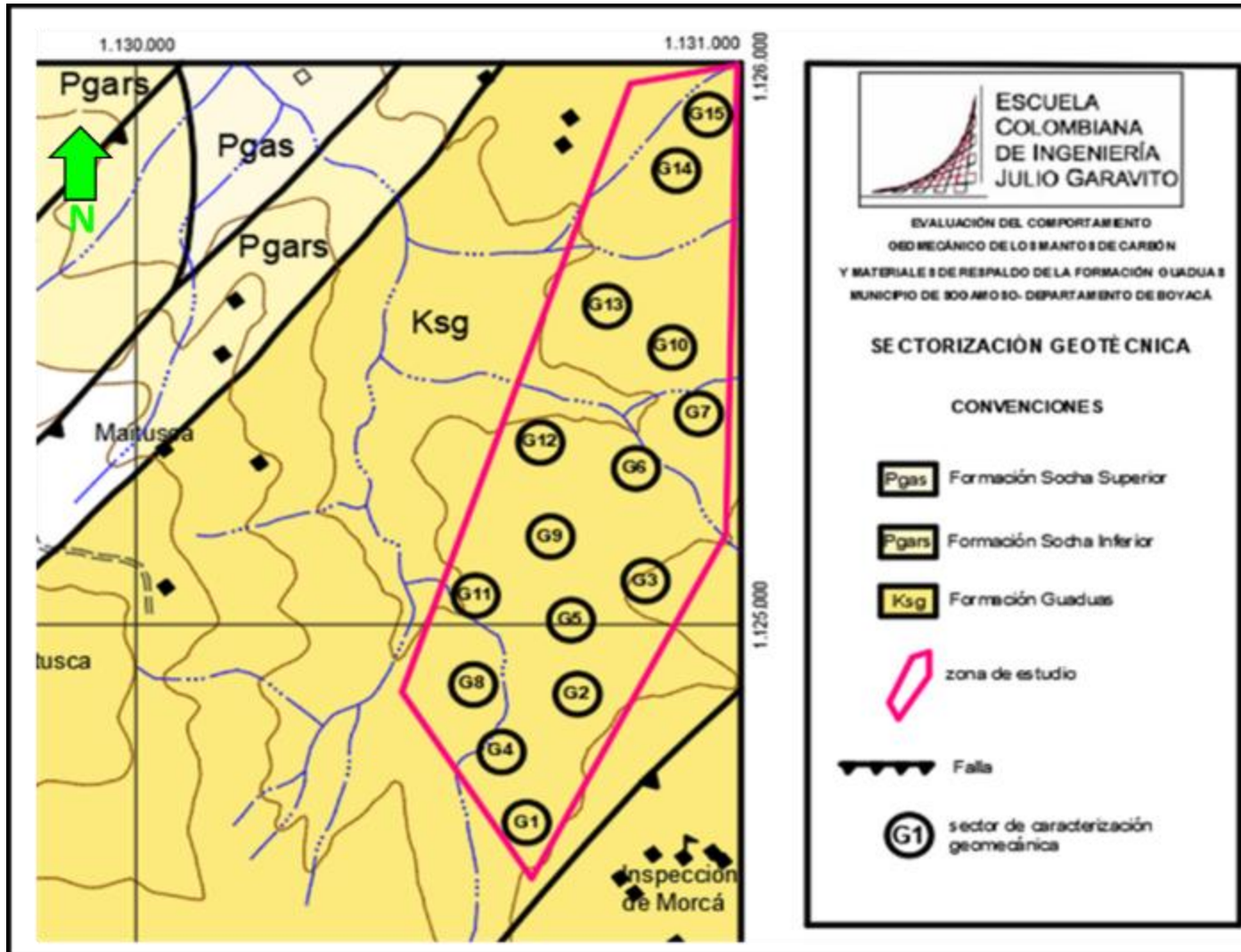


Figura 23. Sectorización geotécnica zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

4.3. Toma de muestras en campo

El procedimiento que se realizó para la toma de esta muestra se puede resumir en:

- Selección del frente apropiado de carbón o roca de los respaldos del manto de carbón para la toma de la muestra monolítica.
- Mediante un dispositivo cortador y perpendicular a la estratificación, se cortó todo el espesor del manto de carbón, considerando una columna de 0,40 x 0,40 metros. (ver Foto 10).
- Se indicó la orientación de la muestra, de tal manera que todos los componentes del manto queden en su posición original.

Al empacar la muestra para su transporte, se tuvo sumo cuidado, evitando el fracturamiento de ella.

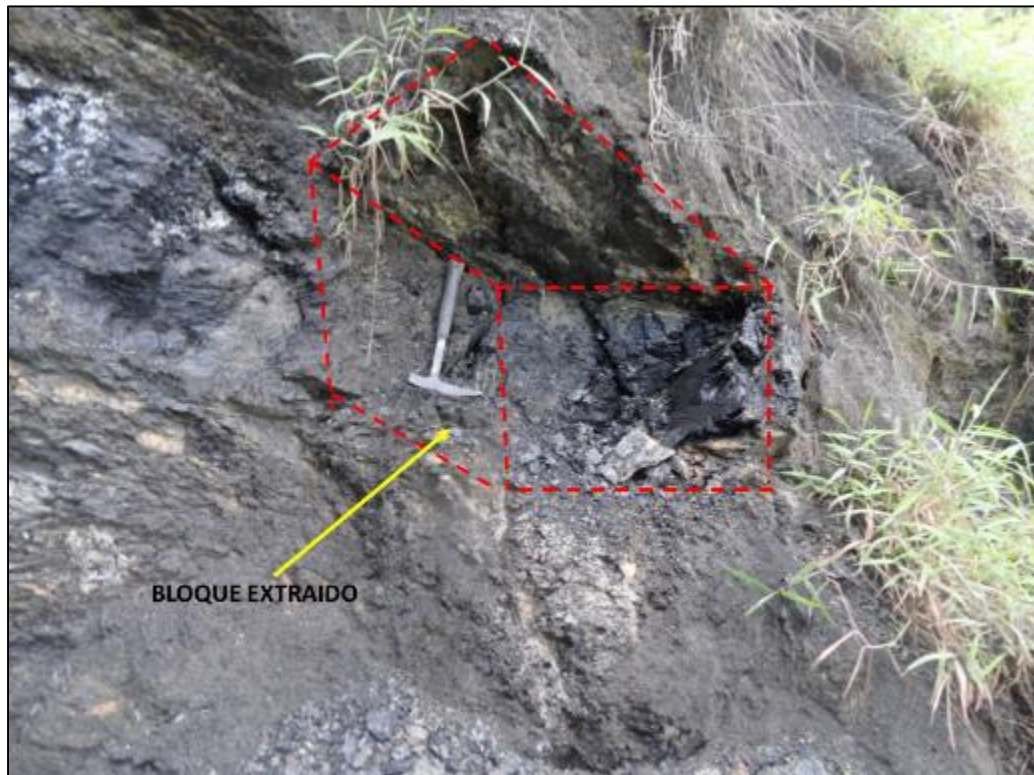


Foto 10. Muestreo realizado tipo columna de un litotipo.

Fuente: Propia

Luego de realizar el muestreo tipo columna, se llevó a cabo la extracción de núcleos de roca con broca diamantada en diámetro de 5 cm con el objetivo de obtener especímenes cilíndricos y así realizar el programa de ensayos de laboratorio con el fin de determinar propiedades mecánicas del carbón y la roca de respaldo (ver la Foto 11). Adicionalmente, para litotipos o bloques de roca de los cuales no fue posible extraer muestras cilíndricas, se cortaron especímenes de roca por medio de máquina cortadora con disco diamantado, obteniendo muestras cuya geometría correspondía a prismas rectangulares.

La preparación de muestras en los materiales arcillosos (pisos y techos de los mantos de carbón), inició con la extracción de los núcleos de roca en seco, usando aire comprimido como refrigerante de la broca en lugar de agua. Lo anterior para no modificar la humedad de la roca y conservar la integridad de la muestra durante el proceso de preparación de los especímenes. Para esto se utilizó un compresor portátil de aire comprimido con capacidad de 120 litros para refrigerar la broca y expulsar el ripio o polvo que se obtiene con la perforación.



Foto 11. Extracción de núcleos de roca para caracterización físico-mecánica en laboratorio

Fuente: Propia

4.4. Ensayos de campo realizados para caracterización geomecánica

4.4.1. Medida de rebote con martillo Schmidt

Para la estimación de la resistencia comparativa en campo sobre los afloramientos de los mantos de carbón y materiales de respaldo en lugares donde el macizo se encontraba muy fracturado y en zonas donde no se pudo realizar el muestreo para la extracción de núcleos, se efectuaron lecturas de rebote con Martillo Schmidt (ver la Foto 12).

En cada una de las estaciones geotécnicas se tomaron 20 lecturas con esclerómetro sobre afloramientos tanto de carbón como de techos inmediatos y sus discontinuidades, posteriormente se hizo un promedio de las lecturas y se correlacionó éste con la resistencia a la compresión de la roca. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 25 del Capítulo 5.



Foto 12. Toma de lecturas con Martillo Schmidt sobre afloramientos de carbón y materiales de respaldo tanto en superficie como en labores subterráneas de explotación.

Fuente: Propia.

4.5. Ensayos de laboratorio realizados para caracterización geomecánica

4.5.1. Ensayo de resistencia a la compresión uniaxial

Con el objeto de evaluar la resistencia a compresión de los núcleos extraídos de carbón y capas de respaldo (arcillolitas y limolitas), se continuó con la realización de pruebas de compresión uniaxial para 300 testigos de roca en total, distribuidos de la siguiente manera:

- Compresión uniaxial en 144 testigos de carbón
- Compresión uniaxial en 75 testigos de techos inmediatos
- Compresión uniaxial en 75 testigos de pisos inmediatos
- Compresión uniaxial con la implementación de deformímetros tipo Strain Gauge en 6 testigos de carbón.

Esta actividad se desarrolló tomando como referencia la norma ASTM D 2938 – 95⁶, teniendo en cuenta los pasos que se describen a continuación.

Refrentado de Caras

El refrentado de caras consiste en homogenizar las caras de la muestra hasta que queden perfectamente lisas para aplicar la carga en el ensayo de compresión simple. Para alisar las caras se aplica azufre en estado de fusión, el azufre debe permanecer sobre una superficie totalmente lisa y nivelada tal como se muestra en la Foto 13. Este procedimiento es necesario hacerse debido a que el corte con el disco de diamante no es plenamente ortogonal y pueden además quedar estrías y rugosidades que provocan variación en las lecturas cuando se ejecuta el ensayo de compresión simple.

⁶ Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens.



Foto 13. Refrentado de caras usando azufre para las muestras de roca ensayadas a compresión uniaxial.

Fuente: Propia.

Instalación de Straing Gauge

Refrentadas las caras con azufre se procede con la instalación de deformímetros electrónicos tipo Straing Gauge con el objeto de medir las deformaciones unitarias de cada muestra durante la ejecución de las pruebas de compresión uniaxial y posteriormente poder calcular el módulo de deformación. Para el desarrollo de esta actividad se emplearon deformímetros tipo KFC-2-D4-11 de 120 ohm. En la Foto 14, se muestran los deformímetros instalados.

Preparados los especímenes de muestras e instalados los deformímetros tipo Strain gauge se dio inicio a la ejecución de las pruebas de compresión simple, para el desarrollo de esta actividad se empleó el equipo SHIMADSU Universal Testing Machine modelo UH-1000kNX con capacidad para 1000 KN, (Foto 15), del laboratorio de materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y equipo MATRIX MULTITEST de la empresa INGEF SAS (Ingeniería, Geotécnia y fundaciones), permitiendo aplicación de cargas controladas y graduales, en este caso se aplicaron cargas con intervalos de 500 kgf a una velocidad de deformación de 0.25 mm/min. La prensa está compuesta por un marco de carga y una bomba hidráulica que suministra presión a un flujo de aceite, encargada de proporcionar una deformación constante entre los apoyos superior e inferior en donde se ubica un juego de

rotulas, las cuales permiten corregir pequeños defectos de paralelismo entre las caras de la muestra a ser ensayada. La velocidad de deformación es controlada internamente por el software del equipo.



Foto 14. Instalación de Strain Gauge para medición de deformaciones durante la prueba de resistencia a la compresión uniaxial.

Fuente: Propia



Foto 15. Equipo universal SHIMADSU UH-1000kNX empleado para las pruebas de compresión simple.

Fuente: Propia

El software TRAPEZIUM X, de la máquina universal empleada para el desarrollo del proyecto permite visualizar el comportamiento del material ensayado en tiempo real, del mismo modo se puede obtener el módulo de deformación (E) medido al 50% de la resistencia máxima de la compresión simple sobre la curva esfuerzo-deformación para cada muestra ensayada. De manera gráfica, los resultados se expresan así:

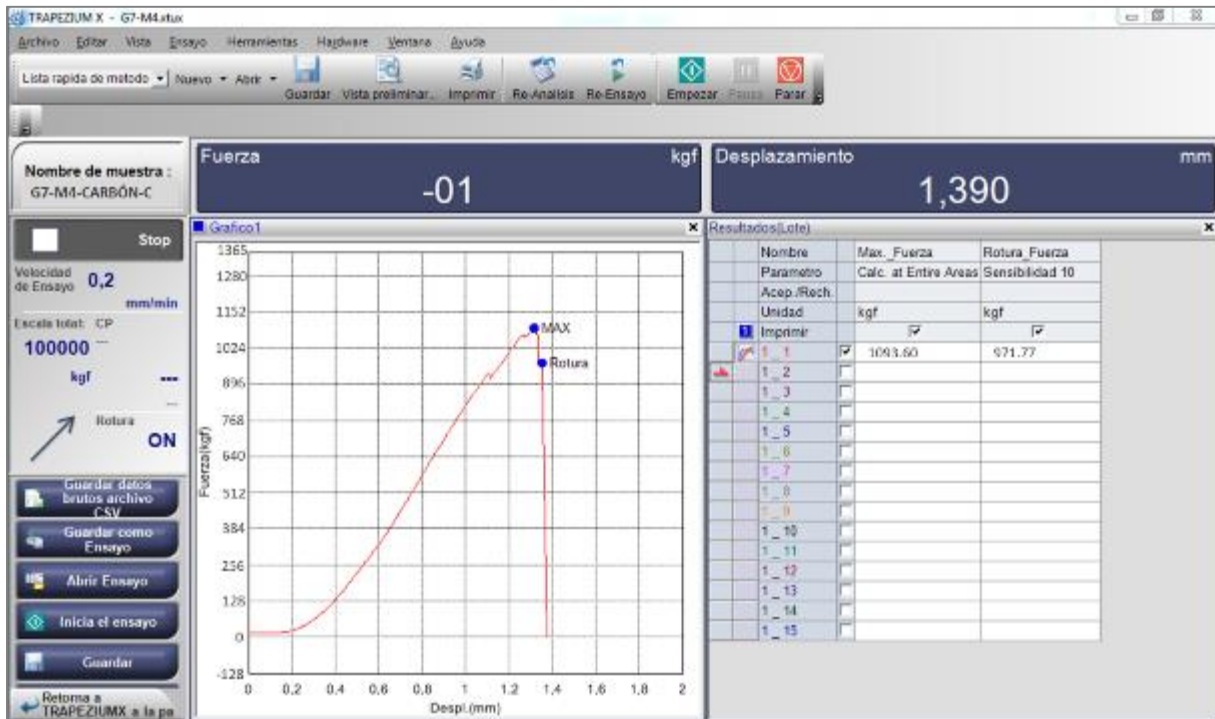


Foto 16. Representación gráfica de los resultados de los ensayos de compresión uniaxial (software TRAPEZIUM X).

Obsérvese la curva típica correspondiente al material ensayado (carbón). Fuente: Propia

Paralelamente a la aplicación de la carga, las lecturas de deformación son registradas por los deformímetros tipo strain gauge, a través del software Strain Smart Online Display, como se muestra de manera esquemática en la Figura 24.

Se realizó la medición de deformaciones radiales y axiales, siendo posible así determinar además de la resistencia y el módulo de deformación, la relación de Poisson. En la Tabla 23, se presentan los resultados de constantes elásticas, determinadas en laboratorio mediante pruebas estáticas.

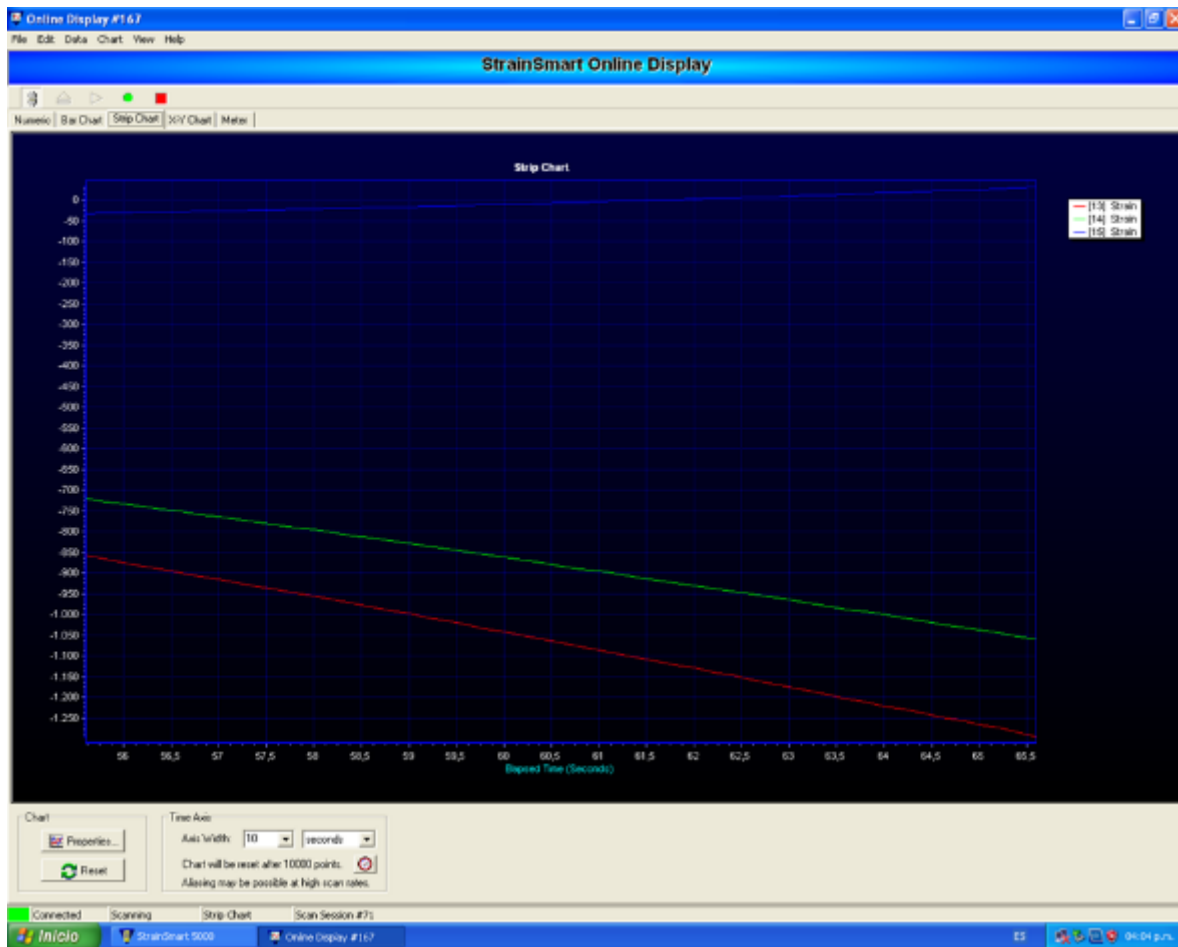


Figura 24. Representación gráfica del registro de deformaciones con deformímetros tipo Strain Gauge durante los ensayos de compresión uniaxial.

Fuente: Propia.

Los resultados de resistencia a la compresión se presentan de manera esquemática en la Figura 33, del Capítulo 5.

4.5.2. Peso unitario

Esta propiedad fue determinada a partir de mediciones geométricas y de peso directas sobre las muestras cilíndricas extraídas de los sondeos (ver la Foto 17) La densidad se obtuvo, de las muestras usadas para los ensayos de compresión uniaxial antes de ser sometidos a carga.

En la Figura 29, del capítulo 5, se muestran los resultados por estación geotécnica a partir de los 300 valores de pesos unitarios con que se cuenta.



Foto 17. Toma de datos (dimensiones geométricas y pesos) en probetas cilíndricas de roca.

Fuente: Propia.

4.5.3. Carga puntual

Para la determinación de la resistencia a la compresión simple de testigos cilíndricos que no cumplieran la relación $L \geq 2,5 D$, y de fragmentos irregulares de roca, se realizaron 225 ensayos de carga puntual en muestras obtenidas de los 15 sectores geotécnicos analizados, tomando como referencia la norma ASTM -D 5731-95⁷, y distribuidos de la siguiente manera:

- Carga puntual en 75 muestras de carbón
- Carga puntual en 75 muestras de techos inmediatos
- Carga puntual en 75 muestras de pisos inmediatos

Los resultados se muestran de manera gráfica en la Figura 40, del capítulo 5.

⁷ Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock.



Foto 18. Pruebas de carga puntual en muestras cilíndricas e irregulares.

Fuente: Propia

4.5.4. Tracción indirecta

Para determinar la resistencia a la tracción de los materiales rocosos ensayados (carbón y limolitas arcillosas), se llevaron a cabo ensayos de tracción indirecta método brasilero sobre 225 probetas cilíndricas en muestras obtenidas de los 15 sectores geotécnicos analizados, tomando como referencia la norma ASTM -D 3967-95a⁸, y distribuidos de la siguiente manera:

- Tracción indirecta en 75 muestras de carbón.
- Tracción indirecta en 75 muestras de techos inmediatos.
- Tracción indirecta en 75 muestras de pisos inmediatos.

Los resultados se muestran de manera gráfica en la Figura 44, del capítulo 5.

⁸ Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens.

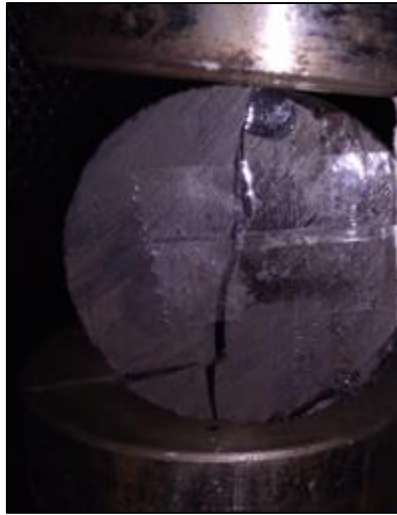


Foto 19. Ensayo de tracción indirecta sobre muestras cilíndricas de los materiales rocosos analizados. Obsérvese la línea de rotura vertical. Fuente: Propia

4.5.5. Compresión triaxial

Se realizaron 6 ensayos de compresión triaxial sobre muestras cilíndricas de carbón similares a las utilizadas en el ensayo de compresión uniaxial.

Los ensayos se llevaron a cabo con una presión de confinamiento $\sigma_3=2$ MPa hasta llevar la muestra a la falla arrojando así los valores de σ_1 en la falla.

Las pruebas se efectuaron usando el equipo CONTROLS-DYNAPAVE DYNAMIC TRIAXIAL, del laboratorio de suelos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Gravito; y cuya capacidad máxima de presión de cámara es, $\sigma_3=2$ MPa.



Foto 20. Proceso para realización de ensayo triaxial en probetas de carbón.

a) Preparación de la muestra, b) montaje de la muestra y aplicación de carga, c) muestra después de la falla. Fuente: Propia.

Los resultados de los ensayos de compresión triaxial realizados se muestran en la Tabla 24, del Capítulo 5.

4.5.6. Expansividad de los materiales arcillosos

Para evaluar el potencial de expansión de los materiales arcillosos correspondientes a los respaldos de los mantos de carbón, se realizaron pruebas de expansión libre y controlada en 10 muestras de limolita arcillosa, tomando como referencia la norma I.N.V. E-173-07⁹

Se midió el porcentaje de hinchamiento realizando expansión libre en equipo Lambe y edómetro, también se determinó la magnitud de la presión vertical necesaria para mantener sin cambio de volumen especímenes confinados lateralmente y cargados sobre un eje axial en edómetro.

⁹ Método para medir el potencial de asentamiento o expansión unidimensional de suelos cohesivos



Foto 21. Ensayos de expansión.

a. ensayo de expansión libre, b. Ensayo de expansión controlada manteniendo por medio de la carga, el dial en cero. Fuente: Propia.

Los resultados de los ensayos de los ensayos de expansión realizados se muestran en la Tabla 25, del Capítulo 5.

4.6. Análisis petrográfico para caracterización física de los materiales estudiados

4.6.1. Análisis petrográfico del carbón

Para poder caracterizar petrográficamente el carbón de la zona de estudio se realizó un análisis petrográfico de reflectancia y lectura maceral en el laboratorio de análisis petrográficos de la empresa CDT MINERAL S.A.S, la cual presta servicios de análisis de carbones, rocas y minerales, y se encuentra acreditada en la competencia de ensayos por ONAC bajo norma ISO/IEC 17025:2005 en ensayos de petrografía.

El procedimiento que se llevó a cabo para la realización del análisis petrográfico se describe a continuación:

- Se tritura la muestra en molino triturador, de tal manera que se obtengan fragmentos de aproximadamente 1cm. (Foto 22-(a))
- Se continúa la trituración de manera manual usando molinillo metálico con el fin de que la muestra pase por el tamiz #20 (0,850mm), se tamiza con dicha malla. (Foto 22-(b)).
- Se pesan 7 gr de carbón tamizado para mezclarlo con 3cm³ de resina y endurecedor o acelerante. (Foto 22-(c)), se realiza la mezcla (Foto 22-(d)).
- Luego se deposita la mezcla en anillo compactador en acero (Foto 22-(e)), para luego someter a compactación la mezcla usando presa hidráulica aplicando una presión de 30 psi.(Foto 22-(f))
- Se retira la carga y se deja en secado por tres horas para posteriormente realizar la extracción del cilindro de carbón por medio del pistón y anillo de extracción en la prensa hidráulica.
- Teniendo el cilindro de carbón se comienza con el proceso de pulido con agua y lijas (lija #100, 150, 200, 400, 600, 1500, 2000 y 2500), en equipo giratorio (Foto 22-(g)). se continúa con el pulido, pero con paños y alúmina 0,3 micras y finalmente 0,05 micras.
- Se somete la muestra a secado en desecador de sílica. (Foto 22-(h)).
- Finalmente se realizó la lectura de la probeta en microscopio MEIJI TECHNO CO MT9920 en 500 puntos de lectura de composición maceral y la reflectancia en 100 lecturas utilizando fotómetro TIDAS PMT. IV.

Los resultados del análisis petrográfico del carbón se muestran en el numeral 5.3.

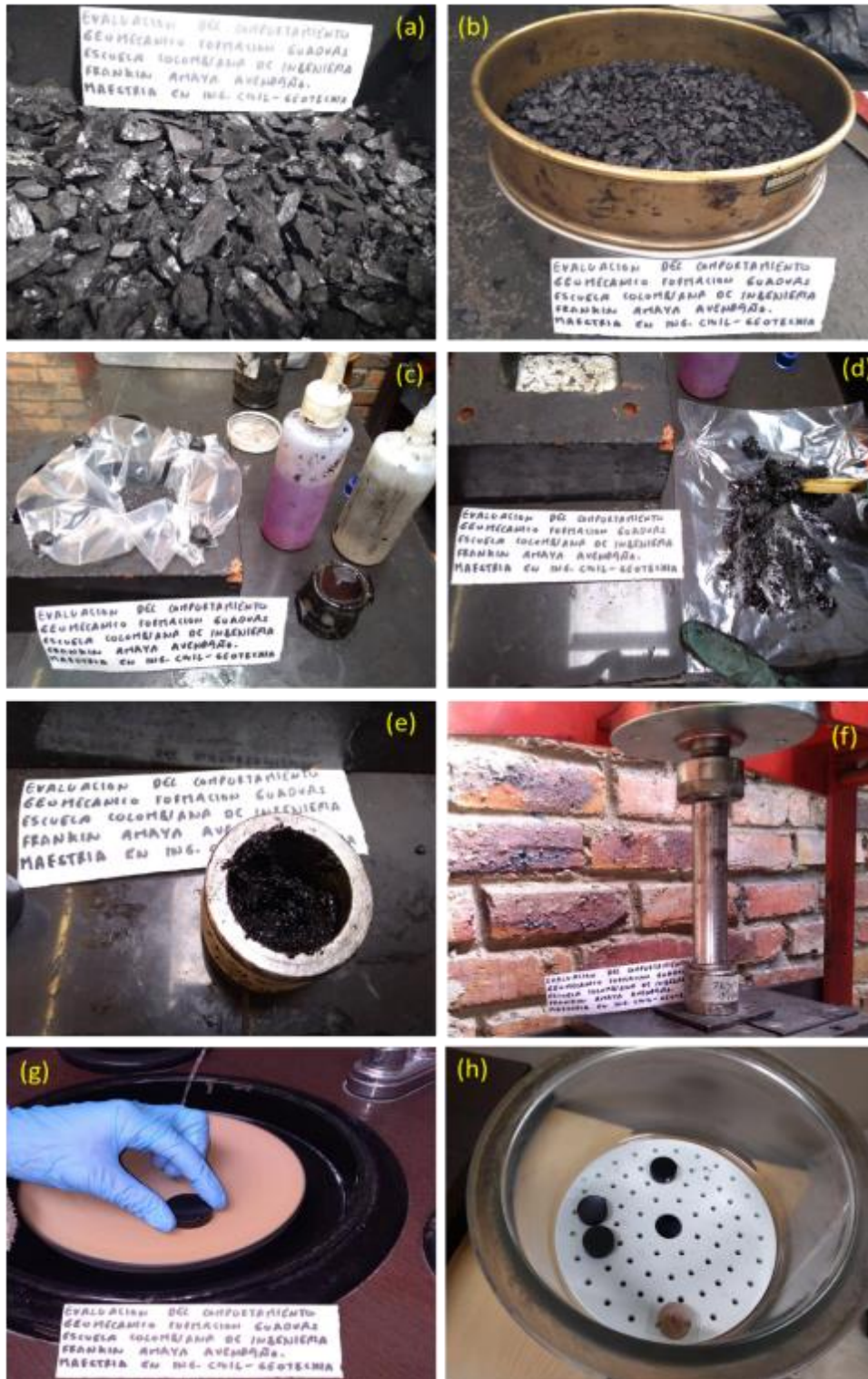


Foto 22. Secuencia de la preparación de probeta pulida para análisis petrográfico

Fuente: Propia.

Capítulo 5 Resultados y análisis

5.1. Resultados de ensayos en campo para caracterización geomecánica

5.1.1. Resultados ensayo medida de rebote con Martillo Schmidt

De la recopilación de la información levantada en campo se obtuvieron valores correspondientes al índice de rebote (RN), los cuales se procesaron y correlacionaron según Ayday y Göktan (1992), para obtener finalmente los resultados de resistencia comparativa a la compresión a través de los sectores estudiados.

En el Anexo 2, se presentan las tablas de resultados, en las cuales se muestran los datos de índice de rebote, correlación empírica del índice de rebote para martillo Schmidt según Ayday y Göktan (1992), resistencia comparativa σ_c (MPa) y litología (carbón y materiales arcillosos de respaldo).

A continuación, en la Figura 25, se muestra de manera esquemática los valores obtenidos de la correlación a partir de los valores de rebote con Martillo Schmidt y la resistencia comparativa a la compresión simple de los materiales geológicos analizados.

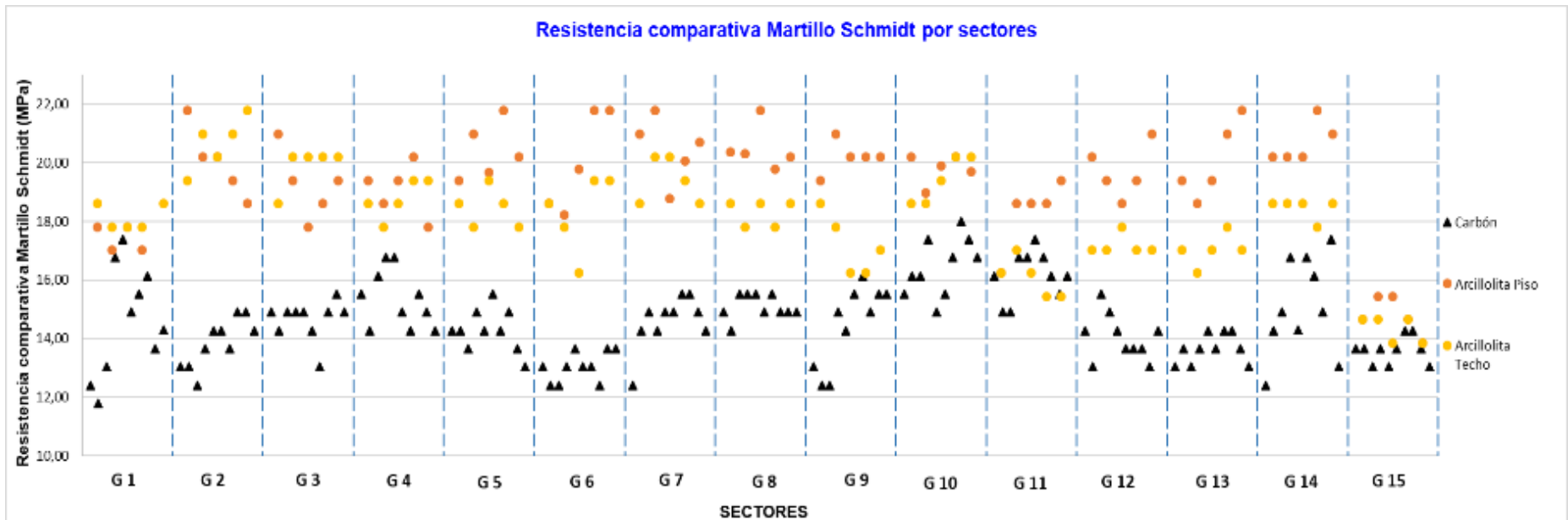


Figura 25. Representación esquemática de los resultados de resistencia comparativa a la compresión (martillo Schmidt) para los materiales geológicos estudiados.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.1. Análisis estadístico para los resultados de rebote con Martillo Schmidt

- **Carbón:** En la Figura 26, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia comparativa a partir de los datos obtenidos con Martillo Schmidt en los 15 sectores analizados para los materiales rocosos correspondientes a los mantos de carbón.

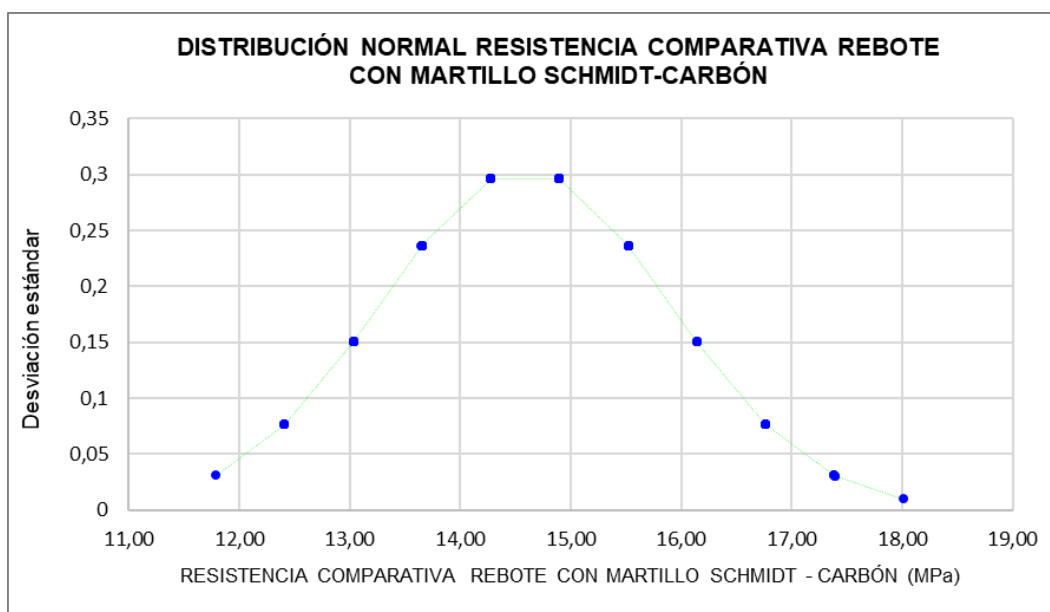


Figura 26. Distribución normal valores de resistencia comparativa a partir de Martillo Schmidt en carbón.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos correlacionados con la compresión simple en carbón, se puede deducir que los valores oscilan entre 11.79 MPa y 18.01 MPa, presentan un valor promedio de 14.59 MPa, una desviación estándar de 1.31, un coeficiente de variación de 8.97%, y una mediana de 14.28.

- **Arcillolita de piso:** En la Figura 27, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia comparativa a partir de los datos obtenidos con Martillo Schmidt en los 15 sectores analizados para los materiales rocosos correspondientes a los pisos de los mantos de carbón (arcillolita de piso).

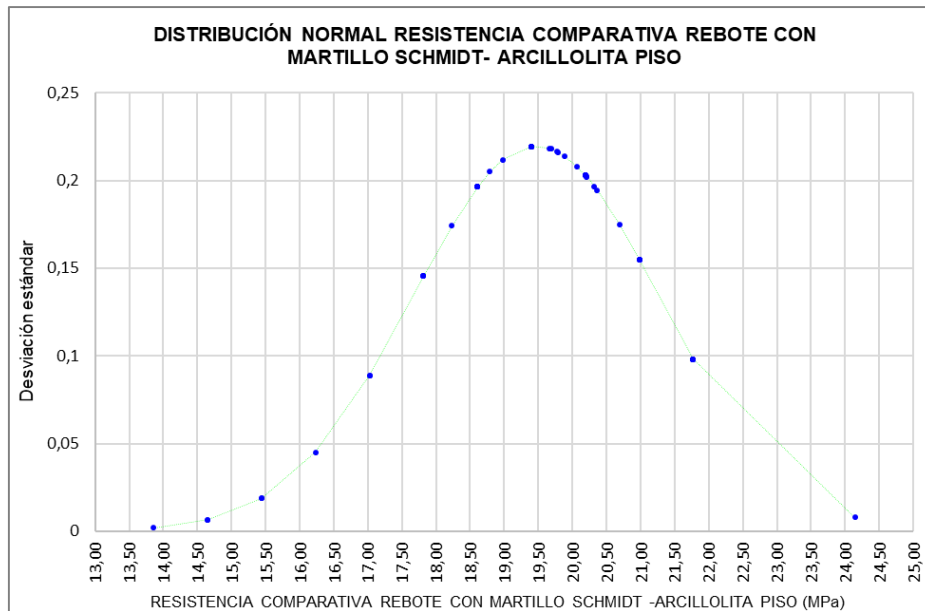


Figura 27. Distribución normal valores de resistencia comparativa a partir de Martillo Schmidt en arcillolita de piso.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos correlacionados con la compresión simple en la arcillolita de piso, se puede deducir que los valores oscilan entre 13.86 MPa y 24.15 MPa, presentan un valor promedio de 19.47 MPa, una desviación estándar de 1.82, un coeficiente de variación de 9.33%, y una mediana de 19.69.

- **Arcillolita de techo:** En la Figura 28, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia comparativa a partir de los datos obtenidos con Martillo Schmidt en los 15 sectores analizados para los materiales rocosos correspondientes a los techos de los mantos de carbón (arcillolita de techo).

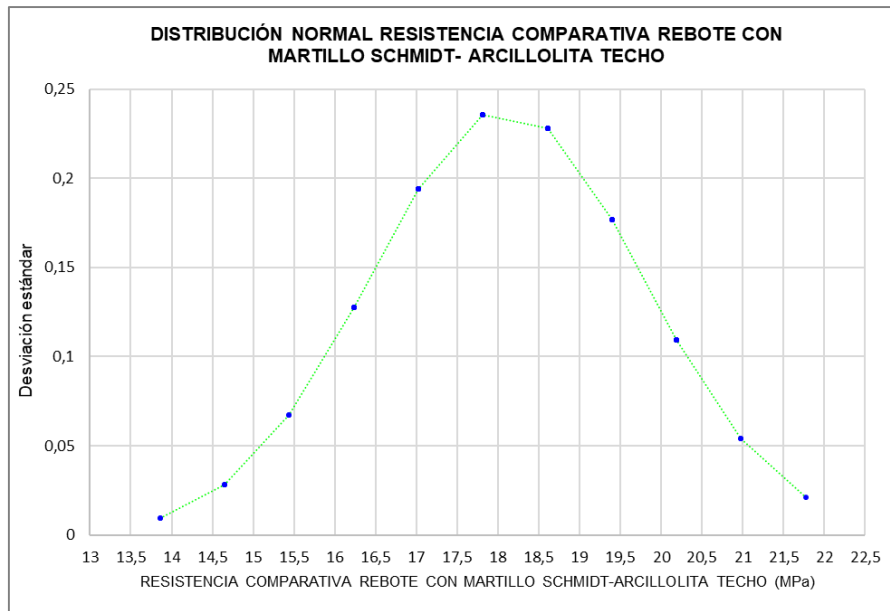


Figura 28. Distribución normal valores de resistencia comparativa a partir de Martillo Schmidt en arcillolita de techo.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos correlacionados con la compresión simple en la arcillolita de techo, se puede deducir que los valores oscilan entre 13.86 MPa y 21.77 MPa, presentan un valor promedio de 18.10 MPa, una desviación estándar de 1.67, un coeficiente de variación de 9.22%, y una mediana de 18.61.

5.2. Resultados de ensayos de laboratorio para caracterización geomecánica

5.2.1. Resultados de pesos unitarios de los materiales rocosos analizados (carbón, limolita arcillosa de techos y pisos inmediatos).

A continuación, se presenta de manera esquemática los resultados del estudio correspondientes a los pesos unitarios obtenidos en laboratorio sobre las probetas cilíndricas de los materiales geológicos analizados.

En el Anexo 1, se presentan las tablas de resultados, en las cuales se muestran los datos de peso unitario de las litologías estudiadas (carbón, arcillolita de piso y arcillolita de techo).

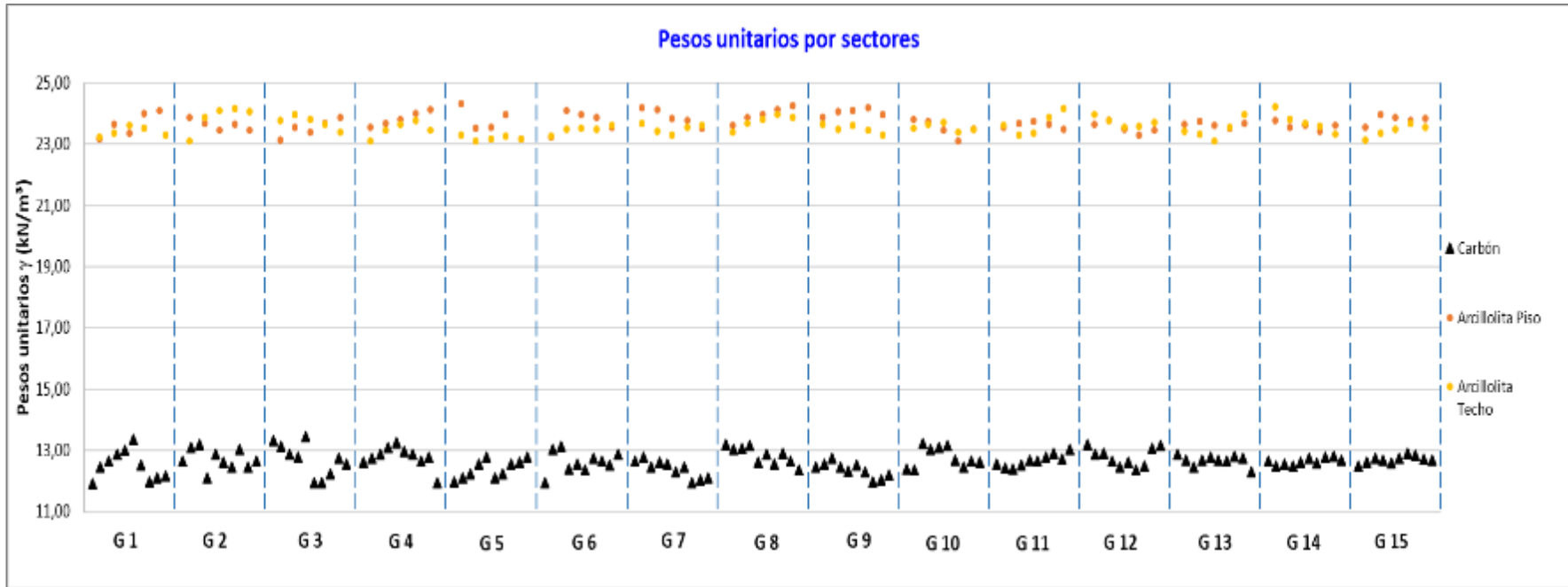


Figura 29. Representación esquemática de los resultados de pesos unitarios para los materiales geológicos estudiados.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.1. Análisis estadístico para los resultados de pesos unitarios

- **Carbón:** En la Figura 30, se presenta la distribución normal de los valores de pesos unitarios obtenidos a partir de los datos adquiridos de las probetas cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los mantos de carbón.

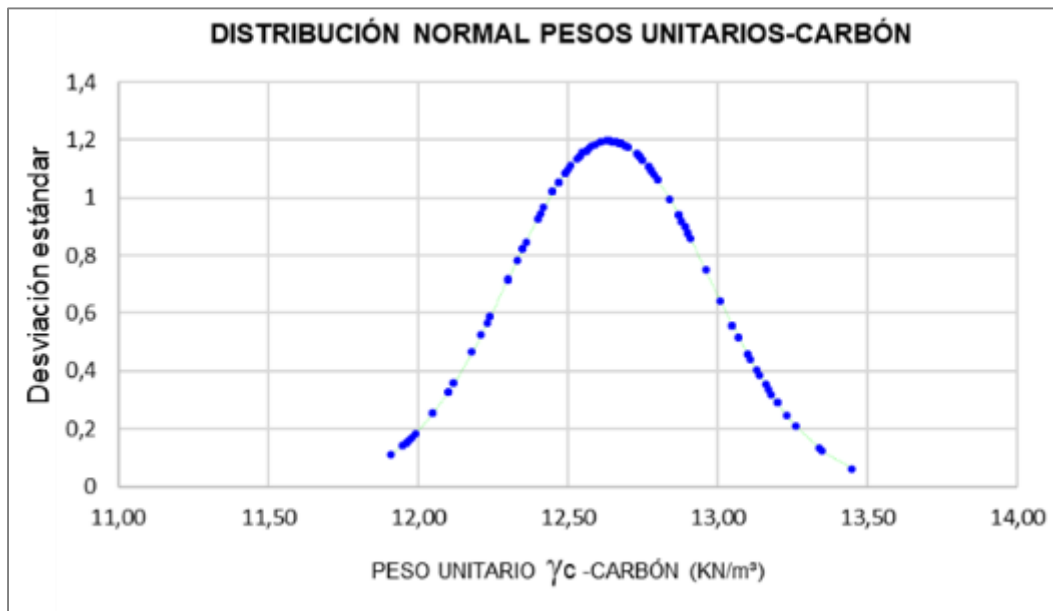


Figura 30. Distribución normal valores de pesos unitarios obtenidos - carbón.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos correspondientes a los pesos unitarios del carbón a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 11.91 KN/m³ y 13.45 KN/m³, presentan un valor promedio de 12.64 KN/m³, una desviación estándar de 0.33, un coeficiente de variación de 2.64%, y una mediana de 12.65.

- **Arcillolita de piso:** En la Figura 31, se presenta la distribución normal de los valores de pesos unitarios obtenidos a partir de los datos adquiridos de las probetas cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los pisos inmediatos (arcillolita de piso).

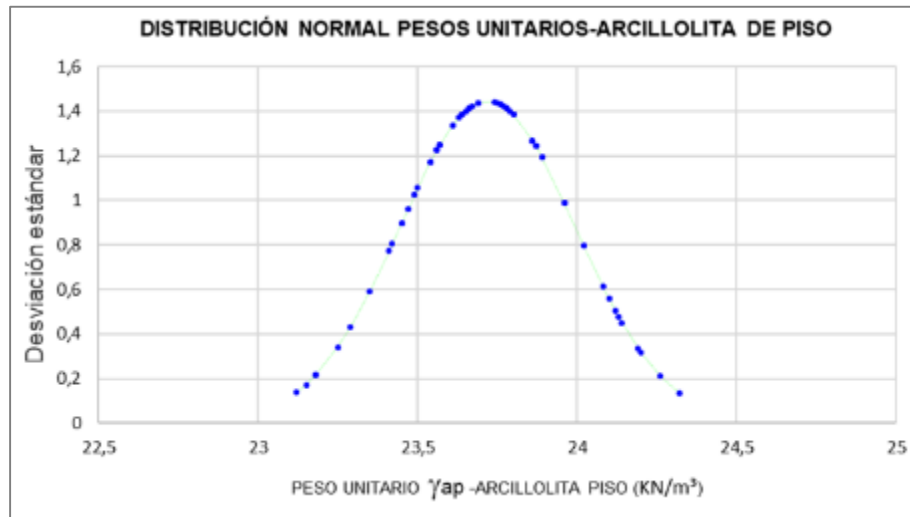


Figura 31. Distribución normal valores de pesos unitarios obtenidos - arcillolita de piso.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos correspondientes a los pesos unitarios de la arcillolita de piso a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 23.12 KN/m³ y 24.32 KN/m³, presentan un valor promedio de 23.72 KN/m³, una desviación estándar de 0.28, un coeficiente de variación de 1.16%, y una mediana de 23.69.

- **Arcillolita de techo:** En la Figura 32, se presenta la distribución normal de los valores de pesos unitarios obtenidos a partir de los datos adquiridos de las probetas cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los techos inmediatos (arcillolita de techo).

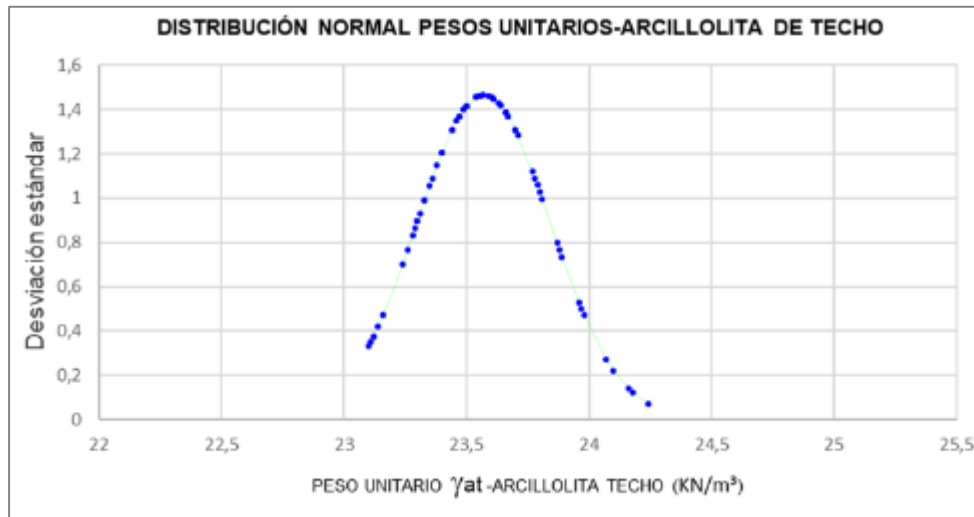


Figura 32. Distribución normal valores de Pesos unitarios obtenidos - arcillolita de techo.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos correspondientes a los pesos unitarios de la arcillolita de piso a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 23.10 KN/m^3 y 24.24 KN/m^3 , presentan un valor promedio de 23.57 KN/m^3 , una desviación estándar de 0.27, un coeficiente de variación de 1.16%, y una mediana de 23.55.

5.2.2. Resultados de compresión uniaxial de los materiales rocosos analizados (carbón, arcillolita de techos y pisos inmediatos).

A continuación, se presenta de manera esquemática los resultados del estudio correspondientes a los datos obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial sobre las probetas cilíndricas de los materiales geológicos analizados (carbón y arcillolita).

En el Anexo 3, se presentan las tablas de resultados, en las cuales se muestran las dimensiones de los especímenes (altura y diámetro), área y los valores de resistencia última de cada una de las litologías estudiadas (carbón, arcillolita de piso y arcillolita de techo).

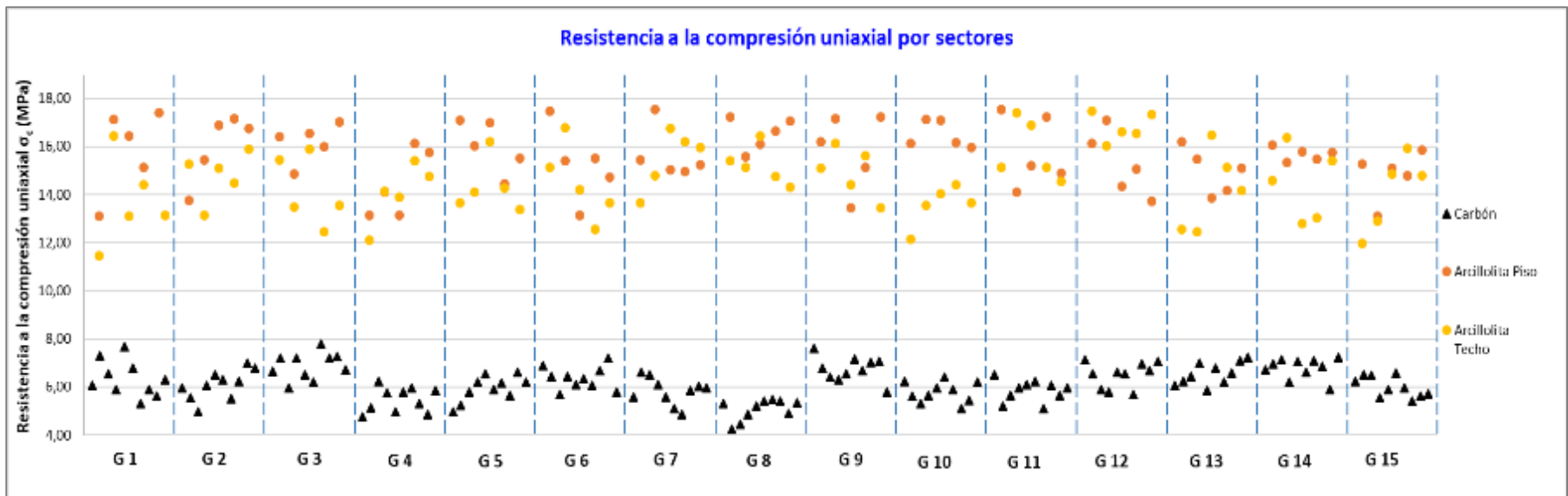


Figura 33. Representación esquemática de los resultados de resistencia a la compresión uniaxial para los materiales geológicos estudiados.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.1. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la compresión uniaxial.

- **Carbón:** En la Figura 34, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos en el estudio a partir de los datos adquiridos de las probetas cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los mantos de carbón.

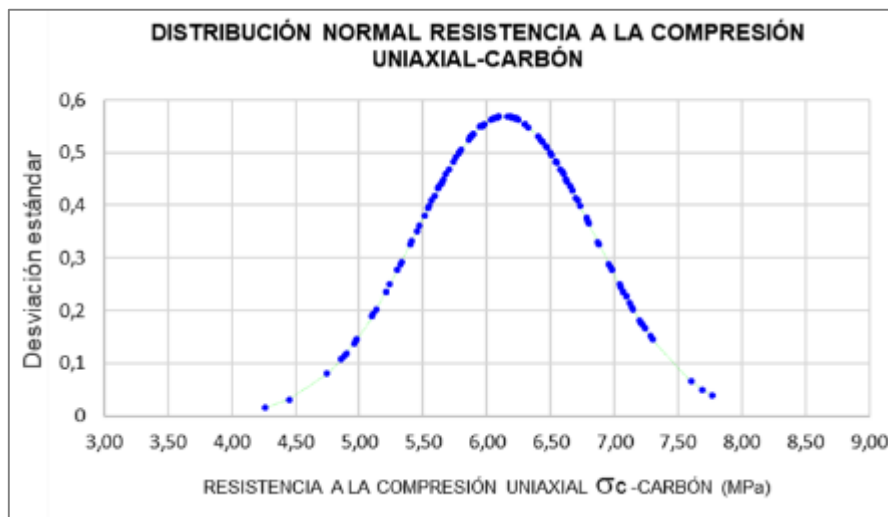


Figura 34. Distribución normal valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos - carbón.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos correspondientes a la resistencia a la compresión uniaxial del carbón a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 4.26 MPa y 7,77 MPa, presentan un valor promedio de 6.14 MPa, una desviación estándar de 0.70, un coeficiente de variación de 11.42%, y una mediana de 6.13.

- **Arcillolita de piso:** En la Figura 35, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos en el estudio a partir de los datos

adquiridos de las probetas cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los pisos de los mantos aflorantes (arcillolita de piso).

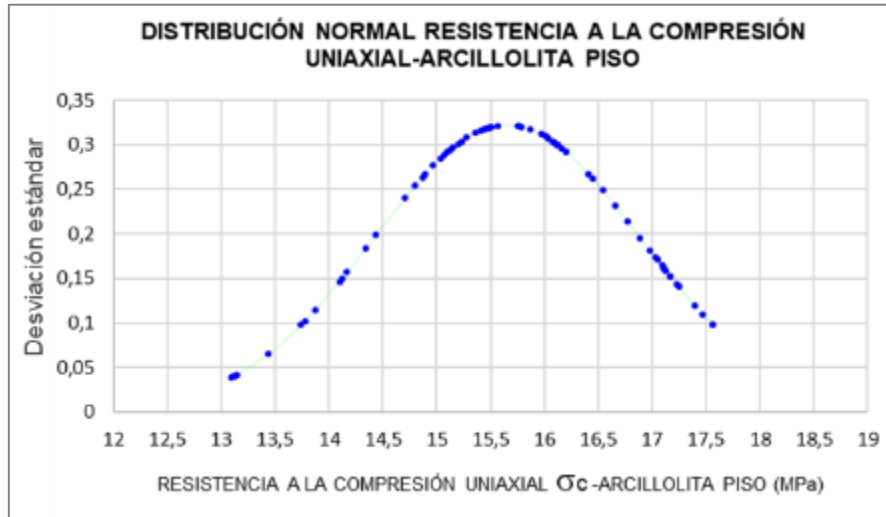


Figura 35. Distribución normal valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos – arcillolita de piso.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos correspondientes a la resistencia a la compresión uniaxial de la arcillolita de piso a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 13.10 MPa y 17.56 MPa, presentan un valor promedio de 15.65 MPa, una desviación estándar de 1.24, un coeficiente de variación de 7.91%, y una mediana de 15.65.

- **Arcillolita de techo:** En la Figura 36, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos en el estudio a partir de los datos adquiridos de las probetas cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los techos de los mantos aflorantes (arcillolita de techo).

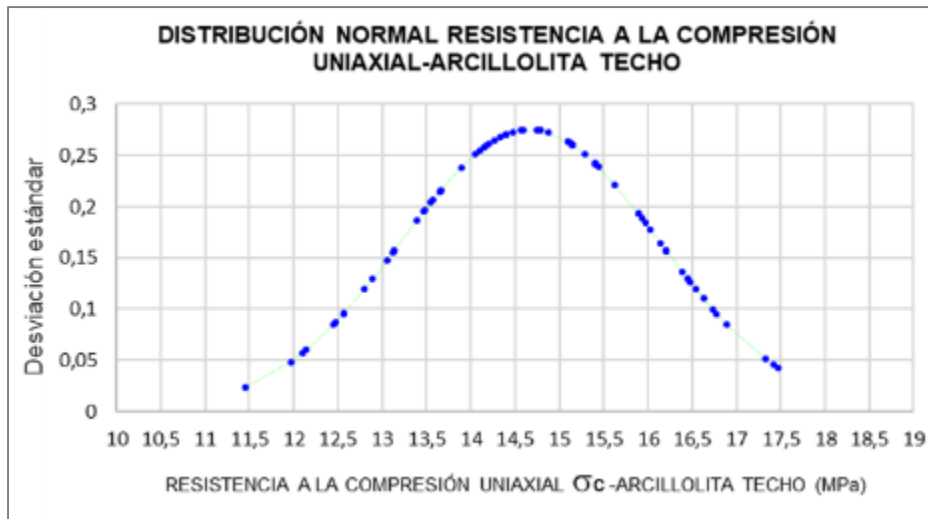


Figura 36. Distribución normal valores de resistencia a la compresión uniaxial obtenidos – arcillolita de techo.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos correspondientes a la resistencia a la compresión uniaxial de la arcillolita de techo a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 11.45 MPa y 17.47 MPa, presentan un valor promedio de 14.67 MPa, una desviación estándar de 1.45, un coeficiente de variación de 9.88%, y una mediana de 14.75.

De los resultados de la resistencia a la compresión uniaxial anteriormente descritos para los materiales geológicos analizados en el estudio (carbón y arcillolitas de piso y techo), se puede deducir que el carbón clasifica según la *ISMR (1980)* como roca blanda, según *The Geological Society of London (1979)* como roca moderadamente blanda, según *Bieniawski (1973)* como roca de resistencia muy baja; mientras que los materiales arcillosos de piso y techo clasifican según la *ISMR (1980)* como roca blanda, según *The Geological Society of London (1979)* como roca moderadamente dura y según *Bieniawski (1973)* como roca de resistencia muy baja (según la clasificación; citada por González de Vallejo, 2002). Ver la Figura 37.

Resistencia a la compresión simple (MPa)	ISMR (1981)	Geological Society of London (1979)	Bieniawski (1973)	Ejemplos
< 1	Suelos			
1 - 5	Muy blanda	Blanda > 1,25		Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón.
5 - 12,5	Blanda	Moderadamente blanda	Muy baja	
12,5 - 25		Moderadamente dura		
25 - 50	Moderadamente dura		Baja	Esquisto, pizarra.
50 - 100	Dura	Dura	Media	Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa.
100 - 200	Muy dura	Muy dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomita.
> 200				
> 250	Extremadamente dura	Extremadamente dura	Muy alta	Cuarcita, gabro, basalto.

..... CARBÓN
..... ARCILLOLITA DE PISO Y TECHO

Figura 37. Clasificación según la resistencia a la compresión uniaxial de los tipos de rocas estudiadas.

Fuente: Adaptado de González (2002).

De los resultados obtenidos en laboratorio en cuanto a peso unitario y resistencia a la compresión de los materiales analizados, se obtuvo un promedio de 12.64 KN/m³ y 23.65 KN/m³, para el carbón y materiales arcillosos de respaldo, respectivamente; correspondiendo a valores de resistencia a la compresión promedio de 6.14 MPa para el carbón y 15.16 MPa para los materiales de respaldo; deduciéndose por tanto, que estas dos características físicas tienen una relación directamente proporcional, como se muestra de manera gráfica en la Figura 38.

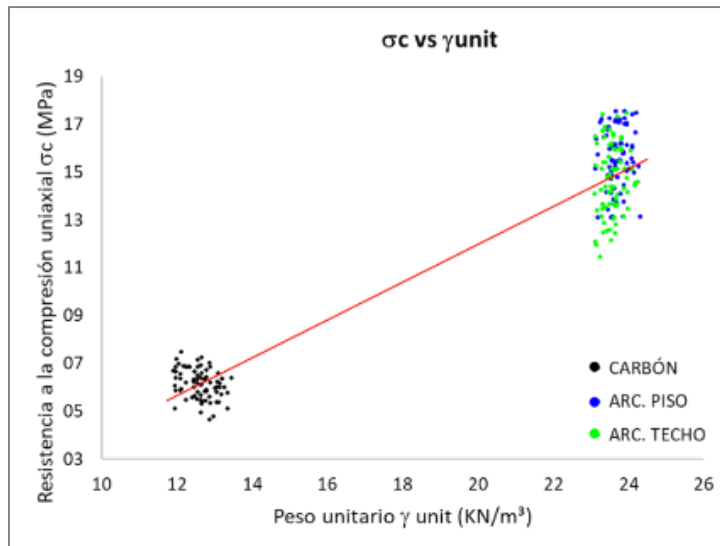


Figura 38. Relación entre peso unitario y resistencia a la compresión de las rocas estudiadas

Fuente: Elaboración propia

5.2.2.2. Resultados de los parámetros elásticos en los materiales estudiados (carbón).

A continuación, en la Tabla 23, se presentan los resultados de las constantes elásticas (Módulo de Young E y relación de Poisson), halladas utilizando bandas extensométricas tipo strain gauge en siete pruebas de resistencia a la compresión uniaxial sobre probetas cilíndricas de carbón.

En el Anexo 3, se presentan los resultados de los ensayos correspondientes a las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial realizando medición de deformaciones.

Teniendo en cuenta los valores de constantes elásticas, se puede clasificar la roca según el módulo relativo. La Tabla 23 muestra dicha clasificación, dentro de la cual los valores de módulo relativo para el carbón analizado oscilan entre 519 y 748, lo cual indica que esta roca clasifica como tipo M-H (medio-alto) - roca de módulo relativo $MR > 500$ (Deere y Miller). La Figura 39, esquematiza la clasificación de la roca analizada (carbón), según su Módulo relativo.

MUESTRA	SECTOR	LITOLÓGÍA	Módulo de young E (MPa)	relación de Poisson μ	σ_c (MPa)	CLASIFICACIÓN MECÁNICA DE LA ROCA INTACTA SEGÚN SU MÓDULO RELATIVO (DEERE & MILLER)	
						MÓDULO RELATIVO	CLASIFICACIÓN SEGÚN MÓDULO RELATIVO (DEERE & MILLER)
G1M6-CCSI	G1	CARBÓN	4291.14	0.281	6.78	633	M-roca de módulo relativo Medio-alto
G4M4-CCSI	G4	CARBÓN	3235.96	0.267	6.23	519	M-roca de módulo relativo Medio-alto
G6M10-CCSI	G10	CARBÓN	4188.48	0.278	6.55	639	M-roca de módulo relativo Medio-alto
G8M2-CCSI	G8	CARBÓN	4737.73	0.284	6.33	748	M-roca de módulo relativo Medio-alto
G10M2-CCSI	G11	CARBÓN	5123.97	0.267	7.21	711	M-roca de módulo relativo Medio-alto
G11M6-CCSI	G13	CARBÓN	5678.39	0.273	7.69	738	M-roca de módulo relativo Medio-alto

Tabla 23. Resultados de constantes elásticas halladas en laboratorio sobre probetas de carbón.

Fuente: Elaboración propia.

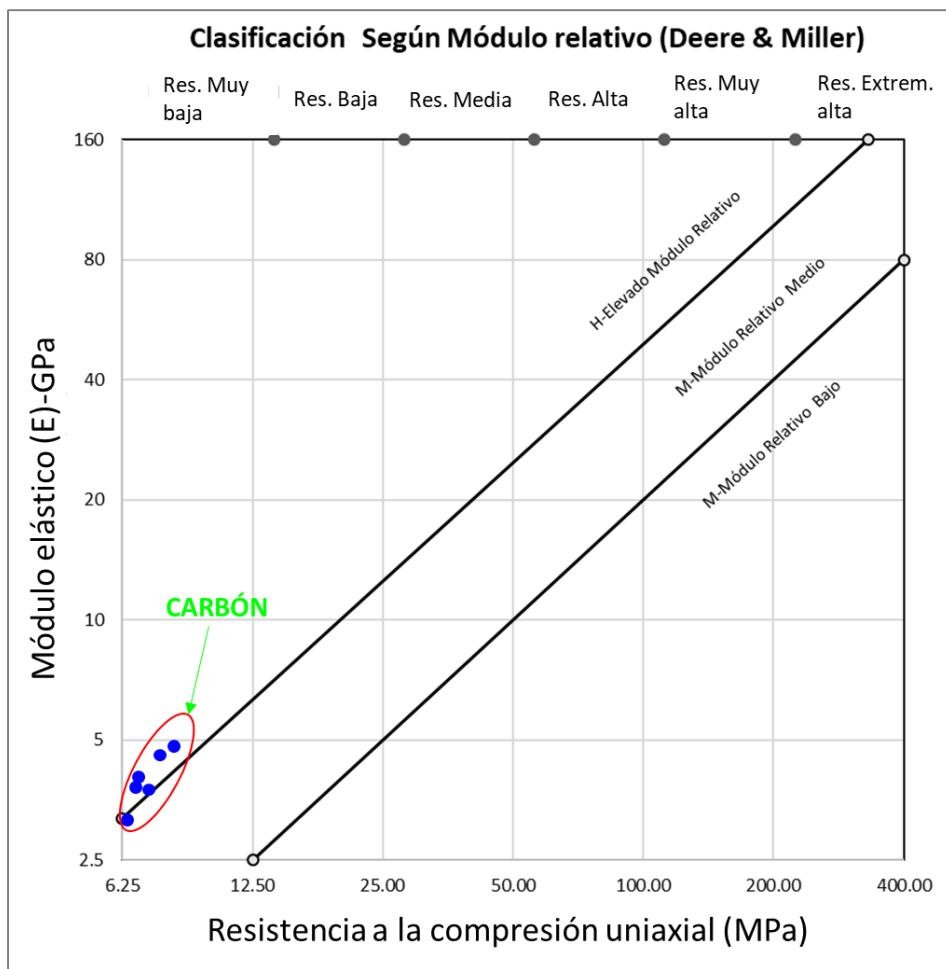


Figura 39. Clasificación de la roca analizada según el Módulo Relativo

Fuente: Adaptado de Deere y Miller (1966).

Revisando los valores determinados y contrastándolos con la literatura (González, 2002, Ko and Gerstle, 1976 y Goodman, 1989), se encuentra que los datos están dentro de los intervalos típicos para los materiales geológicos analizados.

5.2.3. Resultados de carga puntual de los materiales rocosos analizados (carbón, arcillolita de techos y pisos inmediatos).

A continuación, se presenta de manera esquemática los resultados del estudio correspondientes a los datos obtenidos de los ensayos de carga puntual sobre las probetas irregulares y cilíndricas de los materiales geológicos analizados (carbón y arcillolita).

En el Anexo 3, se presentan las tablas de resultados, en las cuales se muestran las dimensiones de los especímenes (diámetro-D, diámetro equivalente-De y ancho-W), los valores de carga de rotura e índice de carga puntual I_{50} , de cada una de las litologías estudiadas (carbón, arcillolita de piso y arcillolita de techo).

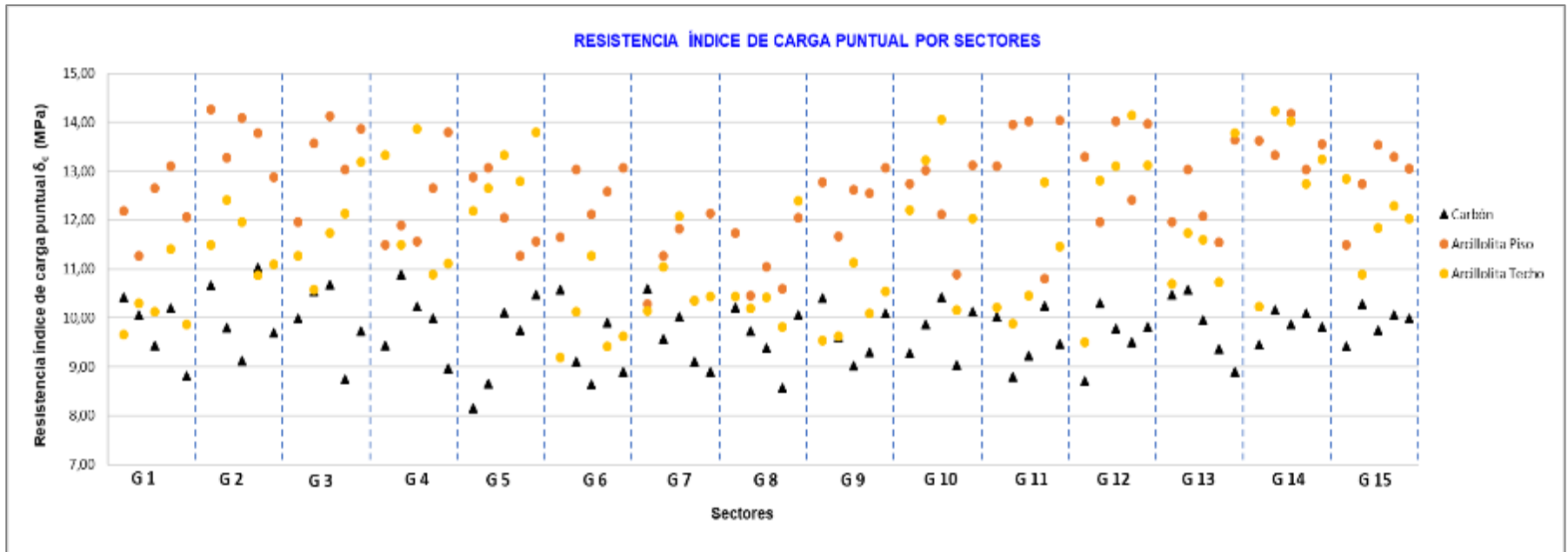


Figura 40. Representación esquemática de los resultados de carga puntual para los materiales geológicos estudiados.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3.1. Análisis estadístico para los resultados de carga puntual.

- **Carbón:** En la Figura 41, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia a la compresión uniaxial a partir del índice de carga puntual obtenidos en el estudio a partir de los datos adquiridos de las probetas irregulares y cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los mantos de carbón.

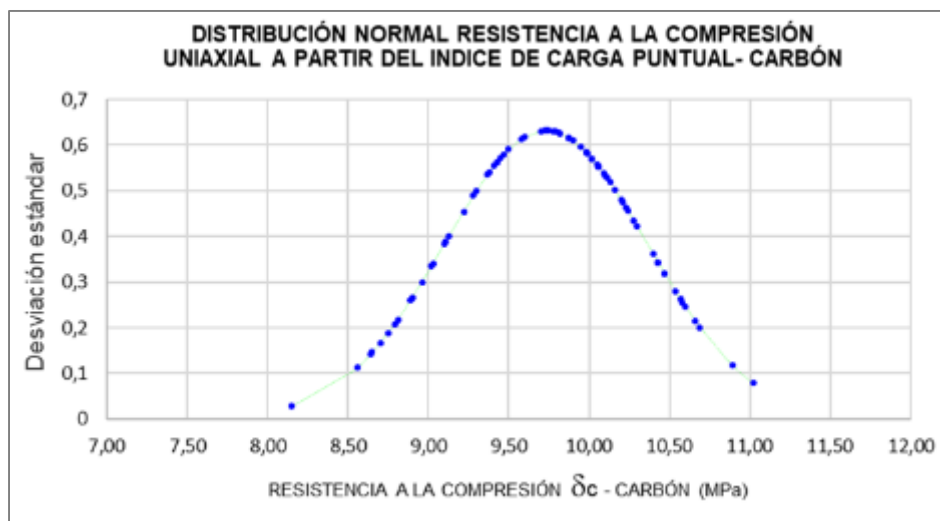


Figura 41. Distribución normal resistencia a la compresión uniaxial a partir del índice de carga puntual - carbón.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos de carga puntual del carbón a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 8.15 MPa y 11.02 MPa, presentan un valor promedio de 9.73 MPa, una desviación estándar de 0.63, un coeficiente de variación de 6.49%, y una mediana de 9.81.

- **Arcillolita de piso:** En la Figura 42, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia a la compresión uniaxial a partir del índice de carga puntual obtenidos en el estudio a partir de los datos adquiridos de las probetas irregulares y cilíndricas

preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los pisos de los mantos aflorantes (arcillolita de piso).

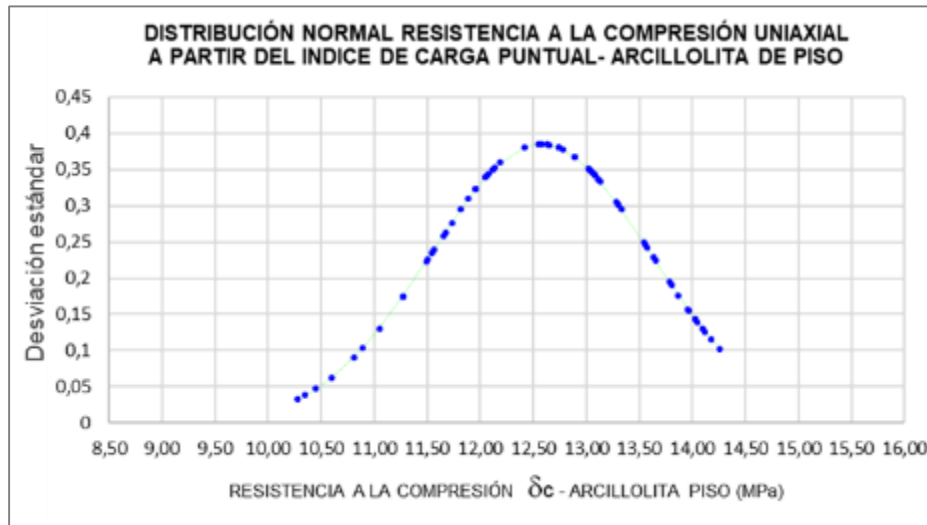


Figura 42. Distribución normal resistencia a la compresión uniaxial a partir de índice de carga puntual – arcillolita de piso.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos de carga puntual de la arcillolita de piso a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 10.28 MPa y 14.26 MPa, presentan un valor promedio de 12.57 MPa, una desviación estándar de 1.04, un coeficiente de variación de 8.24%, y una mediana de 12.74.

- **Arcillolita de techo:** En la Figura 43, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia a la compresión uniaxial a partir del índice de carga puntual obtenidos en el estudio a partir de los datos adquiridos de las probetas irregulares y cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los techos de los mantos aflorantes (arcillolita de techo).

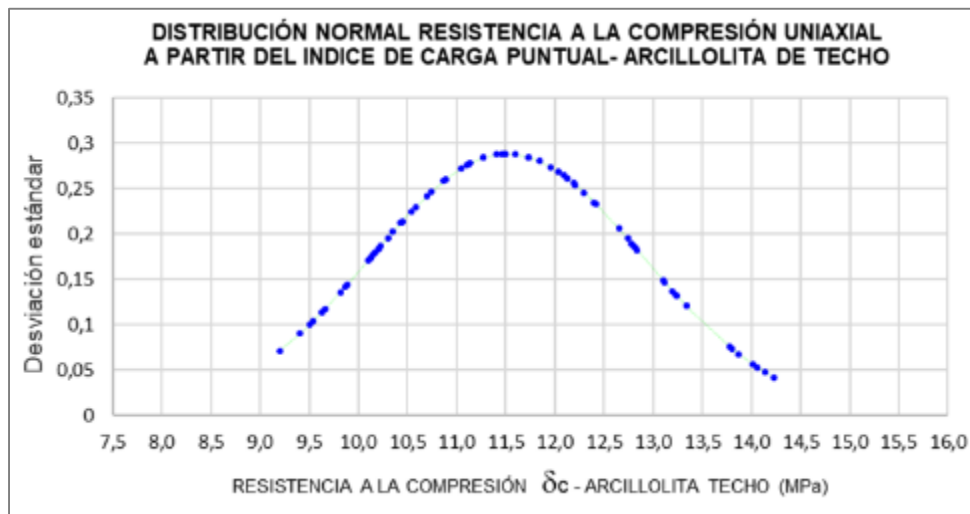


Figura 43. Distribución normal resistencia a la compresión uniaxial a partir de índice de carga puntual – arcillolita de techo.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos de carga puntual de la arcillolita de techo a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 9.20 MPa y 14.23 MPa, presentan un valor promedio de 11.52 MPa, una desviación estándar de 1.38, un coeficiente de variación de 12.00%, y una mediana de 11.41.

5.2.4. Resultados de la resistencia a la tracción indirecta-método brasilero de los materiales rocosos analizados (carbón, arcillolita de techos y pisos inmediatos).

A continuación, se presenta de manera esquemática los resultados del estudio correspondientes a los datos obtenidos para los ensayos de resistencia a la tracción indirecta realizados sobre los materiales geológicos (carbón y arcillolita).

En el Anexo 3, se presentan las tablas de resultados, en las cuales se muestran las dimensiones de los especímenes (diámetro-D, altura-h) y los valores de carga de rotura de cada una de las litologías estudiadas (carbón, arcillolita de piso y arcillolita de techo).

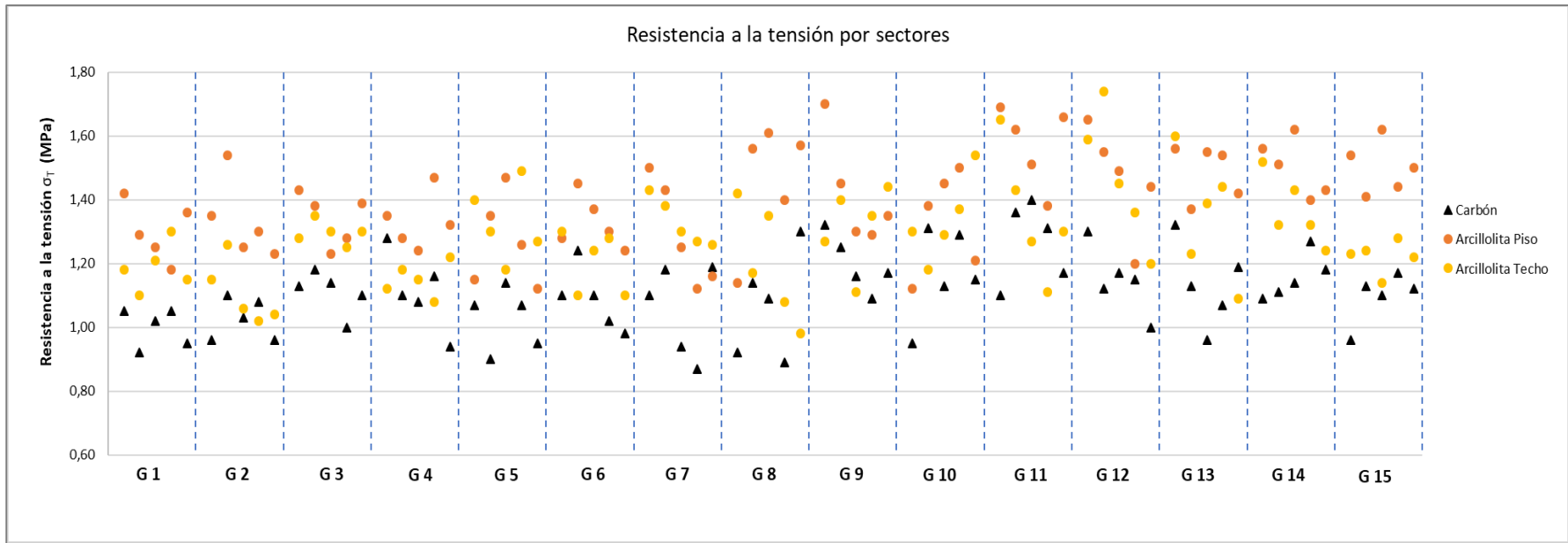


Figura 44. Representación esquemática de los resultados de resistencia a la tensión indirecta para los materiales geológicos estudiados.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4.1. Análisis estadístico para los resultados de resistencia a la tensión indirecta.

- **Carbón:** En la Figura 45, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia a la tensión indirecta obtenidos en el estudio a partir de los datos adquiridos de las probetas cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los mantos de carbón.

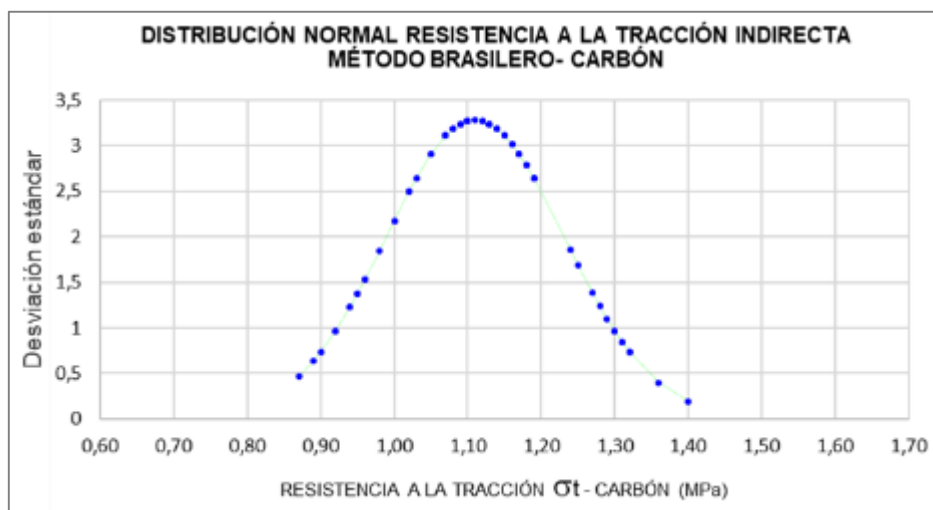


Figura 45. Distribución normal resistencia a la tensión indirecta - carbón.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos de resistencia a la tracción indirecta del carbón a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 0.87 MPa y 1.40 MPa, presentan un valor promedio de 1.11 MPa, una desviación estándar de 0.12, un coeficiente de variación de 10.94%, y una mediana de 1.10.

- **Arcillolita de piso:** En la Figura 46, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia a la tensión indirecta obtenidos en el estudio a partir de los datos adquiridos de las probetas cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los pisos de los mantos aflorantes (arcillolita de piso).

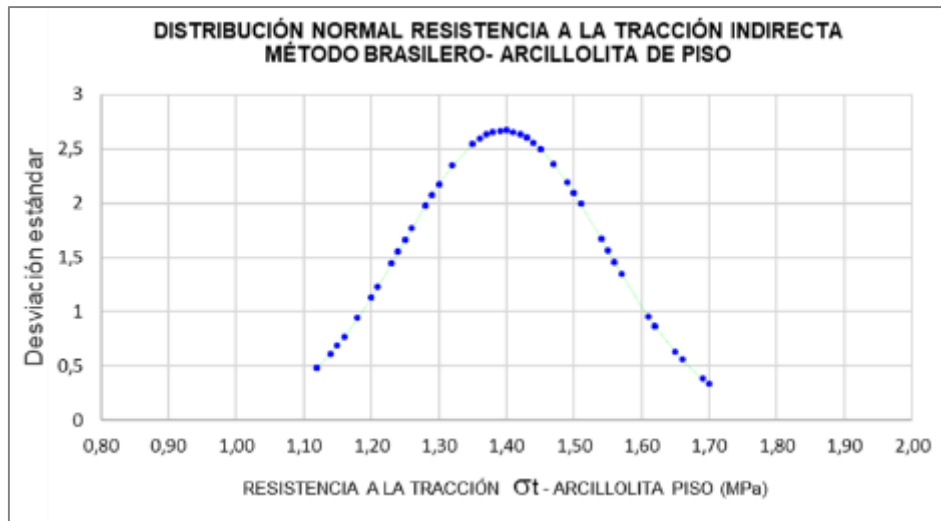


Figura 46. Distribución normal resistencia a la tensión indirecta – arcillolita de piso.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos de resistencia a la tracción indirecta de la arcillolita de piso a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 1.12 MPa y 1.70 MPa, presentan un valor promedio de 1.40 MPa, una desviación estándar de 0.15, un coeficiente de variación de 10.70%, y una mediana de 1.40.

- **Arcillolita de techo:** En la Figura 47, se presenta la distribución normal de los valores de resistencia a la tensión indirecta obtenidos en el estudio a partir de los datos adquiridos de las probetas cilíndricas preparadas en laboratorio para los materiales rocosos correspondientes a los pisos de los mantos aflorantes (arcillolita de techo).

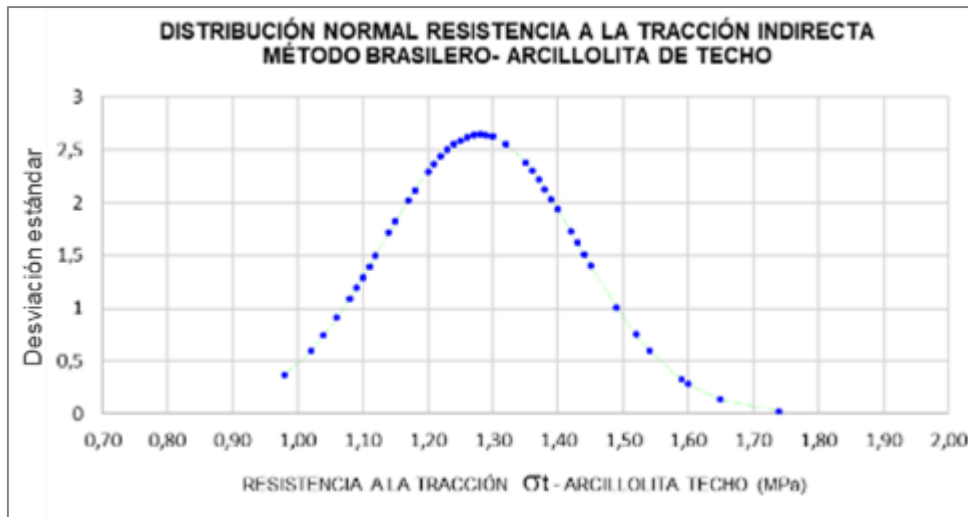


Figura 47. Distribución normal resistencia a la tensión indirecta – arcillolita de techo.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de los datos de resistencia a la tracción indirecta de la arcillolita de techo a través de los mantos aflorantes en el área de estudio, se puede deducir que los valores oscilan entre 0.98 MPa y 1.74 MPa, presentan un valor promedio de 1.28 MPa, una desviación estándar de 0.15, un coeficiente de variación de 11.78%, y una mediana de 1.27.

5.2.5. Resultados de compresión triaxial del material rocoso analizado (carbón).

La Tabla 24, muestra los resultados de los ensayos triaxiales realizados sobre las probetas de carbón, donde se especifican los sectores donde fueron extraídas las muestras y los esfuerzos aplicados sobre las mismas. Cabe resaltar que, se utilizó una presión de presión de confinamiento σ_3 :2 MPa según recomendaciones dadas por (Hoek y Brown, 1980).

RESULTADOS PRUEBAS TRIAXIALES EN CARBÓN		
SECTOR	σ cámara (MPa)	σ falla (MPa)
G2	2	15,61
G3	2	15,29
G7	2	15,59
G8	2	15,24
G9	2	13,69
G14	2	14,82

Tabla 24. Resultados de los ensayos triaxiales-carbón.

Fuente: Elaboración propia

De los resultados mostrados anteriormente de resistencia a la compresión triaxial, se puede deducir que, cuando se realizaron las pruebas con esfuerzo de cámara de 2 MPa, se tuvo un incremento significativo en el esfuerzo axial de rotura en aproximadamente 2.45 veces, teniendo en cuenta los valores medios de resistencia a la compresión uniaxial y compresión triaxial en carbón, pasando de 6.14 MPa a 15.04 MPa.

5.2.6. Resultados ensayos de expansión sobre los materiales rocosos analizados (arcillolita de pisos inmediatos).

Se llevaron a cabo tres pruebas de expansión libre y tres de expansión controlada sobre probetas preparadas en laboratorio, con el objeto de poder realizar una comparación del porcentaje de expansión y presión de expansión, se prepararon también muestras de tipo inalterado y remoldeado (pulverizadas y compactadas). Se determinó el porcentaje de expansión con respecto a la altura inicial de la muestra (22 mm) y la presión de expansión (presión requerida para mantener el dial en cero).

A continuación, en la Tabla 25, se muestran los resultados correspondientes a los ensayos de expansión. En el Anexo 3, se muestran los detalles de las pruebas de expansión realizadas.

RESULTADOS PRUEBAS DE EXPANSIÓN SOBRE MATERIALES ARCILLOSOS				
TIPO DE MUESTRA	SECTOR	EXPANSIÓN LIBRE (mm)	EXPANSIÓN (%)	PRESIÓN DE EXPANSIÓN (KPa)
PULVERIZADA-COMPACTADA	G2	1,32	6,00	164,78
PULVERIZADA-COMPACTADA	G10	1,12	5,09	147,30
PULVERIZADA-COMPACTADA	G12	0,98	4,45	138,81
INALTERADA CILINDRICA	G2	0,54	2,45	64,91
INALTERADA CILINDRICA	G10	0,47	2,14	54,93
INALTERADA CILINDRICA	G12	0,38	1,73	47,44

Tabla 25. resultados de las pruebas de expansión en materiales arcillosos (arcillolita de piso).

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados expuestos anteriormente, se puede deducir que las muestras ensayadas correspondientes a la pulverización y posterior compactación, muestran valores de expansión significativamente mayores que las muestras ensayadas correspondientes a material inalterado, determinándose así, que las muestras ensayadas (pulverización –compactación) se clasifican como materiales con un potencial de expansión medio-alto, mientras que las muestras ensayadas (inalteradas) se clasifican como materiales con un potencial de expansión bajo-medio (Gonzalez,2002). El comportamiento diferencial del potencial de expansión anteriormente descrito, obedece en gran medida a que, en las muestras pulverizadas y luego compactadas, hay mayor superficie específica del material arcilloso (láminas de arcilla) en contacto con el agua.

5.2.6.1. Caracterización de los materiales arcillosos del sector

Para corroborar los resultados de expansión de los materiales arcillosos del sector de estudio, y tener una mejor idea de las características físicas y mineralógicas de las rocas arcillosas del sector de estudio, se consultó la tesis de Maestría en ciencias de la tierra titulada Degradación de rocas arcillosas en ambientes mineros subterráneos de carbón¹⁰, trabajo de investigación realizado en la Mina del centro nacional minero SENA, Sogamoso, en el cual se realiza un

¹⁰ D. Mendivil, Degradación de rocas arcillosas en ambientes mineros subterráneos de carbón, caso de estudio: Mina del centro nacional minero SENA., Sogamoso: UPTC, 2019, pp. 38-46.

estudio detallado de los materiales de respaldo de los mantos de carbón aflorantes en la zona de estudio.

La caracterización composicional de la roca fue realizada por dicho autor mediante la aplicación de cuatro técnicas experimentales, las cuales fueron: análisis petrográfico, la Fluorescencia de rayos X (FRX), la Difracción de rayos X (DRX), y Observaciones en el Microscopio electrónico de barrido (SEM por Scanning Electron Microscope), en este trabajo solo se muestran resultados de las técnicas DRX y petrografía donde las rocas arcillosas se describieron desde un punto de vista macroscópico y microscópico para ver los elementos y minerales que constituyen la roca.



Figura 48. Macrofotografía de Limolita de grano grueso (Mendivil, 2019)

ROCA	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	FORMULA	[%]
Limolita arcillosa	Minerales de Arcilla	---	54.2
	Cuarzo	SiO ₂	31.5
	Siderita	FeCO ₃	2.0
	Micas (moscovita/sericita)	KAl ₂ (OH) ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)	4.0
	Opacos (material carbonoso)	----	8.3
	Pirita	FeS ₂	Traza

Tabla 26. Minerales reconocidos a través de la petrografía óptica de la roca de estudio (Mendivil,2019).

Adicionalmente, Mendivil (2019) complementó la descripción petrográfica con el análisis DRX, el cual permitió determinar que minerales se encuentran presentes en esta roca, esto con el fin de caracterizar las fases arcillosas que no se pueden determinar con la petrografía óptica, esto mediante el análisis de una muestra representativa de la roca la cual fue pulverizada hasta alcanzar una granulometría inferior de 0.074 mm, para luego proceder con los análisis (Figura 49).

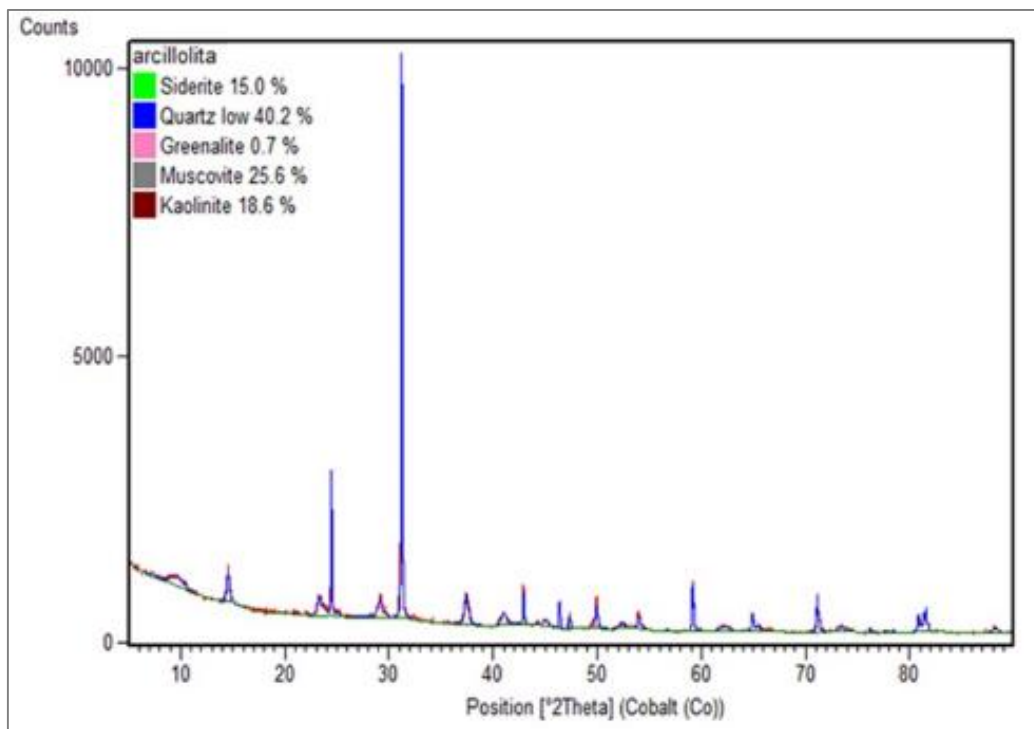


Figura 49. Difractograma de la Limolita arcillosa (Mendivil 2019).

Se observan las fases mineralógicas presentes en esta roca: cuarzo, Caolinita, Moscovita, Greenalita y nacrita.

En general, los resultados obtenidos mediante DRX realizado a la Limolita arcillosa (Figura 49), revelaron la presencia de arcillas poco expansivas como el caso de la caolinita, moscovita, Greenalita y nacrita, minerales arcillosos que, a pesar de tener gran plasticidad, no tienen un gran índice de hinchamiento.

5.2.7. Correlación entre las distintas pruebas en laboratorio de resistencia sobre los materiales analizados.

A partir de los resultados y análisis de laboratorio de las pruebas de resistencia realizadas sobre los distintos materiales geológicos (carbón y arcillolitas de piso y techo), se proponen las correlaciones entre las diferentes pruebas de resistencia realizadas (compresión uniaxial vs carga puntual), lo anterior debido a que, los dos, son parámetros muy usados al momento de realizar clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos y diseñar sostenimientos, pilas, cámaras y pilares, entre otros. Los valores obtenidos correspondientes al factor k para cada uno de los materiales de estudio se presentan a continuación en la Tabla 27.

MATERIAL	CARBÓN	ARCILLOLITA DE PISO	ARCILLOLITA DE TECHO
FACTOR K	22.25	27.22	23.82

Tabla 27. Resultados obtenidos para el factor k .

Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 50, 51 y 52, esquematizan la distribución lineal de los resultados de resistencia a la compresión uniaxial vs el índice de carga puntual para los materiales de estudio.

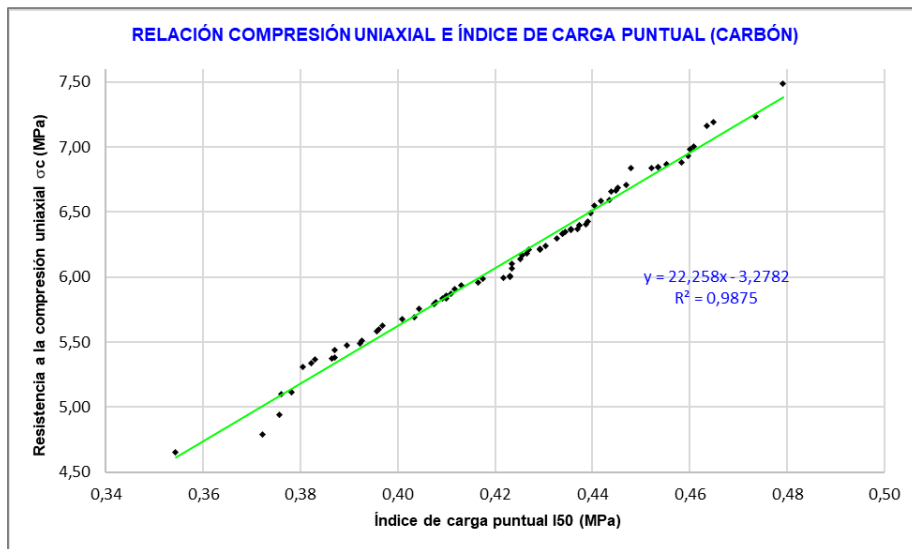


Figura 50. Correlación propuesta entre la resistencia a la compresión uniaxial y el índice de carga puntual-carbón.

Fuente: Elaboración propia.

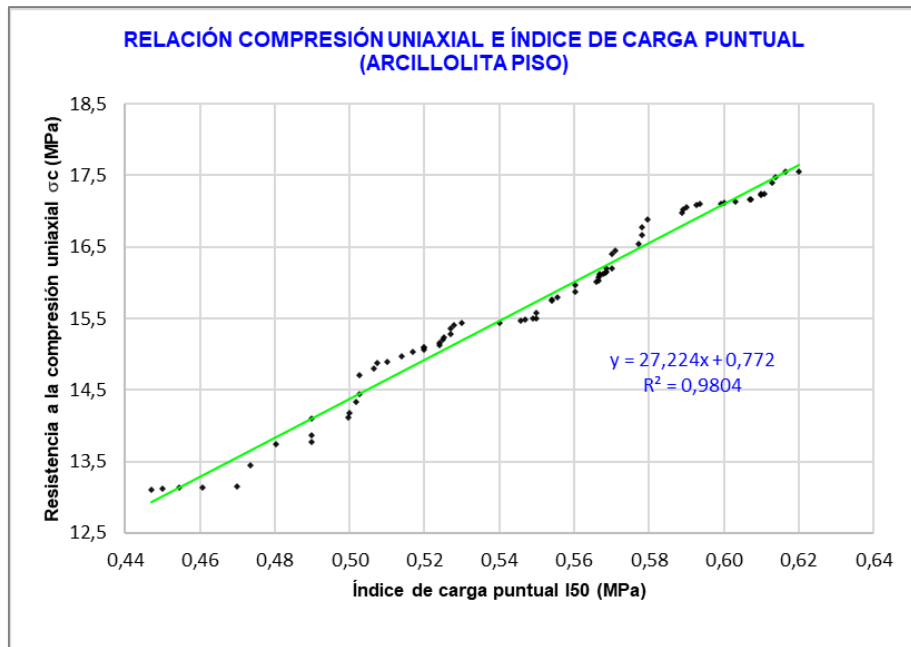


Figura 51. Correlación propuesta entre la Resistencia a la compresión uniaxial y el índice de carga puntual- arcillolita de piso.

Fuente: Elaboración propia.

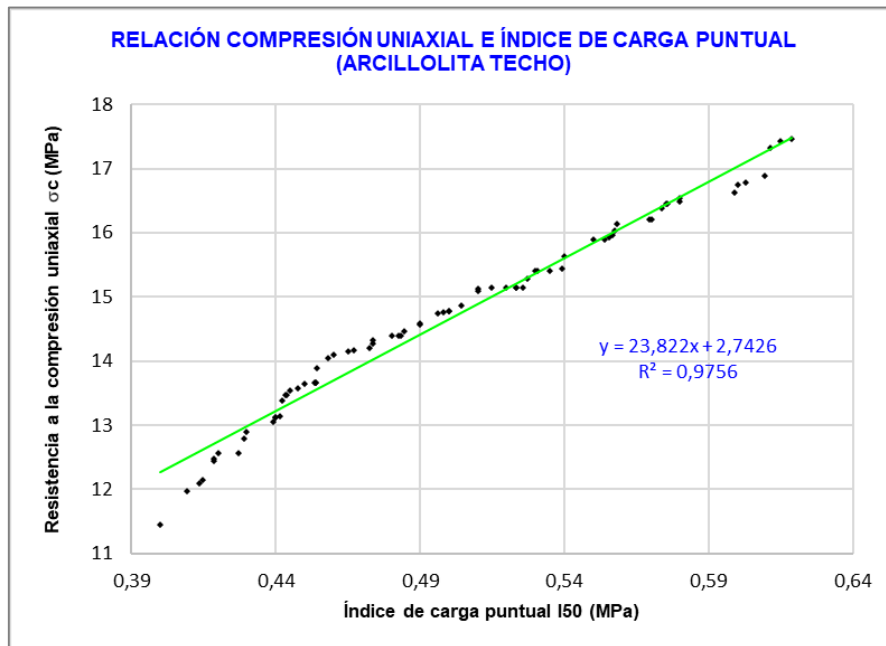


Figura 52. Correlación propuesta entre la Resistencia a la compresión uniaxial y el índice de carga puntual- arcillolita de techo.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las figuras presentadas anteriormente, las tres nubes de puntos están concentradas, de manera que la dispersión de los datos es muy baja, por tanto, se puede predecir que la confiabilidad en los datos es aceptable debido a que, los porcentajes de variación de la variable (R^2), son cercanos a la unidad (100%).

5.3. Resultados de análisis petrográfico del carbón

Se ilustran a continuación los resultados de los análisis petrográficos sobre las muestras de carbón del área de estudio, se realizaron lecturas por el método de reflectancia y por el método de composición maceral, siguiendo los lineamientos establecidos en las normas ASTM D2798-11^a y ASTM D2799-13, respectivamente.

5.3.1. Resultados petrográficos técnica de reflectancia

Reflectancia Media Aleatoria de la Vitrinita (R_o), %:	0.48
Desviación estándar:	0.0420
Varianza:	0.0018
Valor Máximo, %:	0.56
Valor Mínimo, %:	0.36
Total de Lecturas:	100
Reflectancia Media Máxima (MMR), %:	0.49

Tabla 28. Resultados reflectancia de la vitrinita.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos (Laboratorio CDT MINERAL S.A.S)

Vitrinoídes	Punto Medio de Reflectancia, %	Rango de Reflectancia, %	Número de Puntos, N°.	Volumen, %
0.3	0.350	0.30 to < 0.40	5	5.00
0.4	0.450	0.40 to < 0.50	57	57.00
0.5	0.550	0.50 to < 0.60	38	38.00
			Total	100.00

Tabla 29. Contenido de vitrinoídes.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos (Laboratorio CDT MINERAL S.A.S)

De los resultados obtenidos se puede inferir que el carbón analizado petrográficamente corresponde a un 62 % de Sub-Bituminoso A y 38 % de Bituminoso D, siendo así, un carbón Bituminoso Alto Volátil – Térmico (CDT MINERAL SAS).

5.3.2. Resultados petrográficos contenido maceral.

Macerales Reactivos	Volumen, %
Vitrinita	52.8
1/3 de Semifusinita	6.1
Liptinita	4.0
Inertes	
2/3 de Semifusinita	12.3
Fusinita	6.4
Micrinita	0.8
Macrinita	3.0
Inertodetrinita	1.4
Materia Mineral	13.2
Total	100.0

Tabla 30. Contenido maceral del material analizado.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos (Laboratorio CDT MINERAL S.A.S)

A partir de los resultados de composición maceral obtenidos por la técnica de microscopía (Point Count), en 1000 puntos de lectura, se puede deducir que el carbón del sector de estudio corresponde a carbón inmaduro con presencia de abundante materia mineral representada por material arcilloso disperso y óxidos de hierro; además pirita en fragmentos < 30 µm.

La Figura 53, muestra la microscopía del análisis realizado para el contenido maceral del carbón, identificándose los macerales presentes en la probeta de carbón leída.

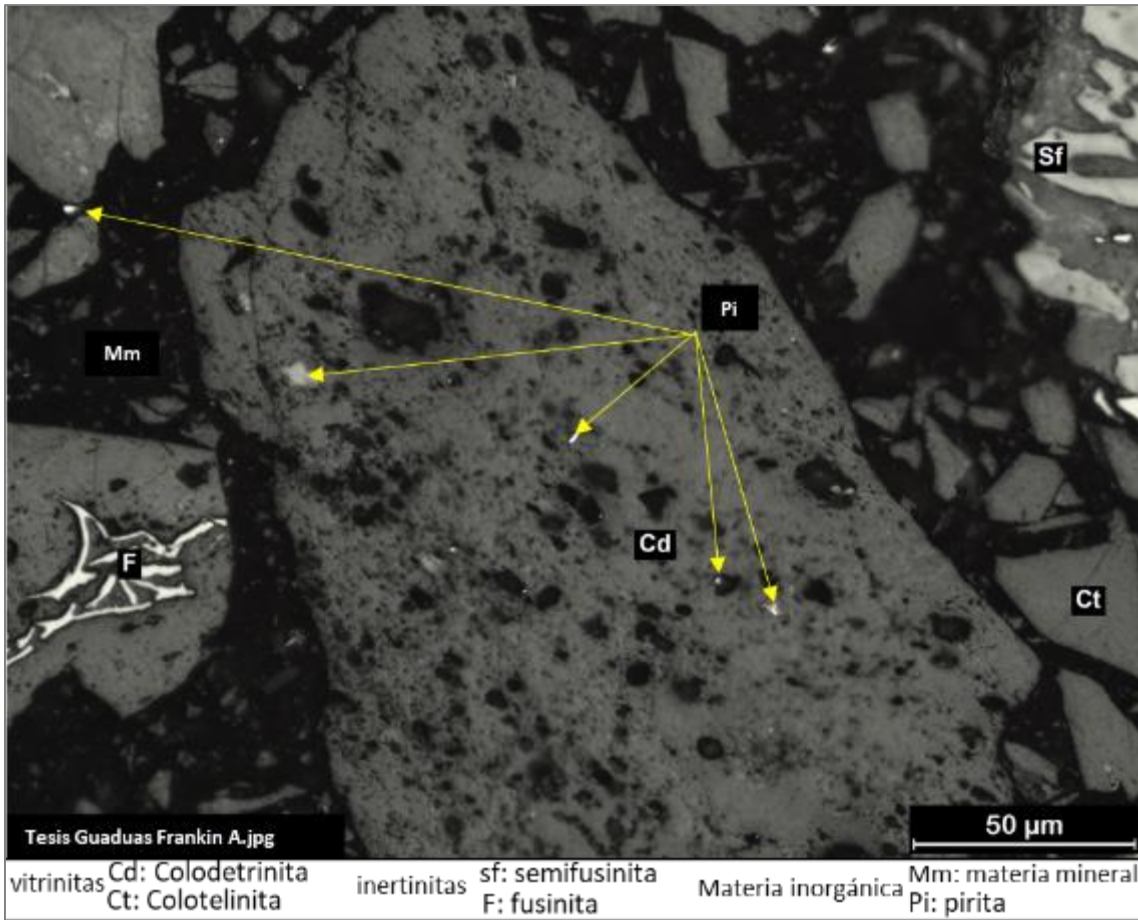


Figura 53. Microscopía del carbón analizado.

Fuente: Propia

5.4. Parámetros de resistencia de roca intacta y macizo rocoso

Para la obtención de los parámetros de resistencia tanto de roca intacta como de macizo rocoso, se utilizó el software ROCKLAB, el cual, permite determinar constantes de roca intacta (σ_{ic} y m_i), a partir de los resultados de ensayos de laboratorio realizados a los materiales rocosos, también los parámetros de resistencia del macizo rocoso, de acuerdo al criterio de rotura Generalizado de Hoek-Brown.

La Figura 54, muestra los resultados gráficos y numéricos de parámetros en roca intacta de los materiales de estudio (carbón y arcillolita de piso y techo).

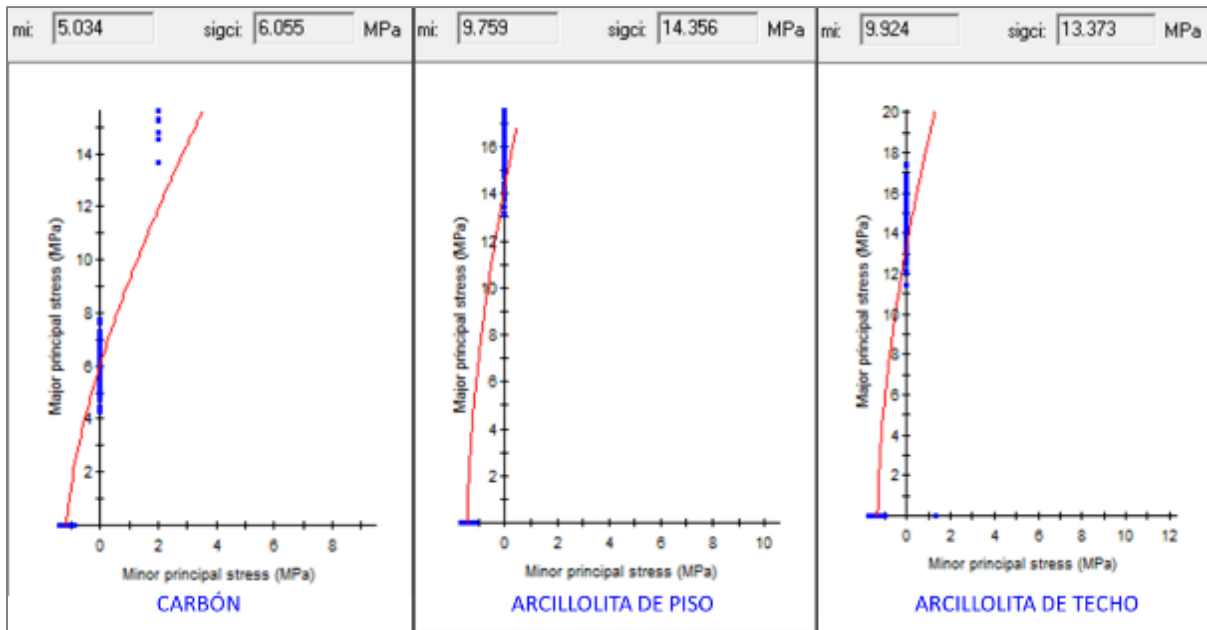


Figura 54. Parámetros geomecánicos de roca intacta de acuerdo al criterio de rotura Hoek-Brown.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados esquematizados anteriormente, se puede concluir que están dentro de los rangos de valores típicos expuestos por González (2002), para este tipo de materiales.

Paralelamente a la obtención de las constantes de roca intacta nombradas anteriormente, se obtuvieron para cada uno de los quince sectores de estudio, los parámetros de resistencia del macizo rocoso teniendo en cuenta factores como el índice de resistencia geológica (GSI), factor de perturbación (D) contemplando la aplicación para túneles, módulo elástico (Mi) y peso unitario del material, para los criterios de falla Hoek-Brown y Mohr-Coulomb. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 31.

SECTOR	Criterio Hoek-Brown			Criterio Mohr-Coulomb		Parámetros macizo			
	mb	s	a	c (MPa)	ϕ (°)	sigt (MPa)	sigc (MPa)	sigcm (MPa)	Erm (MPa)
G1	0.093	0.000039	0.518	0.036	19.01	-0.003	0.031	0.219	156.89
G2	0.074	0.0000213	0.524	0.029	17.15	-0.002	0.022	0.186	135.46
G3	0.012	0.0001	0.515	0.038	21.07	-0.003	0.041	0.246	131.60
G4	0.099	0.000045	0.517	0.035	20.12	-0.003	0.034	0.228	120.51
G5	0.133	0.0001	0.512	0.042	22.48	-0.004	0.053	0.275	190.43
G6	0.118	0.0001	0.514	0.039	21.54	-0.004	0.045	0.256	172.58
G7	0.093	0.000039	0.518	0.036	19.01	-0.003	0.031	0.219	142.52
G8	0.112	0.0001	0.515	0.040	20.40	-0.003	0.041	0.246	163.45
G9	0.105	0.0001	0.516	0.037	20.60	-0.003	0.038	0.237	141.85
G10	0.088	0.0000335	0.520	0.034	18.67	-0.002	0.029	0.210	126.03
G11	0.126	0.0001	0.513	0.042	21.59	-0.004	0.049	0.265	156.71
G12	0.078	0.0000248	0.522	0.030	18.23	-0.002	0.024	0.194	111.85
G13	0.142	0.0001	0.511	0.043	22.95	-0.005	0.058	0.286	156.13
G14	0.083	0.000028	0.521	0.032	18.45	-0.002	0.026	0.202	104.67
G15	0.118	0.0001	0.514	0.042	20.87	-0.004	0.045	0.256	134.81

Tabla 31. Parámetros de resistencia del macizo rocoso obtenidos.

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 6 Evaluación geomecánica. Caso de estudio: Mina La Pared

6.1. Características generales del sector de estudio.

El proyecto minero donde se encuentra la mina La Pared, representa la tipología y características de las labores mineras de la zona de estudio, al mismo tiempo, la mina contempla labores mineras de explotación que atraviesan gran parte de la secuencia estratigráfica del carbón aflorante en el sector y en la cual, se encuentran varios mantos caracterizados geomecánicamente en este estudio. Además, la mina cuenta con las condiciones de seguridad para la investigación, dispone de espacios necesarios para realizar la etapa experimental de adquisición de datos y toma de muestras en los litotipos. Debido a todo lo anterior la mina en mención fue seleccionada para realizar la investigación e iniciar la evaluación del comportamiento geomecánico de los diferentes mantos de carbón que se explotan en la zona.

La mina tiene un túnel principal de acceso (Inclinado principal), 3 sobreguías y varios tambores de explotación.

6.1.1. Localización

El proyecto minero La Pared, se encuentra localizado en la vereda Morcá, municipio de Sogamoso a 7 km del casco urbano en el sector la Bata. La bocamina principal de dicho proyecto se encuentra delimitada por las coordenadas (E:1.129.887; N:1.126.084), con origen geográfico MAGNA SIRGAS/Bogotá.

6.2. Modelización geotécnica de los problemas comunes detectados dentro de las labores subterráneas de explotación.

6.2.1. Análisis de cuñas de roca dentro de las excavaciones

Para el análisis de estabilidad de cuñas y visualización de discontinuidades estructurales que se intersectan en las excavaciones subterráneas en roca, se utilizó el software UNWEDGE de Rocscience, cuyas licencias educativas las dispone la universidad, y mediante el cual se realizó el cálculo del factor de seguridad de cuñas inestables.

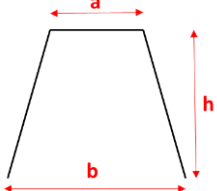
El análisis cinemático de cuñas se realizó contemplando: la orientación y buzamiento de las familias de discontinuidades predominantes, espaciamiento, rugosidad, bloques por cada metro cúbico, las dimensiones del túnel en cada sección a través del inclinado principal y los niveles de avance de explotación (se tomó como referencia de abscisado la progresiva 0,0 correspondiente a la bocamina principal), peso unitario del material y el azimut de los túneles, analizándose así dos secciones a través del inclinado principal y dos secciones a través de cada nivel. La Tabla 32, muestra los parámetros adoptados para el análisis y modelación de cuñas de roca. La geometría de cada una de las secciones analizadas se describe en la Tabla 33.

Tabla 32. Parámetros adoptados para la modelación de cuñas de roca.

PARÁMETRO	VALOR	NOTA
cohesión (t/m ²)	0	No se tiene en cuenta este valor, debido a que no se realizaron ensayos de resistencia al corte sobre discontinuidades.
ϕ discontinuidades (°)	20-25	Determinado a partir de las unidades de dureza del martillo Schmidt en campo, criterio Barton y Choubey (1977).
Criterio de resistencia		Mohr-Coulomb
Peso unitario roca (kN/m ³)	23.57	Valor promedio del análisis estadístico- resultados de pesos unitarios de la investigación

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Geometría de las secciones analizadas dentro de las labores subterráneas.

SECCIÓN	TUNEL PRINCIPAL	SOBREGUÍA 1	SOBREGUÍA 2	SOBREGUÍA 3
	a=1.7m	a=1.5m	a=1.6m	a=1.4m
	b=2.7m	b=2.4m	b=2.5m	b=2.4m
	h=2.7m	h=2.5m	h=2.4m	h=2.2m

Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 55, 56, 57, 58 y 59, esquematizan los resultados obtenidos con las modelizaciones realizadas en las condiciones descritas anteriormente.

▪ **Análisis de cuñas sección 0+80 (inclinado principal)**

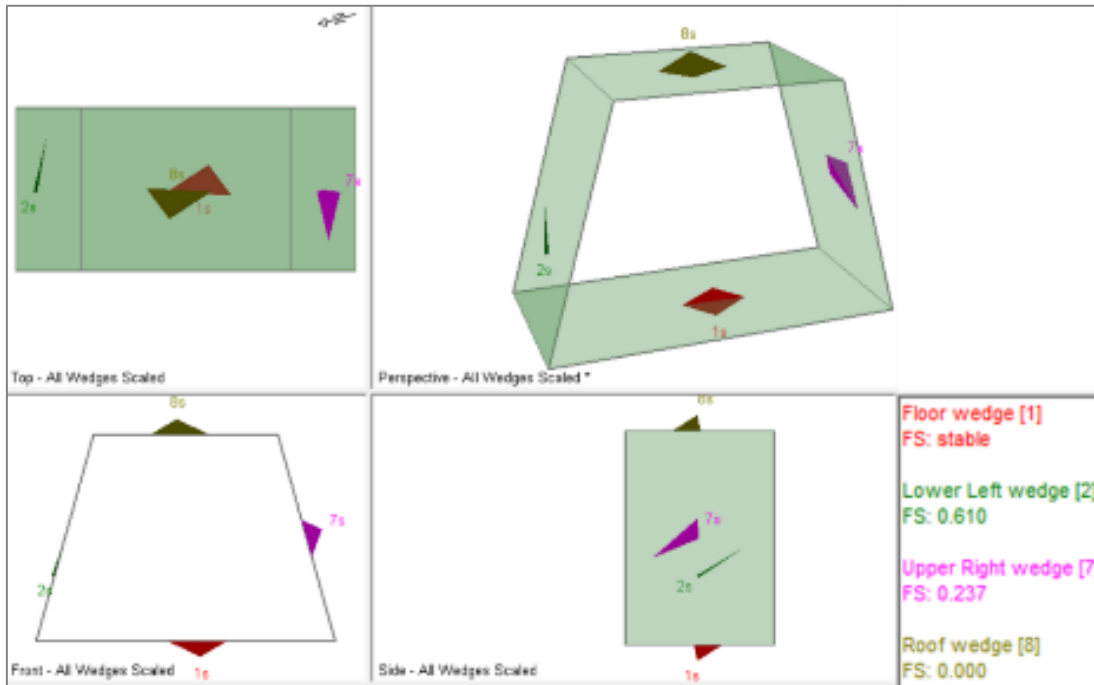


Figura 55. Análisis de cuñas sección 0+80 (inclinado principal)

Fuente: Elaboración propia

▪ **Análisis de cuñas sección 0+150 (inclinado principal)**

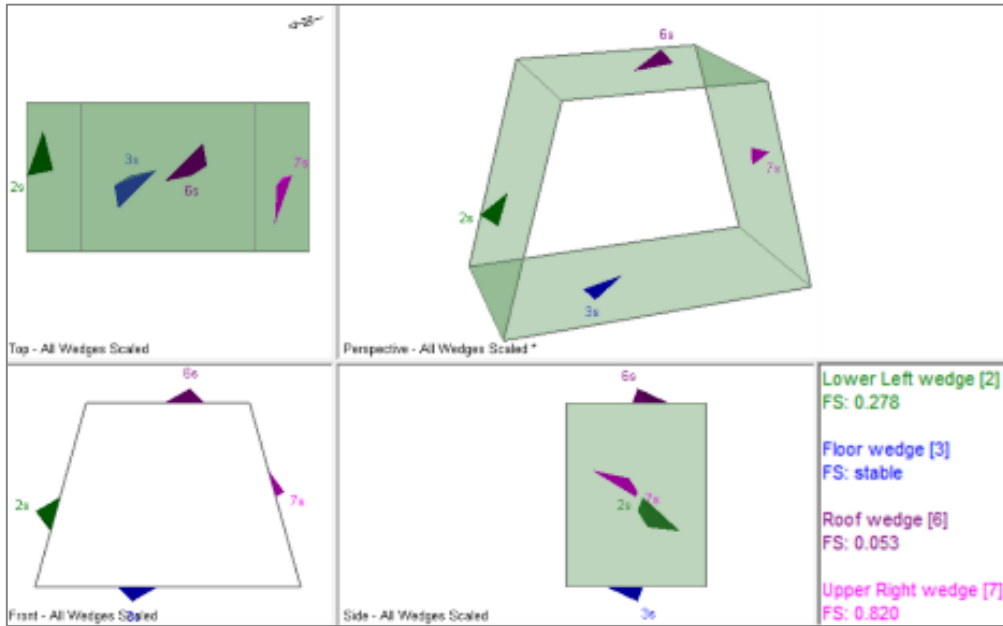


Figura 56. Análisis de cuñas sección 0+150 (inclinado principal).

Fuente: Elaboración propia

▪ **Análisis de cuñas sección 0+180 (Sobreguía 1)**

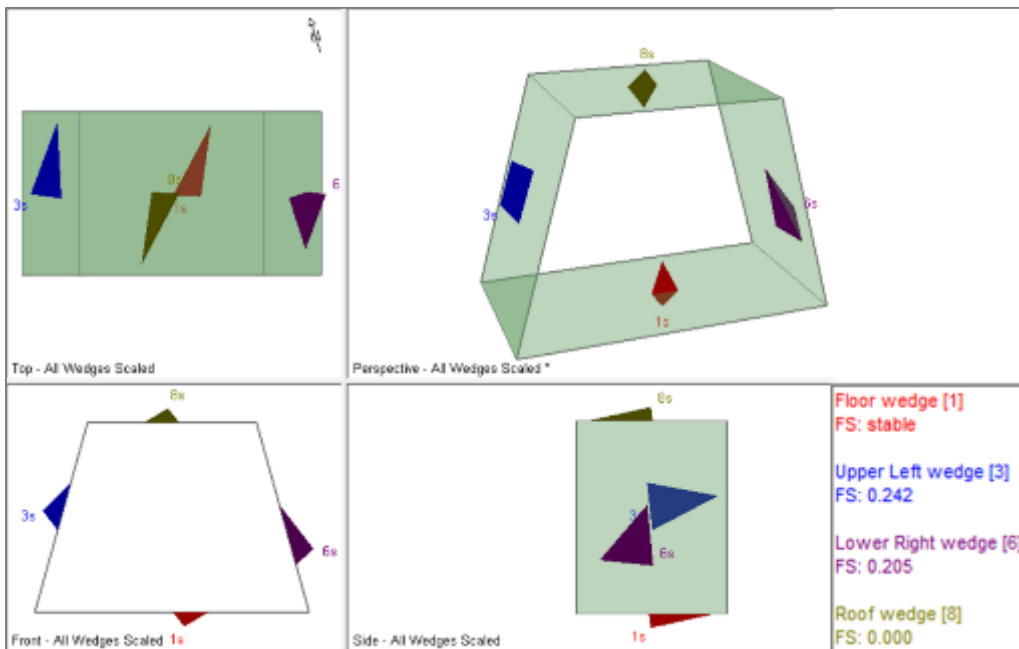


Figura 57. Análisis de cuñas sección 0+180 (Nivel 1).

Fuente: Elaboración propia.

▪ **Análisis de cuñas sección 0+193 (Sobreguía 2)**

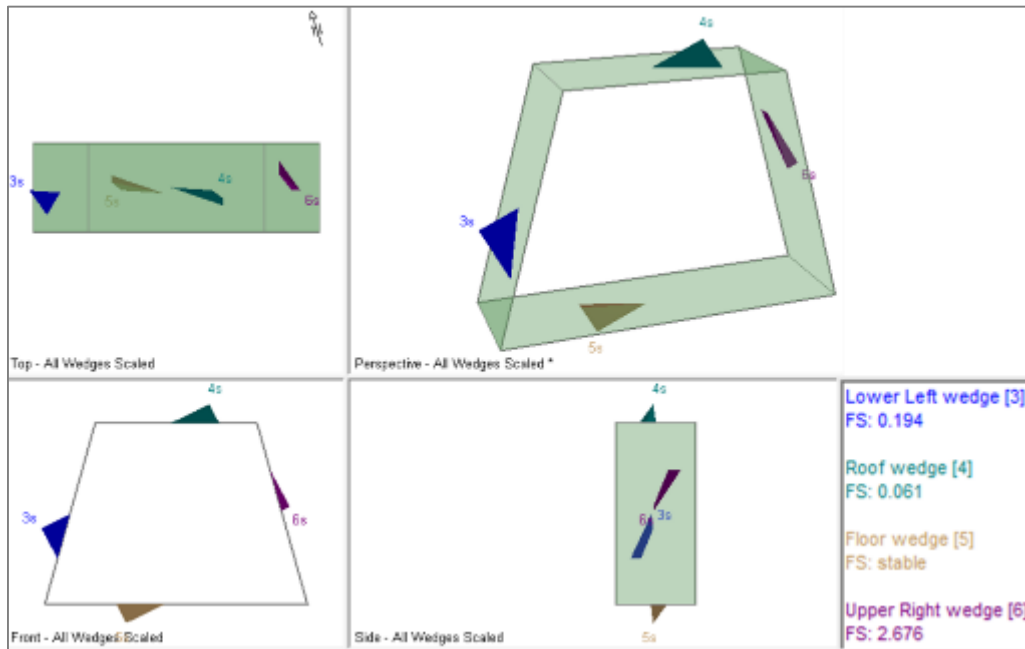


Figura 58. Análisis de cuñas sección 0+193 (Nivel 2)

Fuente: Elaboración propia.

▪ **Análisis de cuñas sección 0+220 (Sobreguía 3)**

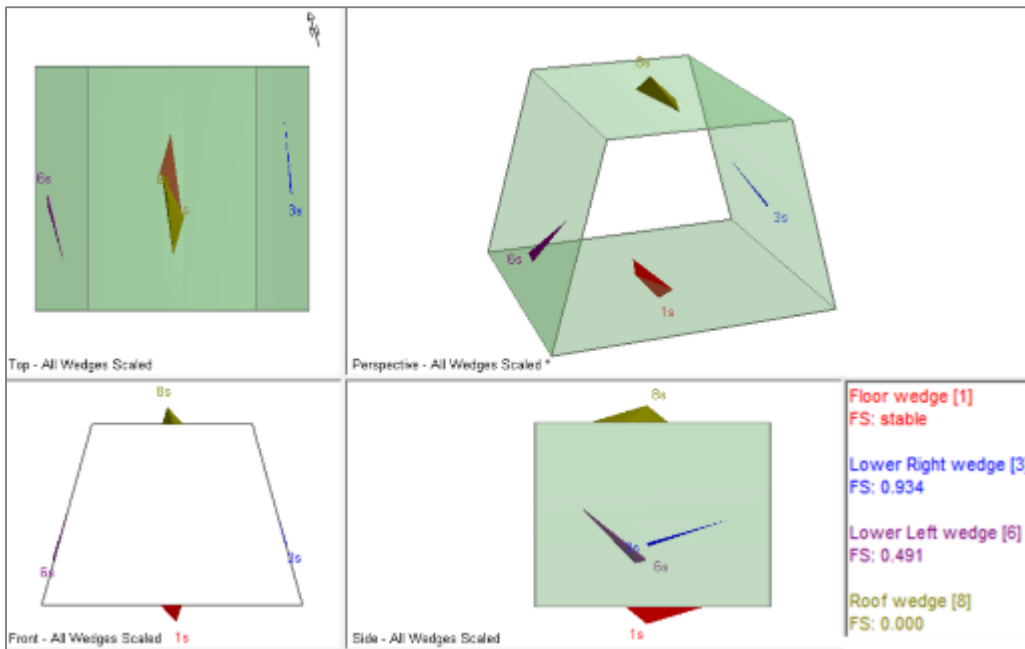


Figura 59. Análisis de cuñas sección 0+220 (Nivel 3)

Fuente: Elaboración propia

A partir de los análisis de cuñas o bloques de roca mostrados anteriormente, se puede concluir que la intercepción de familias de las discontinuidades existentes en el macizo rocoso dentro de las secciones analizadas, genera cuñas inestables de roca tanto en las secciones laterales de los túneles como en los techos de los mismos. De acuerdo al levantamiento de datos estructurales y de discontinuidades tales como espaciamiento, persistencia y continuidad, se puede deducir a partir de lo visto dentro de las labores subterráneas de explotación y en los patios de acopio de mineral explotado, que las cuñas generadas no superan los 0.15 m^3 ,

Para la mitigación del riesgo por caída de bloques de roca dentro de los túneles, y teniendo en cuenta que los recursos económicos para estabilizar las cuñas por medio de pernos, son limitados, se recomendó realizar la remoción de los bloques caídos y sueltos (desabombe) por encima de los capices y por atrás de las puertas laterales, para posteriormente realizar un recalce o relleno de los espacios vacíos por medio de madera rolliza (tacos), además se recomendó al personal técnico y de labores de mantenimiento dentro de las labores de explotación, llevar a cabo jornadas de reforzamiento y densificación con tabla, de los paneles de protección tanto en el techo como en las paredes de la excavación (madera de forro), así como la reducción de la distancia entre puertas .

6.2.2. Análisis de esfuerzos y deformaciones dentro de las excavaciones

Para evaluar la condición de estabilidad de las secciones del túnel frente a los empujes de la roca y al efecto de la redistribución de esfuerzos en condiciones estáticas y seudoestáticas, se ejecutó una modelación con método numérico usando el software PHASE 2 de Rocscience, cuyas licencias educativas las dispone la Universidad.

Para los análisis anteriores se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Para la discretización del modelo, se adoptó una malla con elementos tipo triángulo de 6 nodos y un número de nodos externos igual a 100, como se muestra a continuación:

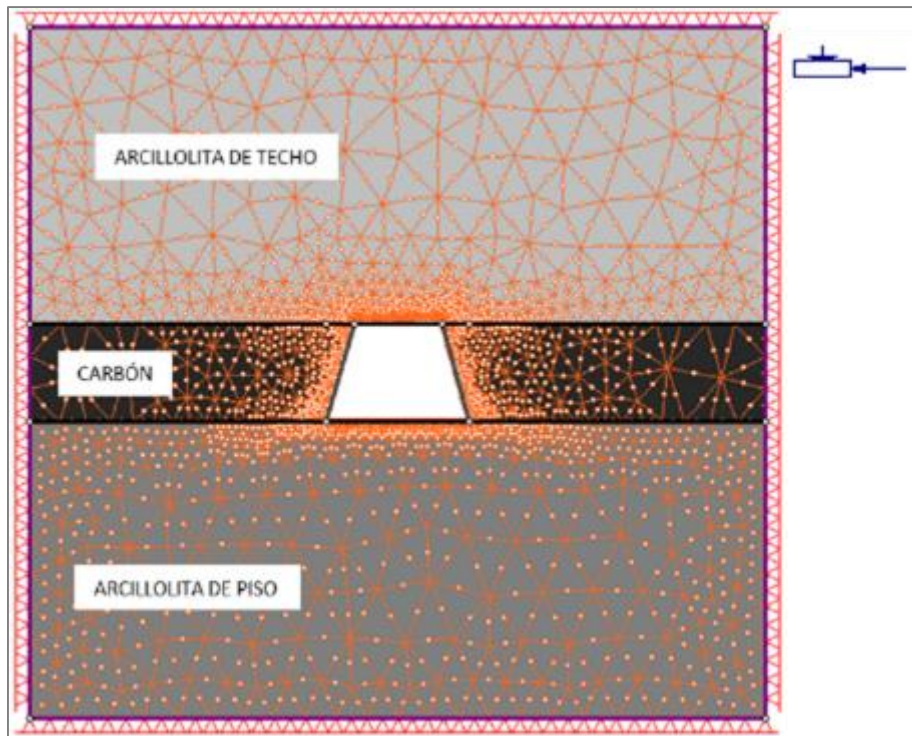


Figura 60. Discretización del modelo

Fuente: Elaboración propia.

- Se consideró para los estratos de carbón y estratos de respaldo, los parámetros obtenidos de la caracterización geomecánica de roca intacta y macizo rocoso, sin tener en cuenta el efecto del agua en los análisis.

- Se consideró un estado de esfuerzo teniendo en cuenta factores como:

- Orientación de las estructuras sedimentarias estudiadas.
- Dirección del plegamiento en la zona y fallamiento inverso.
- Cobertura sobre las secciones de análisis.
- Información suministrada por la firma INGETEC S.A, correspondiente al proyecto Central Hidroeléctrica El Guavio (1986), con mediciones de esfuerzos in situ sobre la Cordillera Oriental, hechas a partir de overcoring, de donde se asumieron valores de esfuerzos $\sigma_1=21.8$ MPa, $\sigma_2=14.0$ MPa y $\sigma_3=7.8$ MPa.
- El modelo constitutivo que se empleó para simular los diferentes tipos de roca fue el de Hoek y Brown (1980).

En la Tabla 34, presentan los parámetros adoptados para el análisis de deformaciones dentro de las secciones de la excavación

Tabla 34. Parámetros empleados para el análisis de deformaciones.

PARÁMETRO	VALOR	NOTA
Peso unitario carbón (kN/m ³)	12.64	Valores promedio del análisis estadístico- resultados de pesos unitarios de la investigación.
Peso unitario arcillolita de piso (kN/m ³)	23.72	
Peso unitario arcillolita de techo (kN/m ³)	23.57	
Resistencia a la compresión uniaxial- carbón (MPa)	6.14	Valores promedio del análisis estadístico- resultados de resistencia a la compresión uniaxial de la investigación.
Resistencia a la compresión uniaxial- arcillolita de piso (MPa)	15.65	
Resistencia a la compresión uniaxial- arcillolita de techo (MPa)	14.67	
Relación de Poisson- ν carbón	0.27	Valor promedio de resultados de relación de Poisson obtenidos de la investigación
Módulo de Young- E_i carbón (MPa)	3235	Valor promedio de resultados de Módulo de Young obtenidos de la investigación
Criterio de resistencia		Hoek-Brown
GSI	47	Valor determinado dentro de las labores mineras
m_i -carbón	5.034	Parámetro obtenido con el software Roclab, a partir de los resultados de ensayos de resistencia a la compresión uniaxial, tensión indirecta y triaxial.
Módulo del macizo- E_m (MPa)	263.3	Parámetros obtenidos con el software Roclab
mb	0.411	
s	0.00041	
a	0.5223	

Fuente: Elaboración propia.

- Se evaluó el comportamiento de esfuerzos y deformaciones actuantes en las secciones correspondientes al inclinado principal a través del buzamiento de la estructura (ver la Figura 61) y las galerías de avance a través del rumbo de los mantos de carbón (ver la Figura 62), teniendo en cuenta el manto que se explota actualmente, los respaldos de este y la geometría de la excavación.

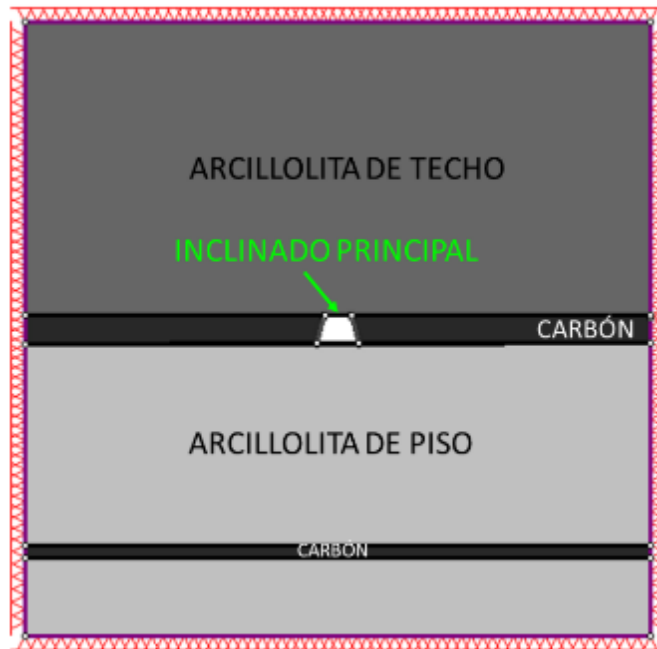


Figura 61. Sección de análisis para el inclinado principal.
Fuente: Elaboración propia.

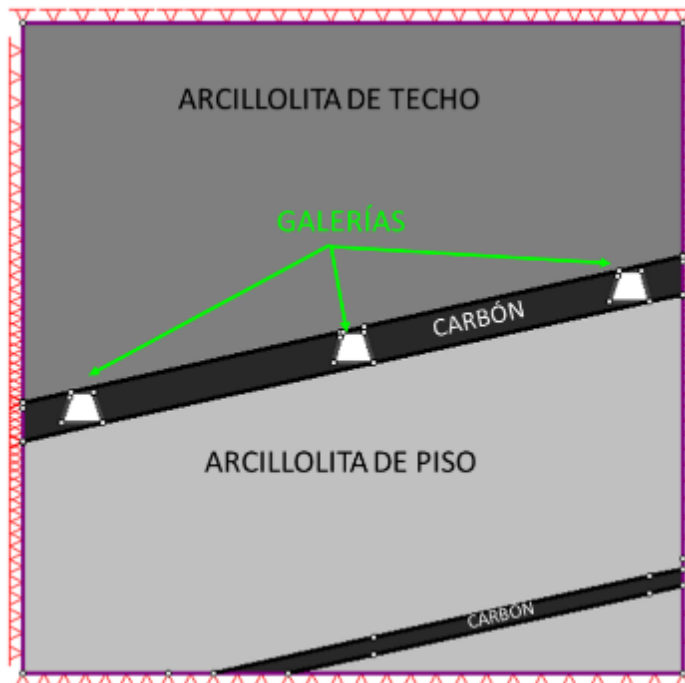


Figura 62. Sección de análisis para las galerías de explotación.
Fuente: Elaboración propia.

Para este tipo de análisis, se llevó a cabo el procedimiento que se describe a continuación:

- Se tuvo en cuenta 1 metro lineal de avance de explotación en cada una de las labores analizadas, asumiendo 10 etapas para cada caso.
- a- Se determinó la cantidad de deformación de las paredes, piso y techo del túnel antes de la instalación del soporte. A medida que se excava cada labor minera, hay una cierta cantidad de deformación, antes de que se pueda instalar la madera de soporte. La determinación de esta deformación se hizo utilizando las relaciones empíricas propuestas por Vlachopoulos y Diederichs.¹¹.
- b- Se utilizó el método de reducción de presión interna, determinando la presión interna que produce la cantidad de deformación de las paredes, techo y piso del túnel en la sección y antes de la instalación de soporte. Este es el valor determinado en el paso anterior.
- c- Se construyó el modelo que relaje el límite a la cantidad calculada en el paso anterior utilizando una presión interna. Luego se agregó y se determinó las deformaciones en la excavación.
- Se agregó una carga distribuida uniforme al túnel en la etapa 1. La magnitud y la dirección de la carga son iguales y opuestas a las tensiones in situ, formando así un equilibrio entre las tensiones en la roca y la presión dentro del túnel. Como la presión es igual y opuesta a la tensión in situ, no debe producirse deformación. Sin embargo, en la etapa 2 y posteriores, se factorizó la carga y se redujo gradualmente la magnitud de la presión. Como resultado, la deformación del túnel aumentó a medida que la presión se redujo a cero. Factor = 1 significa que la magnitud será la misma que el campo de esfuerzos en la sección analizada, mientras que un Factor = 0 significa que no se aplicará carga en esa etapa. (ver la Tabla 35).

¹¹ Vlachopoulos, N. and M.S. Diederichs, 2009. Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. Rock Mech. Rock Eng.

ETAPA	FACTOR
1	1
2	0.8
3	0.7
4	0.6
5	0.5
6	0.4
7	0.3
8	0.2
9	0.1
10	0

Tabla 35. Factor de reducción de la magnitud de la presión al interior de la excavación

Fuente: Elaboración propia

- Para calcular la deformación del túnel en el punto de instalación del soporte, se usaron dos datos del análisis de elementos finitos: El desplazamiento máximo de la pared del túnel lejos de la cara del túnel, y el radio de la zona plástica lejos de la cara del túnel. Ambos valores se calcularon a partir del análisis de deformación plana con presión interna cero dentro de la excavación.
- Luego, a partir de los datos medidos en el paso anterior, se procedió a determinar la deformación, utilizando el ábaco que se muestra en la Figura 63. El siguiente paso consistió en determinar la etapa en la cual debe ser instalado el soporte con la gráfica desplazamiento total vs etapa (ver la Figura 64).

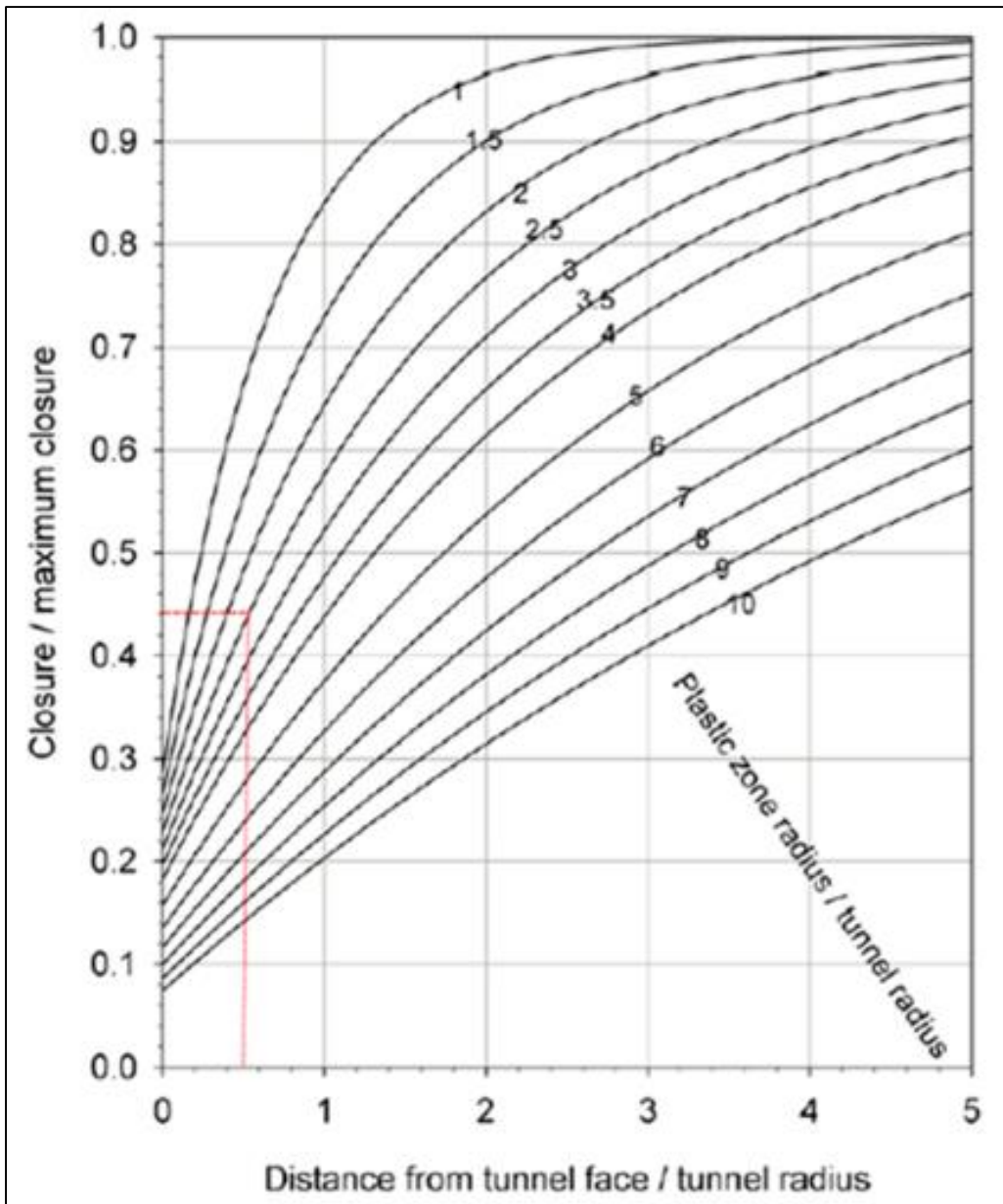


Figura 63. Ábaco para determinar la deformación a partir de la zona plástica

Fuente: Rockscience Phase 2 Tutorial.

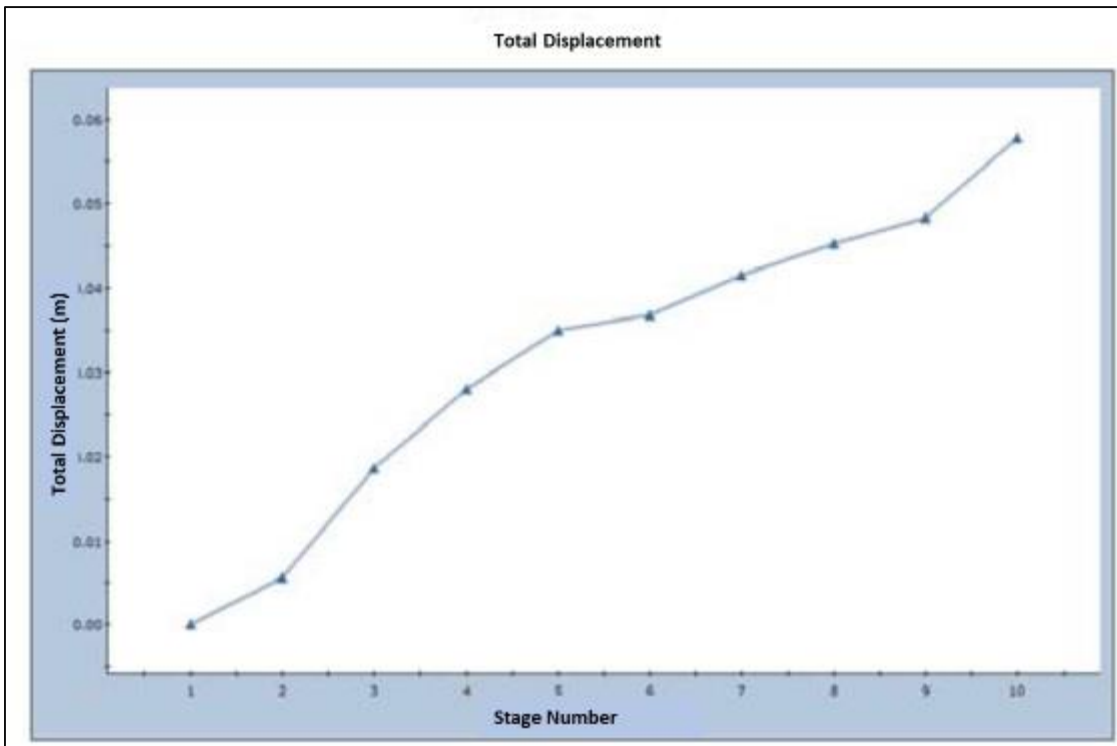


Figura 64. Gráfico desplazamiento total vs etapa.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Phase 2.

Para cada una de las etapas determinadas en las diferentes excavaciones, se instaló el soporte que se utiliza actualmente en la zona (puerta alemana en madera), y luego de realizar varias corridas en varias profundidades se determina que el sostenimiento empieza a fallar desde profundidades mayores a 84 metros.

Durante el recorrido y levantamiento de información a través de las labores subterráneas de explotación del proyecto minero La Pared, se logró identificar sectores donde la madera de sostenimiento se rompía con frecuencia, dicho problema se presenta en las partes laterales de las puertas de sostenimiento (ver la Foto 23); cabe resaltar que varios sectores con puertas rotas, coinciden con la presencia de agua a través de las paredes y techo de la excavación.

Según Cemal (1987), la resistencia máxima de la madera es a la tensión, la humedad hace decrecer la resistencia a la tensión, un aumento desde el 10% del contenido de humedad hasta el punto de saturación de la fibra, hace que la resistencia disminuya linealmente. La

máxima resistencia a la compresión paralela a la fibra, alcanza en promedio sólo el 50% de la resistencia a la tensión a lo largo de la misma fibra.

De acuerdo a lo anteriormente descrito, se observan varios sectores a lo largo de las labores subterráneas de explotación, donde las palancas laterales y capiz se deterioran con mayor frecuencia, debido a que, hay goteos y flujos de agua provenientes del macizo rocoso.



Foto 23. Rotura de las puertas de sostenimiento.

Fuente: Propia.

A continuación, se presentan los resultados de los análisis ejecutados en términos de desplazamientos totales máximos.

➤ **Modelo # 1: Excavación sin sostenimiento-inclinado principal**

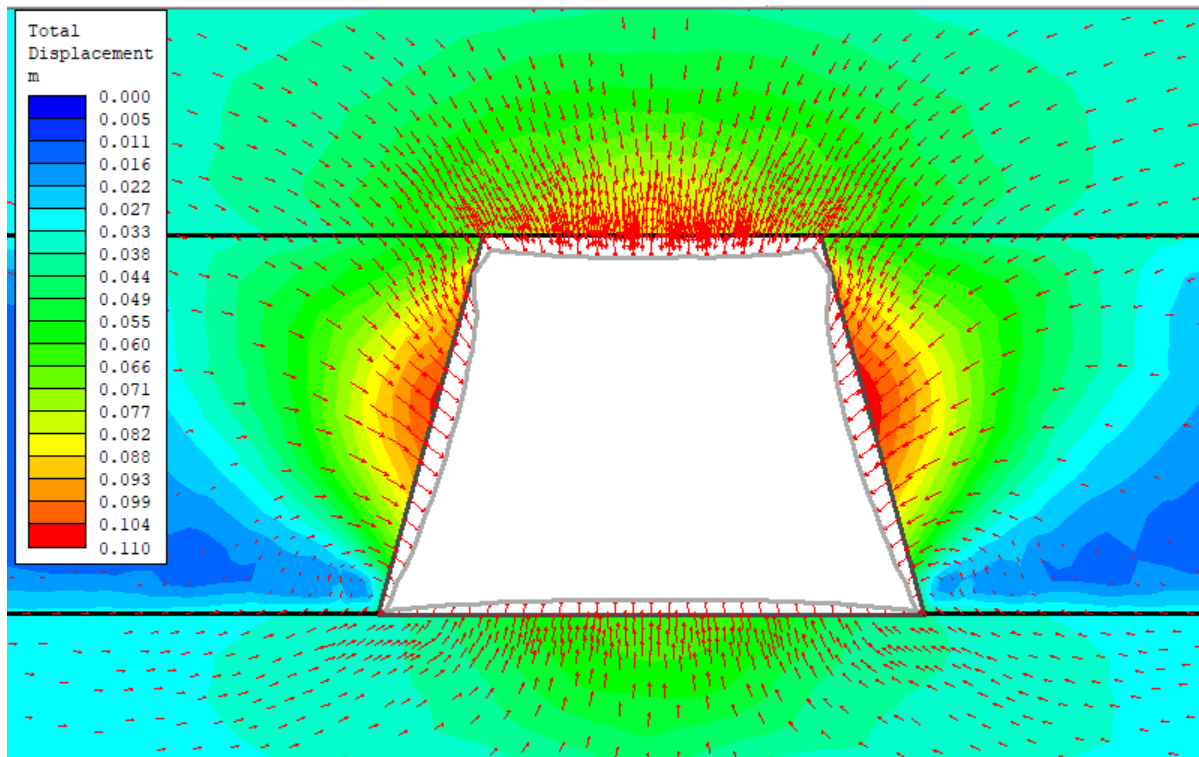


Figura 65. Modelo de deformación de la excavación sin sostenimiento-inclinado principal

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados del análisis de la excavación sin la colocación de ningún tipo de soporte, se puede deducir que, se generan desplazamientos para las partes laterales de la excavación con valores entre 44 mm y 110 mm, desplazamientos en el piso con valores entre 39 mm y 60 mm, y desplazamientos entre 66 mm y 88 mm para el techo.

➤ **Modelo # 2: Excavación con sostenimiento-Inclinado principal**

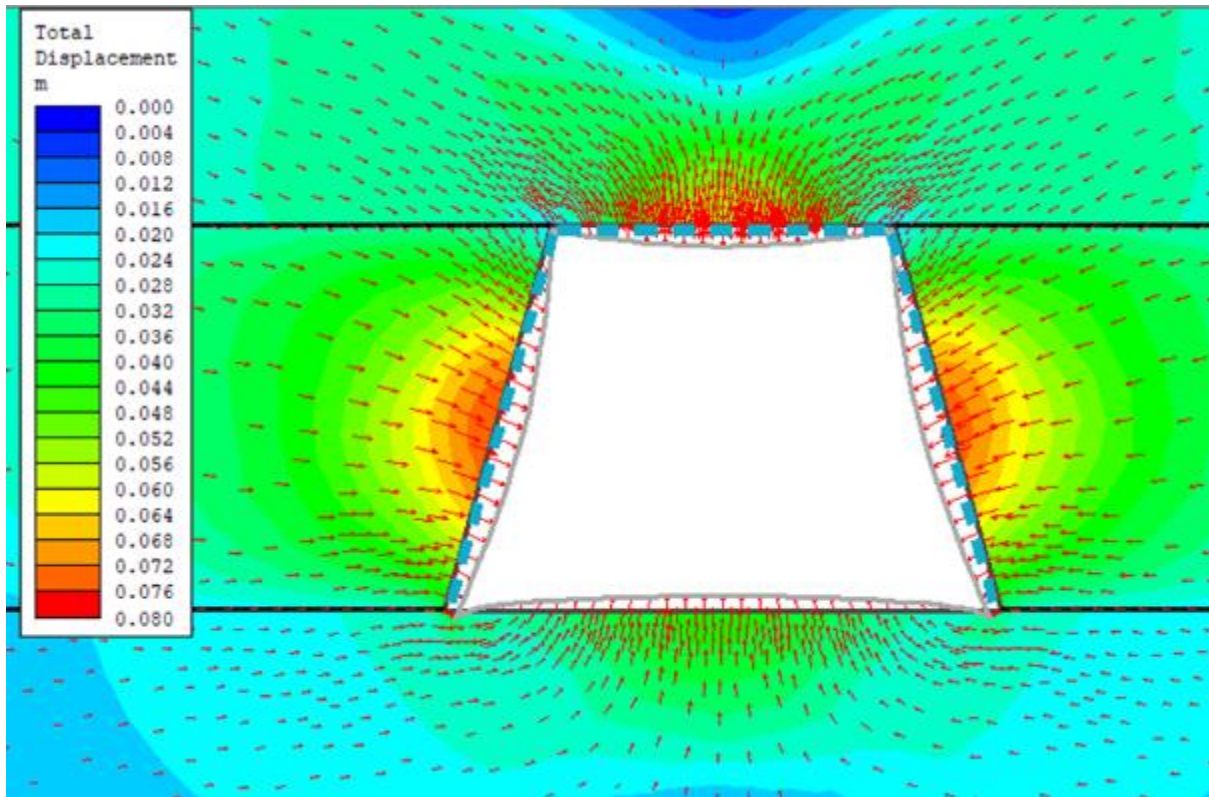


Figura 66. Modelo de la excavación con sostenimiento- inclinado principal.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de correr el modelo de excavación con el soporte en madera que se utiliza actualmente, se infiere que los desplazamientos totales se reducen significativamente a desplazamientos para las partes laterales de la excavación con valores entre 18 mm y 76 mm, desplazamientos en el piso con valores entre 28 mm y 40 mm, y desplazamientos entre 16 mm y 56 mm para el techo.

➤ **Modelo # 3: Excavaciones de las galerías de explotación sin sostenimiento**

Para el modelamiento de las excavaciones correspondientes a las galerías de explotación, se tienen de derecha a izquierda los siguientes resultados para galerías 1, 2 y 3.

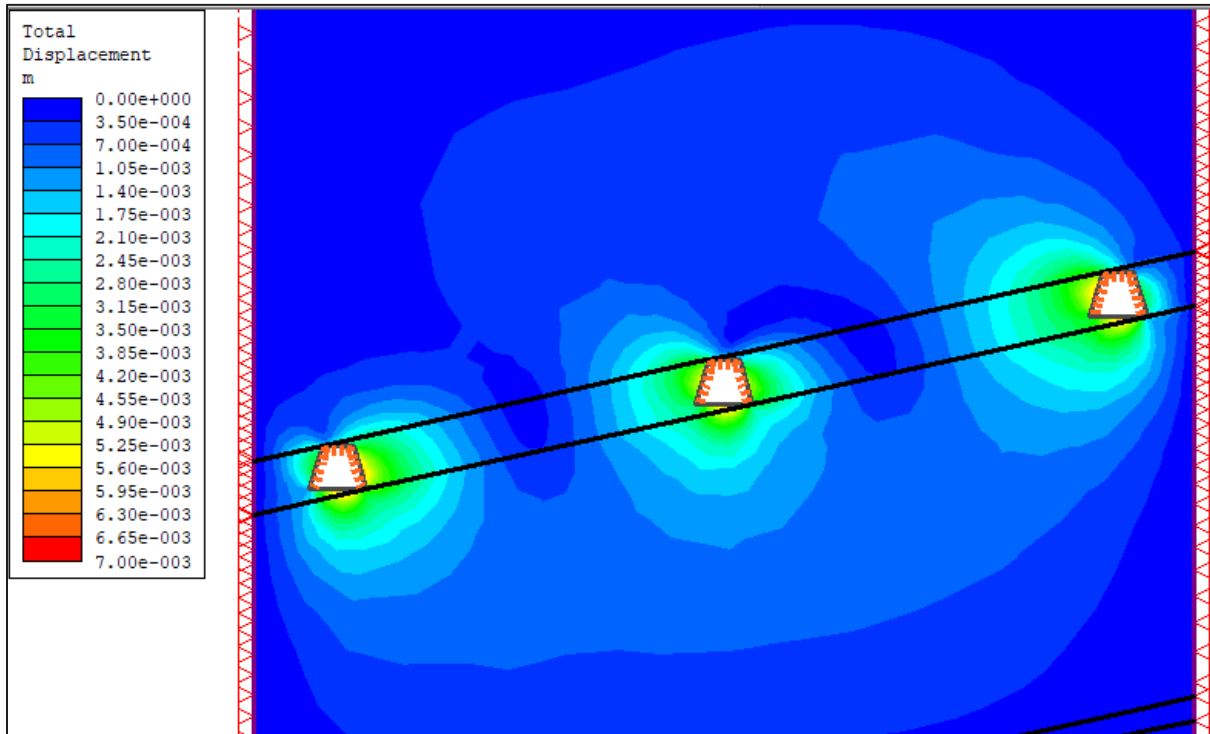


Figura 67. Modelo de las excavaciones con sostenimiento-galerías de explotación

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el análisis de las excavaciones correspondientes a las galerías de explotación, se observa que los desplazamientos totales oscilan entre 3.1 mm y 5.6 mm, siendo así esta una condición de bajas deformaciones, ya que, las galerías son temporales y son excavaciones cuya vida útil está limitada a corto –mediano plazo.

➤ **Modelo # 4: Excavación con sostenimiento en arco de acero-Inclinado principal**

Teniendo en cuenta que la labor subterránea de explotación que tiene una vida útil más larga, corresponde al inclinado principal, siendo así esta excavación la que durará en funcionamiento hasta el final del proyecto minero; se hace necesario proponer un sistema de sostenimiento que permita disminuir las deformaciones que se generan aún con la colocación del sostenimiento y sección convencional en madera. La alternativa de sostenimiento que se propone, consiste en sección circular y arcos de acero tipo TH con juntas deslizantes, los cuales garantizan una mejor distribución de esfuerzos y una reducción significativa de los desplazamientos; además, son de fácil adquisición en cuanto a la disponibilidad comercial, cabe denotar, que la alternativa de implementar arco en acero es razonable, ya que, según datos suministrados por el operador del proyecto, las explotaciones (vida útil productiva del proyecto minero), están proyectadas a 30 años.

A continuación, se presentan los resultados del modelo de excavación con arco en acero y sección circular.

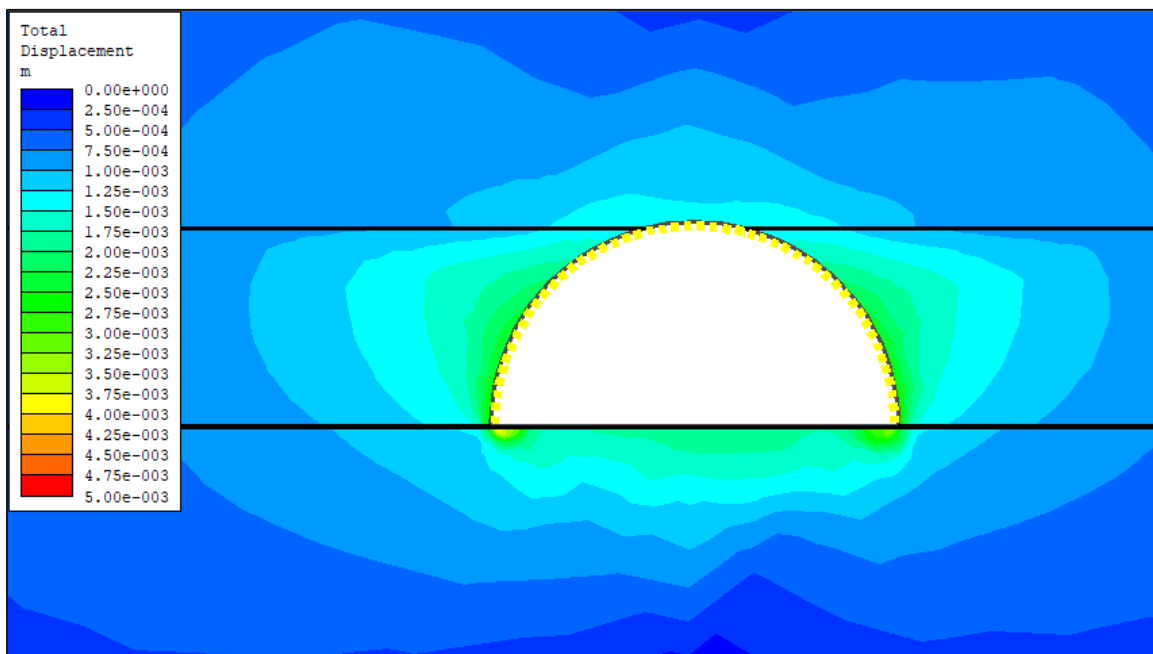


Figura 68. Modelo de excavación propuesto con sección circular y arcos en acero-inclinado principal

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados del análisis de la excavación con sección circular y arcos de acero como sostenimiento, se puede deducir que, se esperarían desplazamientos con valores entre 1.75 mm y 2.25 mm, para las partes laterales de la excavación y para las partes inferior y superior de la excavación, respectivamente.

CONCLUSIONES

- El área de estudio se encuentra influenciada tectónicamente por fallamientos principales como la falla de Gámeza, la cual es de tipo inversa con una dirección SW-NE y con una inclinación al SE, generando fallas de rumbo. Este comportamiento se puede evidenciar en las fallas de dirección presentes en las labores de explotación dentro del área de estudio.
- Debido a la cercanía del área de estudio con fallamientos principales y la evolución tectónica de intenso fracturamiento; se desarrolla una alta densidad de fracturas que se puede identificar en datos de espaciamiento de discontinuidades con resultados de J_v entre 10 y 15 lo cual se refleja en datos de $GSI < 50$ y cuñas menores a $1m^3$.
- La exploración geotécnica realizada en el sector de estudio fue enfocada principalmente al levantamiento de diaclasas en diversos puntos del macizo rocoso, así como la recolección y ensayo de muestras provenientes de los afloramientos de carbón, techos y pisos inmediatos de los mantos de carbón aflorantes en superficie y dentro de las labores subterráneas de explotación dentro del área de estudio.
- Inicialmente se presentaron complicaciones al momento de la obtención de los núcleos, debido a varios factores como: la poca experticia para perforar materiales arcillosos en seco, la geometría muchas veces irregular de los bloques, el alto fracturamiento que presentan los materiales de estudio (carbón y arcillolitas de piso y techo), la no disposición de un lugar idóneo para perforar, transporte de muestras y la degradación de las rocas arcillosas debido al cambio acelerado de sus propiedades de consistencia por diferencia de condiciones de humedad.
- La caracterización del material rocoso permitió establecer que en el sector de estudio afloran formaciones rocosas compuestas por inter-estratificación de materiales, que a pesar de la heterogeneidad del medio presentan poca variación de la resistencia y rigidez del material rocoso a lo largo de sector. Sin embargo, la Formación Guaduas presenta predominios de ciertos materiales. Es importante mencionar, que los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial permitieron establecer predominio de rocas con

resistencia blanda y rigidez baja asociadas a materiales rocosos de composición arcillo-limosa y carbón.

- A partir del análisis estadístico de los datos obtenidos con Martillo Schmidt, se puede inferir que los valores presentan un valor promedio de 14.59 MPa, 19.47 MPa y 18.10 MPa, para el carbón, arcillolitas de piso y arcillolitas de techo, respectivamente.
- De acuerdo a los valores promedio obtenidos a partir de los ensayos de resistencia la compresión uniaxial del carbón para los materiales geológicos analizados en el estudio (carbón y arcillolitas de piso y techo), se puede concluir que el carbón clasifica según la ISMR (1980) como roca blanda, según The Geological Society of London (1979) como roca moderadamente blanda, según Bieniawski (1973) como roca de resistencia muy baja; mientras que los materiales arcillosos de piso y techo clasifican según la ISMR (1980) como roca blanda, según The Geological Society of London (1979) como roca moderadamente dura y según Bieniawski (1973) como roca de resistencia muy baja (según la clasificación; citada por González (2002)).
- A partir de los datos obtenidos en laboratorio correspondientes a las constantes elásticas del carbón, fue posible clasificar dicho material como una roca de modulo relativo medio-alto, según la clasificación propuesta por Deere y Miller.
- En cuanto a los ensayos y resultados de resistencia a la compresión triaxial llevados a cabo sobre probetas de carbón, es posible inferir que, al aplicar un esfuerzo de cámara de 2 MPa, se tuvo un incremento significativo en el esfuerzo axial de rotura en aproximadamente 2.45 veces teniendo en cuenta los valores medios de resistencia a la compresión uniaxial y compresión triaxial en carbón, pasando de 6.14 MPa a 15.04 MPa.
- A partir de las pruebas de expansión libre y controlada realizadas sobre materiales arcillosos de piso y techo, se puede deducir que las muestras ensayadas correspondientes a la pulverización y posterior compactación, muestran valores de expansión significativamente mayores que las muestras ensayadas correspondientes a material inalterado, determinándose así, que las muestras ensayadas (pulverización

–compactación) se clasifican como materiales con un potencial de expansión medio-alto, mientras que las muestras ensayadas (inalteradas) se clasifican como materiales con un potencial de expansión bajo-medio (Gonzalez, 2002). El comportamiento diferencial del potencial de expansión anteriormente descrito, obedece en gran medida a que, en las muestras pulverizadas y luego compactadas, hay mayor superficie específica del material arcilloso (láminas de arcilla) en contacto con el agua.

- A partir de los resultados y análisis de laboratorio de las pruebas de resistencia realizadas sobre los distintos materiales geológicos (carbón y arcillolitas de piso y techo), se propusieron las correlaciones entre las diferentes pruebas de resistencia realizadas (compresión uniaxial vs carga puntual), lo anterior debido a que, los dos, son parámetros muy usados al momento de realizar clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos y diseñar sostenimientos, pilas, cámaras y pilares, entre otros.
- Para las correlaciones de resistencia a la compresión uniaxial vs índice de carga puntual, y de acuerdo a las Figuras 50, 51 y 52, las tres nubes de puntos están concentradas, de manera que la dispersión de los datos es muy baja, por tanto, se puede predecir que la confiabilidad en los datos es aceptable debido a que, los porcentajes de variación de la variable (R^2), son cercanos a la unidad (100%).
- Para el análisis petrográfico del carbón y a partir de los resultados de composición maceral obtenidos por la técnica de microscopía (Point Count), en 1000 puntos de lectura, se puede deducir que el carbón del sector de estudio corresponde a carbón inmaduro y cuyos contenidos mineralógicos influyen significativamente en la baja resistencia del carbón, ya que, la abundante matriz dispersa corresponde a materia mineral arcillosa.
- A partir de los análisis de cuñas o bloques de roca para las secciones de excavación de las labores subterráneas actuales dentro del proyectos minero La Pared, se puede concluir que la intercepción de familias de las discontinuidades existentes en el macizo rocoso dentro de las secciones analizadas, genera cuñas inestables de roca tanto en las secciones laterales de los túneles como en los techos de los mismos. De acuerdo

al levantamiento de datos estructurales y de discontinuidades tales como espaciamiento, persistencia y continuidad, se puede deducir también, que las cuñas generadas no superan los 0,35 m³.

- De acuerdo a los análisis de esfuerzos y desplazamientos para varias secciones dentro de las labores de explotación actuales con sostenimiento en madera, se infiere que los desplazamientos totales esperados están entre 18 mm y 76 mm, para las partes laterales de la excavación; y desplazamientos con valores entre 16 mm y 56 mm para las partes inferior y superior de la excavación (piso y techo). Razón por la cual se planteó una alternativa de sostenimiento que mitigue las deformaciones, dicha alternativa consiste en arcos de acero tipo TH, y luego del análisis con sección circular y sostenimiento planteado, se esperarían desplazamientos entre 1.75 mm y 2,25 mm, permitiendo desarrollar la explotación a profundidades considerables donde el sostenimiento en madera no lo permite; reduciendo así costos y tiempos de explotación, ya que, las labores de mantenimiento, reemplazo de puertas rotas en madera y recuperación de la sección, acarrearán un alto costo y generan suspensiones parciales de la explotación.
- El estudio del comportamiento mecánico y deformacional del macizo rocoso es complejo debido a la gran variedad de características y propiedades que este presenta y al elevado número de factores que lo condicionan. Además, tanto a escala de matriz rocosa intacta como de macizo rocoso fracturado el comportamiento es heterogéneo, discontinuo, anisotrópico, no elástico ni tampoco lineal.

Bibliografía

- Reyes Chitaro, Italo. Geología de la región de Duitama- Sogamoso- Paz de Rio (Departamento de Boyacá), Belencito, 1984. Biblioteca UPTC.
- ECOCARBÓN. Normas generales sobre muestreo y análisis de carbones. EMPRESA COLOMBIANA DE CARBÓN LTDA. 1995.
- Gutiérrez, R. (2015). Módulo 1 – Antecedentes y aspectos generales. En Cursos de maestría, Ingeniería de rocas. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá. Recuperado de material de clase agosto de 2015.
- D. Mendivil, Degradación de rocas arcillosas en ambientes mineros subterráneos de carbón, caso de estudio: Mina del centro nacional minero SENA., Sogamoso: UPTC, 2019.
- Miller, R.P., 1965. Engineering classification and index properties for intact rock. Tech. Rep. No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Lab, Kirtland Air Force Base, Albuquerque, NM.
- Rusnak J.A. and Mark C. (2000). Using the Point Load Test to Determine the Uniaxial Compressive Strength of Coal Measure Rock. Proceedings. International Conference on Ground Control in Mining 19, pages 362-371.
- Hoek, E. y Brown, E.T. 1980. Excavaciones Subterráneas en Roca. McGraw-Hill. México
- Torres-Suarez, M. C. (2011). Efectos de los ciclos de carga-descarga y humedecimiento-secado en el comportamiento geomecánico de rocas lodosas de los Andes colombianos, 493.
- Beckhoff, B., Kanngießner, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff, H. (2007). Handbook of practical X-ray fluorescence analysis. Springer Science & Business Media.

- R. Ramírez Carlos H, Sierra G Miguel A. Diagnóstico de la accidentalidad en la pequeña y mediana minería subterránea de la provincia de Sugamuxi. UPTC Facultad seccional Sogamoso.2016.
- ASTM D5873-14. Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method.
- ASTM D5873-05. Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method.
- ASTM D934-13. Standard Practices for Identification of Crystalline Compounds in Water-Formed Deposits By X-Ray Diffraction
- ASTM D5731-95. Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock.
- ASTM D2938. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens.
- ASTM D3967-95a. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens.
- ASTM D2664-04. Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens Without Pore Pressure Measurements.
- ASTM D3148-02. Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression.
- INV. E 173-07. Método para medir el potencial de asentamiento o expansión unidimensional de suelos cohesivos. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS-INVIAS.

- Ko, H.-Y., Gerstle, K. H.: Elastic Properties of Two Coals. Int. Jnl. Rock Mech. Min. Sci.13 81 (1976).

- Biron Cemal. Ergin Arioglo. Diseño de Ademes en minas. Ed Limusa (1987).

- Vlachopoulos, N. and M.S. Diederichs, 2009. Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. Rock Mech. Rock Eng.

- GOODMAN, Richard.1980. Introduction to Rock Mechanics, editorial John Wiley & Sons, New York,

- JUMIKIS, Alfreds,R.1983. Rock Mechanicks.Second edition.Trans Tech publications.

- HUDSON,John,A.1997. Engineering Rock mechanics. An introduction to te principles.Pergamon.

- FARMER, Ian.1982. Enginnering Behaviuor of rocks. Chapman and Hall.

- FARMER,Ian.W. Enginnering Propierties of Rocks. SPon ltd.1968.

- STAG,K.G y Zienkieewicz,O.C.1968.Rock Mechanics in Enginnering Practice. Jhon Wiley & Sons. - BIENIAWSKI, Z. T.1989. Engineering rock mass clasificacions, editorial John Wiley & Sons, New York, .

- HOEK, Evert. 2007. Practical Rock Engineering, www.rocscience.com,

- GOODMAN, R.R. y Shi, G.H. 1985. Block Theory and its Applications to Rock Engineering Practice.USA

- HOEK, E, Kaiser, P.K y Bawsen, W.F. 1995. Support of Underground Excavations in Hard Rock.

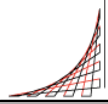
- MATHAB, M.A. y Grasso, P. 1992. Geomechanics Principles in the Design of the Tunnels and Caverns in Rock. Developments in Geotechnical Engineering. 72. Elsevier. New York

- GONZALEZ DE VALLEJO, L. 2002. Ingeniería Geológica. Prentice Hall.
- HOEK, E y BRAY, J.W 1992. 3ª edición. Rock Slope Engineering.

- KRAMER, S. Geotechnical earthquake engineering. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1996.

- PARISEAU, W. 2007. Design Analysis in Rock Mechanics. Taylor & Francis

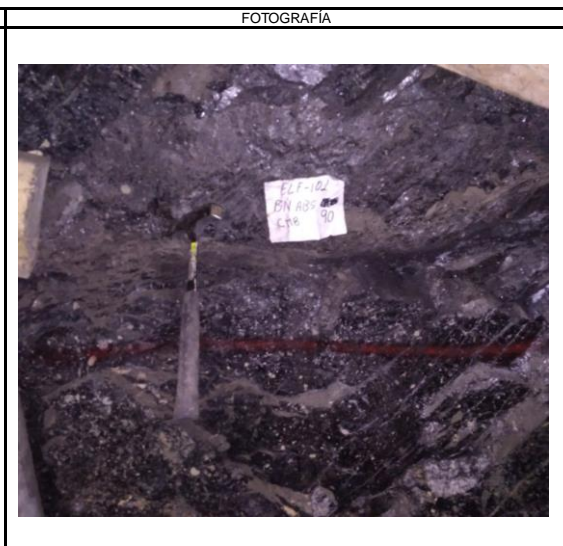
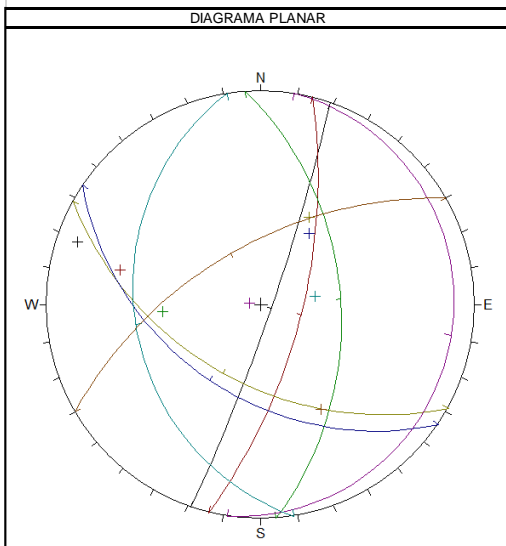
Anexo 1. ESTACIONES DE CAMPO



ESTACIÓN	G1	LOCALIZACIÓN	VEREDA MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ		
TIPO DE FORMACIÓN	SEDIMENTARIA	RUMBO / BUZAMIENTO ESTRUCTURA	N20°E / 85°SE	D/D DIR	85/110
GRADO DE METEORIZACIÓN	III - Medianamente meteorizada		H. METEORIZACIÓN		
FRACTURAMIENTO JUNTAS/m³	10 - 30 - Bloques pequeños		GSI	38 ≤ GSI ≤ 41	
PRESENCIA DE AGUA	Húmedo				

FAMILIA	ORIENTACION		ESPACIADO mm	CONTIN (1m)	APERTURA en mm	RUGOSIDAD	RELLENO	Resist. M Schmidt (Mpa)	OBSERVACIONES
	RMB/BUZ	D/D DIR							
J1	N20E/85SE	85/110	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.50-2.50 (abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Pirita	10	Carbón moderadamente alterado debido a la presencia de agua y diaclasas rellenas de Pirita.
J2	N55W/45SW	45/215	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.50-2.50 (abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Pirita	11	Carbón moderadamente alterado debido a la presencia de agua y diaclasas rellenas de Pirita.
J3	N3W/50NE	50/87	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.50-2.50 (abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Pirita	11	Carbón moderadamente alterado debido a la presencia de agua y diaclasas rellenas de Pirita.
J4	N15E/70SE	70/105	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Pirita	12	Carbón moderadamente alterado debido a la presencia de agua, diaclasas rellenas de Pirita, ocasionalmente de oxidados.
J5	N60W/50SW	50/210	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VII (Plana-Rugosa)	Pirita	10	Carbón moderadamente alterado debido a la presencia de agua, diaclasas rellenas de Pirita, ocasionalmente de oxidados.
J6	N15E/8SE	8/105	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VII (Plana-Rugosa)	Pirita	11	Carbón moderadamente alterado debido a la presencia de agua, diaclasas rellenas de Pirita, ocasionalmente de oxidados.
J7	N60E/60NW	60/330	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VII (Plana-Rugosa)	Calcita	12	Carbón moderadamente alterado debido a la presencia de agua, diaclasas rellenas de Pirita, ocasionalmente de oxidados.
J8	N10W/30SW	30/260	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.50-2.50 (abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Calcita	11	Carbón moderadamente alterado debido a la presencia de agua en el sector, ocasionalmente de oxidados.

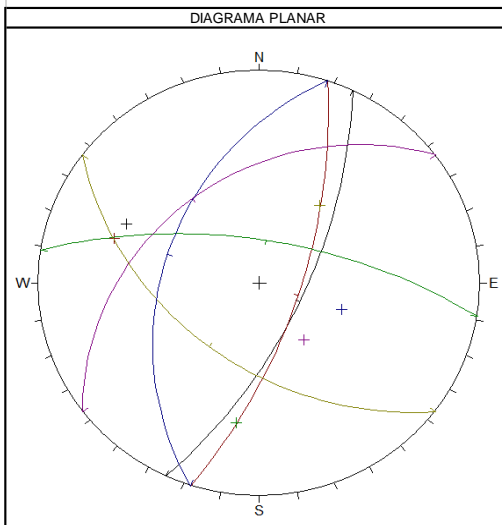
Descripción: Formación Guaduas, afloramiento de Carbón moderadamente alterado de resistencia baja a media, frecuentes impregnaciones de Pirita tamaño arena muy fina, presencia ocasional de oxidados como resultado de la oxidación de sulfuros.

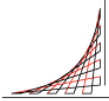


ESTACIÓN	G2	LOCALIZACIÓN	VEREDA MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ		
TIPO DE FORMACIÓN	SEDIMENTARIA	RUMBO / BUZAMIENTO ESTRUCTURA	N19°E / 75°SE	D/D DIR	75/109
GRADO DE METEORIZACIÓN	II - Algo meteorizada		H. METEORIZACIÓN		
FRACTURAMIENTO JUNTAS/m³	10 - 30 - Bloques pequeños		GSI	44 ≤ GSI ≤ 48	
PRESENCIA DE AGUA	Seco-con señales de agua				

FAMILIA	ORIENTACION		ESPACIADO mm	CONTIN (1m)	APERTURA en mm	RUGOSIDAD	RELLENO	Resist. M Schmidt (Mpa)	OBSERVACIONES
	RMB/BUZ	D/D DIR							
J1	N25E/68SE	68/115	60-200 (juntas)	3-10 (media)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	14	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
J2	N52W/50SW	50/218	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	13	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
J3	N53E/38NW	38/323	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
J4	N20E/45NW	45/290	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	14	Arcillolita ligeramente alterada debido a la influencia de agua.
J5	N80W/68SW	68/10	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VII (Plana-Rugosa)	Sin relleno	13	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
J6	N19E/70SE	70/109	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	15	Arcillolita ligeramente alterada debido a la influencia de agua.

Descripción: Formación Guaduas, afloramiento de Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua; presencia de Piritita tamaño limo y ocasionalmente oxidos producto de degradación de sulfuros.



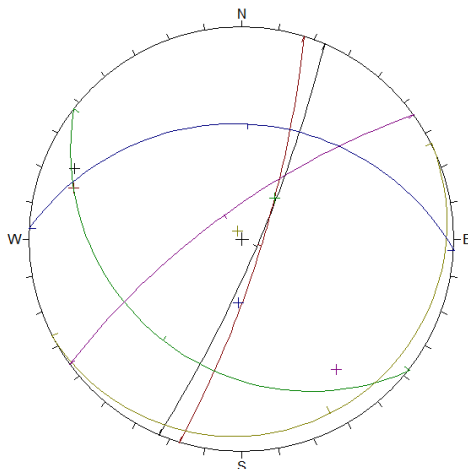


ESTACIÓN		G3		LOCALIZACIÓN		VEREDA MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ				
TIPO DE FORMACIÓN	SEDIMENTARIA		RUMBO / BUZAMIENTO ESTRUCTURA			N19°E / 75°SE		D/D DIR	75/109	
GRADO DE METEORIZACIÓN	II - Algo meteorizada					H. METEORIZACIÓN				
FRACTURAMIENTO JUNTAS/m³	10 - 30 - Bloques pequeños					GSI		41 ≤ GSI ≤ 45		
PRESENCIA DE AGUA	Seco-con señales de agua									
FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES	FAMILIA	ORIENTACION		ESPACIADO mm	CONTIN (1m)	APERTURA en mm	RUGOSIDAD	RELLENO	Resist. M Schmidt (Mpa)	OBSERVACIONES
	J1	N18E/80SE	80/108	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	15	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J2	N55E/5SE	5/145	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	15	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J3	N55E/75NW	75/325	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	14	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J4	N85W/35SE	35/5	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	16	Arcilloлита ligeramente alterada debido a la influencia de agua.
	J5	N23E/82SE	82/113	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	14	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J6	N50W/30SW	30/220	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.

Descripción:

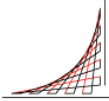
Formación Guaduas, afloramiento de Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua; presencia de Pirita tamaño limo y ocasionalmente oxidos producto de degradación de sulfuros.

DIAGRAMA PLANAR



FOTOGRAFÍA





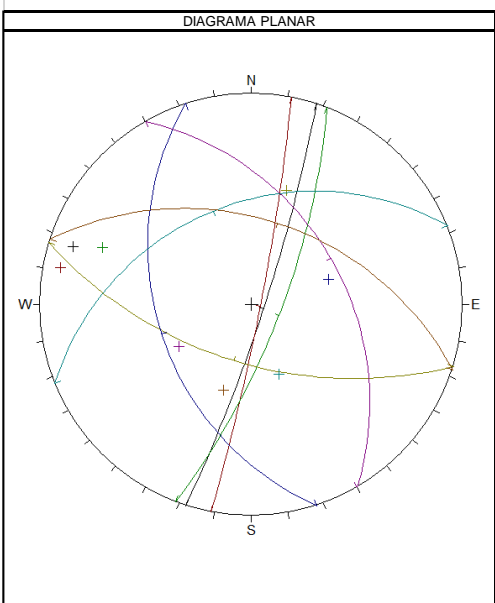
ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

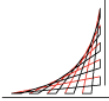
TRABAJO DE GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO- DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

ESTACIÓN	G4	LOCALIZACIÓN	VEREDA MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ		
TIPO DE FORMACIÓN	SEDIMENTARIA	RUMBO / BUZAMIENTO ESTRUCTURA	N19°E / 75°SE	D/D DIR	75/109
GRADO DE METEORIZACIÓN	II - Algo meteorizada		H. METEORIZACIÓN		
FRACTURAMIENTO JUNTAS/m³	10 - 30 - Bloques pequeños		GSI	37 ≤ GSI ≤ 42	
PRESENCIA DE AGUA	Seco-con señales de agua				

FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES	FAMILIA	ORIENTACIÓN		ESPACIADO mm	CONTIN (1m)	APERTURA en mm	RUGOSIDAD	RELLENO	Resist. M Schmidt (Mpa)	OBSERVACIONES
		RMB/BUZ	D/D DIR							
	J1	N72W/60SW	60/198	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J2	N22E/75SE	75/112	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	13	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J3	N19W/43SW	43/251	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J4	N18E/84SE	84/108	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	10	Arcillolita ligeramente alterada debido a la influencia de agua.
	J5	N12E/85SE	85/102	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J6	N70W/48NE	48/20	60-200 (juntas)	3-10 (media)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J7	N30W/45SW	45/60	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	14	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J8	N70E/40NW	40/340	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.

Decripción: Formación Guaduas, afloramiento de Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua; presencia de Pirita tamaño limo y ocasionalmente oxidos producto de degradación de sulfuros.





ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

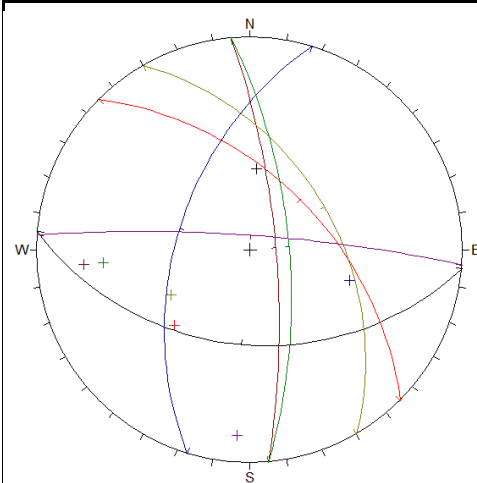
TRABAJO DE GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO- DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

ESTACIÓN		G5		LOCALIZACIÓN		VEREDA MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ				
TIPO DE FORMACIÓN	SEDIMENTARIA			RUMBO / BUZAMIENTO ESTRUCTURA		N10°E / 77°SE		D/D DIR	77/100	
GRADO DE METEORIZACIÓN	II - Algo meteorizada					H. METEORIZACIÓN				
FRACTURAMIENTO JUNTAS/m³	10 - 30 - Bloques pequeños					GSI		48 ≤ GSI ≤ 53		
PRESENCIA DE AGUA	Seco-con señales de agua									
FAMILIAS DISCONTINUIDADES	FAMILIA	ORIENTACION		ESPACIADO mm	CONTIN (1m)	APERTURA en mm	RUGOSIDAD	RELLENO	Resist. M Schmidt (Mpa)	OBSERVACIONES
	J1	N43W/54NE	54/47	60-200 (juntas)	3-10 (media)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	14	Arcilloita ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
	J2	N30W/47NE	47/60	60-200 (juntas)	3-10 (media)	0.50-2.50 (abierta)	V (Ondulada-Lisa)	Sin relleno	15	Arcilloita ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
	J3	N5W/70NE	70/85	60-200 (juntas)	3-10 (media)	0.50-2.50 (abierta)	V (Ondulada-Lisa)	Sin relleno	14	Arcilloita ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
	J4	N4W/77NE	77/86	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	V (Ondulada-Lisa)	Sin relleno	16	Arcilloita ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
	J5	N18E/53NW	53/288	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	14	Arcilloita ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
	J6	N84W/43SW	43/186	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	14	Arcilloita ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
	J7	N85W/83NE	83/5	60-200 (juntas)	3-10 (media)	0.25-0.50 (parc. abierta)	V (Ondulada-Lisa)	Sin relleno	15	Arcilloita ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.

Descripción:

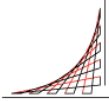
Formación Guaduas, afloramiento de arcilloita ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación constante; presencia de Pirita tamaño arena de grano muy fino y ocasionalmente óxidos producto de degradación de sulfuros.

DIAGRAMA PLANAR



FOTOGRAFÍA





ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

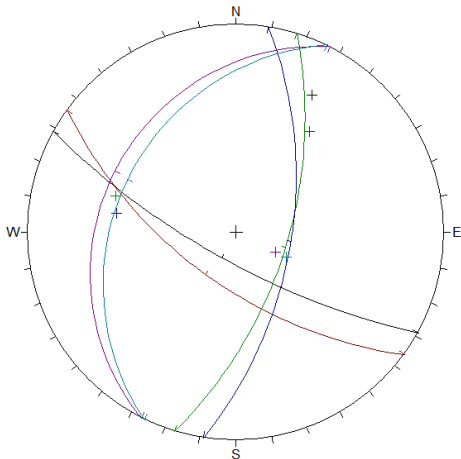
TRABAJO DE GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO- DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

ESTACIÓN		G6		LOCALIZACIÓN		VEREDA MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ					
TIPO DE FORMACIÓN		SEDIMENTARIA		RUMBO / BUZAMIENTO ESTRUCTURA		N10°E / 80°SE		D/D DIR		80/100	
GRADO DE METEORIZACIÓN		III - Medianamente meteorizada				H. METEORIZACIÓN					
FRACTURAMIENTO JUNTAS/m³		10 - 30 - Bloques pequeños				GSI		29 ≤ GSI ≤ 33			
PRESENCIA DE AGUA		Húmedo									
FAMILIAS DISCONTINUIDADES	FAMILIA		ORIENTACION		ESPACIADO	CONTIN	APERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	Resist. M Schmidt	OBSERVACIONES
			RMB/BUZ	D/D DIR	mm	(1m)	en mm			(Mpa)	
	J1		N10E/60SE	60/100	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a irrupciones de agua.
	J2		N60W/75SW	75/210	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a irrupciones de agua.
	J3		N30E/30NW	30/300	60-200 (juntas)	3-10 (media)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	10	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a irrupciones de agua.
	J4		N17E/62SE	62/107	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a irrupciones de agua.
	J5		N54W/63SW	63/216	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a irrupciones de agua.
	J6		N30E/25NW	25/300	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a irrupciones de agua.

Descripción:

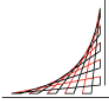
Formación Guaduas, afloramiento de Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado por influencia de agua, presencia ocasional de oxidos como resultado de la degradación de sulfuros diseminados.

DIAGRAMA PLANAR



FOTOGRAFÍA





ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

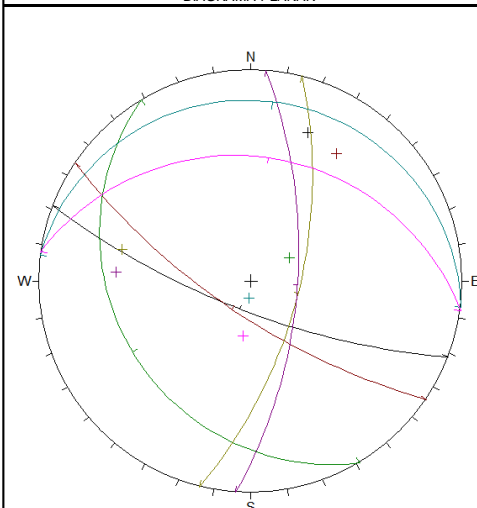
TRABAJO DE GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO- DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

ESTACIÓN	G7		LOCALIZACIÓN		VEREDA MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ					
TIPO DE FORMACIÓN	SEDIMENTARIA		RUMBO / BUZAMIENTO ESTRUCTURA		N10°E / 80°SE		D/D DIR	80/100		
GRADO DE METEORIZACIÓN	III - Medianamente meteorizada				H. METEORIZACIÓN					
FRACTURAMIENTO JUNTAS/m³	10 - 30 - Bloques pequeños				GSI		33≤GSI≤37			
PRESENCIA DE AGUA	Goteos									
FAMILIAS DISCONTINUIDADES	FAMILIA	ORIENTACIÓN		ESPACIADO	CONTIN	APERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	Resist. M Schmidt (Mpa)	OBSERVACIONES
		RMB/BUZ	D/D DIR	mm	(1m)	en mm				
	J1	N68W/74SW	74/202	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	10	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a las irrupciones de agua.
	J2	N15E/65SE	65/105	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	10	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a las irrupciones de agua.
	J3	N20E/10NW	10/10°	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a las irrupciones de agua.
	J4	N30W/25SW	25/240	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a las irrupciones de agua.
	J5	N55W/73SW	73/215	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.25-0.50 (parc. abierta)	I (Escalonada-Rugosa)	Arcilla	10	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a las irrupciones de agua.
	J6	N80W/30NE	30/10°	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.50-2.50 (abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Arcilla	10	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a las irrupciones de agua.
J7	N5E/65SE	65/95	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	10	Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado debido a las irrupciones de agua.	

Descripción:

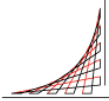
Formación Guaduas, afloramiento de Carbón de resistencia baja a media, moderadamente alterado por influencia de agua, presencia ocasional de óxidos como resultado de la degradación de sulfuros diseminados.

DIAGRAMA PLANAR



FOTOGRAFÍA





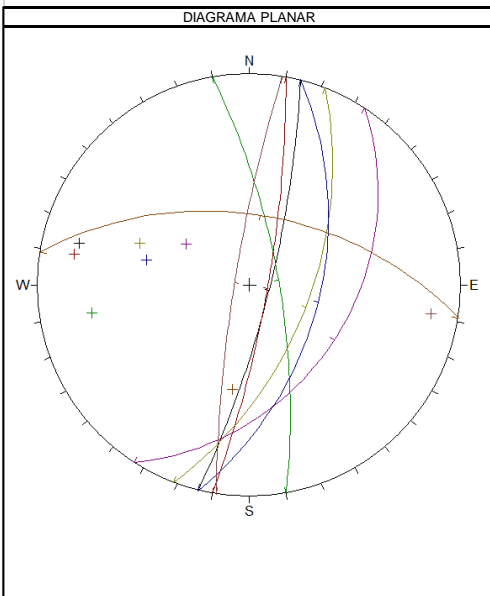
ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

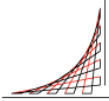
TRABAJO DE GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO- DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

ESTACIÓN	G8	LOCALIZACIÓN	VEREDA MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ		
TIPO DE FORMACIÓN	SEDIMENTARIA	RUMBO / BUZAMIENTO ESTRUCTURA	N10°E / 80°SE	D/D DIR	80/100
GRADO DE METEORIZACIÓN	II - Algo meteorizada		H. METEORIZACIÓN		
FRACTURAMIENTO JUNTAS/m³	10 - 30 - Bloques pequeños		GSI	31 ≤ GSI ≤ 35	
PRESENCIA DE AGUA	Seco-con señales de agua				

FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES	FAMILIA	ORIENTACION		ESPACIADO mm	CONTIN (1m)	APERTURA en mm	RUGOSIDAD	RELLENO	Resist. M Schmidt (Mpa)	OBSERVACIONES
		RMB/BUZ	D/D DIR							
	J1	N10E/83NW	83/280	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J2	N20E/58SE	58/110	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J3	N80W/55NE	55/10	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J4	N15E/55SE	55/105	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.50-2.50 (abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J5	N15E/80SE	80/105	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J6	N10E/80SE	80/100	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	10	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J7	N33E/40SE	40/123	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	10	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J8	N10W/75NE	75/80	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.

Descripción: Formación Guaduas, afloramiento de Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua; frecuentes impregnaciones de Pirita tamaño limo, presencia ocasional de óxidos.



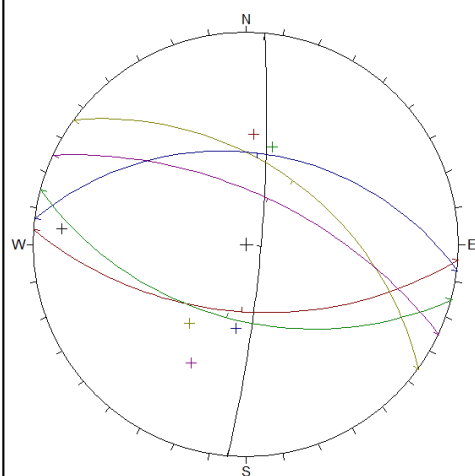


ESTACIÓN		G9		LOCALIZACIÓN		VEREDA MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ				
TIPO DE FORMACIÓN	SEDIMENTARIA		RUMBO / BUZAMIENTO ESTRUCTURA		N10°E / 77°SE		D/D DIR	77/100		
GRADO DE METEORIZACIÓN	II - Algo meteorizada				H. METEORIZACIÓN					
FRACTURAMIENTO JUNTAS/m³	10 - 30 - Bloques pequeños				GSI		48 ≤ GSI ≤ 52			
PRESENCIA DE AGUA	Seco-con señales de agua									
D I S C O N T I N U I D A D E S	FAMILIA	ORIENTACION		ESPACIADO	CONTIN	APERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	Resist. M Schmidt	OBSERVACIONES
		RMB/BUZ	D/D DIR	mm	(1m)	en mm			(Mpa)	
	J1	N85W/55SW	55/185	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	20	Arcilloлита ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
	J2	N5E/84SE	84/95	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	V (Ondulada-Lisa)	Sin relleno	18	Arcilloлита ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
	J3	N54W/50NE	50/36	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.50-2.50 (abierta)	V (Ondulada-Lisa)	Sin relleno	15	Arcilloлита ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
	J4	N64W/65NE	65/26	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.50-2.50 (abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	16	Arcilloлита ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
	J5	N73W/52SW	52/197	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.50-2.50 (abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	14	Arcilloлита ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.
J6	N82W/45NE	45/8	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.50-2.50 (abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	16	Arcilloлита ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación permanente.	

Decripción:

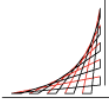
Formación Guaduas, afloramiento de arcilloлита ligeramente alterada debido a la influencia ocasional de agua y ventilación constante; presencia de Pirita tamaño arena de grano muy fino y ocasionalmente oxidos producto de degradación de sulfuros.

DIAGRAMA PLANAR



FOTOGRAFÍA





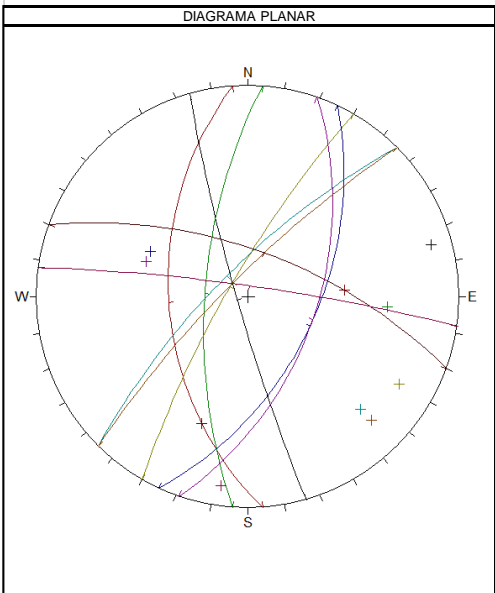
ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

TRABAJO DE GRADO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN
GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO- DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

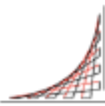
ESTACIÓN	G10	LOCALIZACIÓN	VEREDA MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ		
TIPO DE FORMACIÓN	SEDIMENTARIA	RUMBO / BUZAMIENTO ESTRUCTURA	N8°E / 75°SE	D/D DIR	75/98
GRADO DE METEORIZACIÓN	II - Algo meteorizada		H. METEORIZACIÓN		
FRACTURAMIENTO JUNTAS/m³	10 - 30 - Bloques pequeños		GSI	35 ≤ GSI ≤ 39	
PRESENCIA DE AGUA	Seco-con señales de agua				

FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES	FAMILIA	ORIENTACION		ESPACIADO mm	CONTIN (1m)	APERTURA en mm	RUGOSIDAD	RELLENO	Resist. M Schmidt (Mpa)	OBSERVACIONES
		RMB/BUZ	D/D DIR							
	J1	N30E/80NW	80/300	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.50-2.50 (abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J2	N5W/50SW	50/265	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	12	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J3	N45E/80NW	80/315	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	10	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J4	N15W/85SW	85/255	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	10	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J5	N25E/55SE	55/115	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VII (Plana-Rugosa)	Sin relleno	11	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J6	N45E/75NW	75/315	20-60 (muy juntas)	3-10 (media)	0.1-0.25 (cerrada)	I (Escalonada-Rugosa)	Sin relleno	11	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J7	N70W/65NE	65/20	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J8	N80W/85NE	85/10	60-200 (juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J9	N20E/55SE	55/110	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.1-0.25 (cerrada)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.
	J10	N5E/68NW	68/275	20-60 (muy juntas)	10-20 (alta)	0.25-0.50 (parc. abierta)	VIII (Plana-Lisa)	Sin relleno	11	Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua.

Descripción: Formación Guaduas, afloramiento de Carbón ligeramente alterado debido a la influencia ocasional de agua; frecuentes impregnaciones de Pirita tamaño limo, presencia ocasional de óxidos.

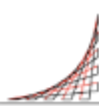


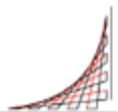
Anexo 2. ENSAYOS DE CAMPO



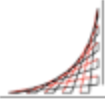
SECTOR	RN (CAMPO)	RL OBTENIDO	σ_c comparativa	LITOLÓGÍA
G1	10	2.3	11.79	CARBÓN
G1	11	3.1	12.41	CARBÓN
G1	12	3.9	13.03	CARBÓN
G1	13	4.7	13.65	CARBÓN
G1	14	5.5	14.28	CARBÓN
G1	15	6.3	14.90	CARBÓN
G1	16	7.1	15.52	CARBÓN
G1	17	7.9	16.14	CARBÓN
G1	18	8.7	16.76	CARBÓN
G1	19	9.5	17.39	CARBÓN
G2	12	3.9	13.03	CARBÓN
G2	12	3.9	13.03	CARBÓN
G2	11	3.1	12.41	CARBÓN
G2	13	4.7	13.65	CARBÓN
G2	14	5.5	14.28	CARBÓN
G2	14	5.5	14.28	CARBÓN
G2	13	4.7	13.65	CARBÓN
G2	15	6.3	14.90	CARBÓN
G2	15	6.3	14.90	CARBÓN
G2	14	5.5	14.28	CARBÓN
G3	15	6.3	14.90	CARBÓN
G3	14	5.5	14.28	CARBÓN
G3	15	6.3	14.90	CARBÓN
G3	15	6.3	14.90	CARBÓN
G3	15	6.3	14.90	CARBÓN
G3	14	5.5	14.28	CARBÓN
G3	12	3.9	13.03	CARBÓN
G3	15	6.3	14.90	CARBÓN
G3	16	7.1	15.52	CARBÓN
G3	15	6.3	14.90	CARBÓN
G4	16	7.1	15.52	CARBÓN
G4	14	5.5	14.28	CARBÓN
G4	17	7.9	16.14	CARBÓN
G4	18	8.7	16.76	CARBÓN
G4	18	8.7	16.76	CARBÓN
G4	15	6.3	14.90	CARBÓN
G4	14	5.5	14.28	CARBÓN
G4	16	7.1	15.52	CARBÓN
G4	15	6.3	14.90	CARBÓN
G4	14	5.5	14.28	CARBÓN

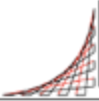
SECTOR	RN (CAMPO)	RL OBTENIDO	σ_c comparativa	LITOLÓGÍA
G5	14	5.5	14.28	CARBÓN
G5	14	5.5	14.28	CARBÓN
G5	13	4.7	13.65	CARBÓN
G5	15	6.3	14.90	CARBÓN
G5	14	5.5	14.28	CARBÓN
G5	16	7.1	15.52	CARBÓN
G5	14	5.5	14.28	CARBÓN
G5	15	6.3	14.90	CARBÓN
G5	13	4.7	13.65	CARBÓN
G5	12	3.9	13.03	CARBÓN
G6	12	3.9	13.03	CARBÓN
G6	11	3.1	12.41	CARBÓN
G6	11	3.1	12.41	CARBÓN
G6	12	3.9	13.03	CARBÓN
G6	13	4.7	13.65	CARBÓN
G6	12	3.9	13.03	CARBÓN
G6	12	3.9	13.03	CARBÓN
G6	11	3.1	12.41	CARBÓN
G6	13	4.7	13.65	CARBÓN
G6	13	4.7	13.65	CARBÓN
G7	11	3.1	12.41	CARBÓN
G7	14	5.5	14.28	CARBÓN
G7	15	6.3	14.90	CARBÓN
G7	14	5.5	14.28	CARBÓN
G7	15	6.3	14.90	CARBÓN
G7	15	6.3	14.90	CARBÓN
G7	16	7.1	15.52	CARBÓN
G7	16	7.1	15.52	CARBÓN
G7	15	6.3	14.90	CARBÓN
G7	14	5.5	14.28	CARBÓN
G8	15	6.3	14.90	CARBÓN
G8	14	5.5	14.28	CARBÓN
G8	16	7.1	15.52	CARBÓN
G8	16	7.1	15.52	CARBÓN
G8	16	7.1	15.52	CARBÓN
G8	15	6.3	14.90	CARBÓN
G8	16	7.1	15.52	CARBÓN
G8	15	6.3	14.90	CARBÓN
G8	15	6.3	14.90	CARBÓN
G8	15	6.3	14.90	CARBÓN
G8	15	6.3	14.90	CARBÓN

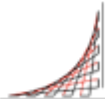
 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO		EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUA S EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ		
		RESISTENCIA COMPARATIVA A LA COMPRESIÓN-MARTILLO SCHMIDT		
SECTOR	RN (CAMPO)	RL OBTENIDO	σ_c comparativa	LITOLÓGÍA
G9	12	3.9	13.03	CARBÓN
G9	11	3.1	12.41	CARBÓN
G9	11	3.1	12.41	CARBÓN
G9	15	6.3	14.90	CARBÓN
G9	14	5.5	14.28	CARBÓN
G9	16	7.1	15.52	CARBÓN
G9	17	7.9	16.14	CARBÓN
G9	15	6.3	14.90	CARBÓN
G9	16	7.1	15.52	CARBÓN
G9	16	7.1	15.52	CARBÓN
G10	16	7.1	15.52	CARBÓN
G10	17	7.9	16.14	CARBÓN
G10	17	7.9	16.14	CARBÓN
G10	19	9.5	17.39	CARBÓN
G10	15	6.3	14.90	CARBÓN
G10	16	7.1	15.52	CARBÓN
G10	18	8.7	16.76	CARBÓN
G10	20	10.3	18.01	CARBÓN
G10	19	9.5	17.39	CARBÓN
G10	18	8.7	16.76	CARBÓN
G11	17	7.9	16.14	CARBÓN
G11	15	6.3	14.90	CARBÓN
G11	15	6.3	14.90	CARBÓN
G11	18	8.7	16.76	CARBÓN
G11	18	8.7	16.76	CARBÓN
G11	19	9.5	17.39	CARBÓN
G11	18	8.7	16.76	CARBÓN
G11	17	7.9	16.14	CARBÓN
G11	16	7.1	15.52	CARBÓN
G11	17	7.9	16.14	CARBÓN
G12	14	5.5	14.28	CARBÓN
G12	12	3.9	13.03	CARBÓN
G12	16	7.1	15.52	CARBÓN
G12	15	6.3	14.90	CARBÓN
G12	14	5.5	14.28	CARBÓN
G12	13	4.7	13.65	CARBÓN
G12	13	4.7	13.65	CARBÓN
G12	13	4.7	13.65	CARBÓN
G12	12	3.9	13.03	CARBÓN
G12	14	5.5	14.28	CARBÓN



SECTOR	RN (CAMPO)	RL OBTENIDO	σ_c comparativa	LITOLÓGÍA
G13	12	3.9	13.03	CARBÓN
G13	13	4.7	13.65	CARBÓN
G13	12	3.9	13.03	CARBÓN
G13	13	4.7	13.65	CARBÓN
G13	14	5.5	14.28	CARBÓN
G13	13	4.7	13.65	CARBÓN
G13	14	5.5	14.28	CARBÓN
G13	14	5.5	14.28	CARBÓN
G13	13	4.7	13.65	CARBÓN
G13	12	3.9	13.03	CARBÓN
G14	11	3.1	12.41	CARBÓN
G14	14	5.5	14.28	CARBÓN
G14	15	6.3	14.90	CARBÓN
G14	18	8.7	16.76	CARBÓN
G14	19	9.5	17.39	CARBÓN
G14	18	8.7	16.76	CARBÓN
G14	17	7.9	16.14	CARBÓN
G14	15	6.3	14.90	CARBÓN
G14	14	5.5	14.28	CARBÓN
G14	12	3.9	13.03	CARBÓN
G15	13	4.7	13.65	CARBÓN
G15	13	4.7	13.65	CARBÓN
G15	12	3.9	13.03	CARBÓN
G15	13	4.7	13.65	CARBÓN
G15	12	3.9	13.03	CARBÓN
G15	13	4.7	13.65	CARBÓN
G15	14	5.5	14.28	CARBÓN
G15	14	5.5	14.28	CARBÓN
G15	13	4.7	13.65	CARBÓN
G15	12	3.9	13.03	CARBÓN

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGOMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ			
	RESISTENCIA COMPARATIVA A LA COMPRESIÓN MARTILLO SCHMIDT			
SECTOR	RN (CAMPO)	RL OBTENIDO	σ_c comparativa	LITOLÓGÍA
G1	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC
G1	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC
G1	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC
G1	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC
G1	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC
G1	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA PISO
G1	16	7.1	17.02	ARCILLOLITA PISO
G1	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA PISO
G1	16	7.1	17.02	ARCILLOLITA PISO
G1	25	14.3	24.15	ARCILLOLITA PISO
G2	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA TECHC
G2	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA TECHC
G2	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA TECHC
G2	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA TECHC
G2	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA TECHC
G2	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO
G2	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G2	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G2	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G2	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA PISO
G3	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC
G3	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA TECHC
G3	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA TECHC
G3	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA TECHC
G3	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA TECHC
G3	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA PISO
G3	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G3	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA PISO
G3	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA PISO
G3	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G4	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC
G4	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC
G4	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC
G4	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA TECHC
G4	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA TECHC
G4	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G4	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA PISO
G4	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G4	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G4	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA PISO

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUA EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ				
	RESISTENCIA COMPARATIVA A LA COMPRESIÓN-MARTILLO SCHMIDT				
G5	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC	
G5	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC	
G5	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA TECHC	
G5	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC	
G5	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC	
G5	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO	
G5	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA PISO	
G5	23	12.7	22.56	ARCILLOLITA PISO	
G5	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO	
G5	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO	
G6	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC	
G6	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC	
G6	15	6.3	16.23	ARCILLOLITA TECHC	
G6	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA TECHC	
G6	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA TECHC	
G6	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA PISO	
G6	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA PISO	
G6	23	12.7	22.56	ARCILLOLITA PISO	
G6	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO	
G6	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO	
G7	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC	
G7	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA TECHC	
G7	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA TECHC	
G7	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA TECHC	
G7	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC	
G7	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA PISO	
G7	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO	
G7	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO	
G7	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO	
G7	23	12.7	22.56	ARCILLOLITA PISO	
G8	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC	
G8	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC	
G8	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC	
G8	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC	
G8	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC	
G8	24	13.5	23.36	ARCILLOLITA PISO	
G8	23	12.7	22.56	ARCILLOLITA PISO	
G8	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO	
G8	23	12.7	22.56	ARCILLOLITA PISO	
G8	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO	

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGOMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ			
	RESISTENCIA COMPARATIVA A LA COMPRESIÓN-MARTILLO SCHMIDT			
SECTOR	RN (CAMPO)	RL OBTENIDO	σ_c comparativa	LITOLÓGÍA
G9	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC
G9	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC
G9	15	6.3	16.23	ARCILLOLITA TECHC
G9	15	6.3	16.23	ARCILLOLITA TECHC
G9	16	7.1	17.02	ARCILLOLITA TECHC
G9	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G9	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA PISO
G9	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G9	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G9	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G9	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G10	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC
G10	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA TECHC
G10	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA TECHC
G10	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA TECHC
G10	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA TECHC
G10	23	12.7	22.56	ARCILLOLITA PISO
G10	24	13.5	23.36	ARCILLOLITA PISO
G10	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO
G10	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO
G10	23	12.7	22.56	ARCILLOLITA PISO
G11	15	6.3	16.23	ARCILLOLITA TECHC
G11	16	7.1	17.02	ARCILLOLITA TECHC
G11	15	6.3	16.23	ARCILLOLITA TECHC
G11	14	5.5	15.44	ARCILLOLITA TECHC
G11	14	5.5	15.44	ARCILLOLITA TECHC
G11	15	6.3	16.23	ARCILLOLITA PISO
G11	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA PISO
G11	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA PISO
G11	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA PISO
G11	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G12	16	7.1	17.02	ARCILLOLITA TECHC
G12	16	7.1	17.02	ARCILLOLITA TECHC
G12	17	7.9	17.82	ARCILLOLITA TECHC
G12	16	7.1	17.02	ARCILLOLITA TECHC
G12	16	7.1	17.02	ARCILLOLITA TECHC
G12	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G12	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G12	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA PISO
G12	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G12	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA PISO

SECTOR	RN (CAMPO)	RL OBTENIDO	σ_c comparativa	LITOLOGÍA
G13	16	7.1	17.02	ARCILLOUTA TECHC
G13	15	6.3	16.23	ARCILLOUTA TECHC
G13	16	7.1	17.02	ARCILLOUTA TECHC
G13	17	7.9	17.82	ARCILLOUTA TECHC
G13	16	7.1	17.02	ARCILLOUTA TECHC
G13	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G13	18	8.7	18.61	ARCILLOLITA PISO
G13	19	9.5	19.40	ARCILLOLITA PISO
G13	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA PISO
G13	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO
G14	18	8.7	18.61	ARCILLOUTA TECHC
G14	18	8.7	18.61	ARCILLOUTA TECHC
G14	18	8.7	18.61	ARCILLOUTA TECHC
G14	17	7.9	17.82	ARCILLOUTA TECHC
G14	18	8.7	18.61	ARCILLOUTA TECHC
G14	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G14	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G14	20	10.3	20.19	ARCILLOLITA PISO
G14	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO
G14	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA PISO
G14	22	11.9	21.77	ARCILLOLITA PISO
G14	21	11.1	20.98	ARCILLOLITA PISO
G15	13	4.7	14.65	ARCILLOUTA TECHC
G15	13	4.7	14.65	ARCILLOUTA TECHC
G15	12	3.9	13.86	ARCILLOUTA TECHC
G15	13	4.7	14.65	ARCILLOUTA TECHC
G15	12	3.9	13.86	ARCILLOUTA TECHC
G15	13	4.7	14.65	ARCILLOLITA PISO
G15	14	5.5	15.44	ARCILLOLITA PISO
G15	14	5.5	15.44	ARCILLOLITA PISO
G15	13	4.7	14.65	ARCILLOLITA PISO
G15	12	3.9	13.86	ARCILLOLITA PISO

Anexo 3. ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL EN ROCA (ASTM D-2938)

Muestra	Litología	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área corregida (m ²)	Volumen (m ³)	Peso (gr)	Peso unitario (KN/m ³)	Carga (kN)	Resist. a la compresión uniaxial σ_c
G1M1CCS	CARBÓN	49,78	123,54	0,001946	0,0002404	286,36	11,91	11,83	6,08
G1M2CCS	CARBÓN	49,87	126,85	0,001953	0,0002478	308,48	12,45	14,26	7,30
G1M3CCS	CARBÓN	50,02	126,85	0,001965	0,0002493	315,32	12,65	12,85	6,54
G1M4CCS	CARBÓN	50,07	113,45	0,001969	0,0002234	287,49	12,87	11,6	5,89
G1M5CCS	CARBÓN	48,99	120,23	0,001885	0,0002266	294,85	13,01	14,5	7,69
G1M6CCS	CARBÓN	49,98	134,12	0,001962	0,0002631	351,28	13,35	13,3	6,78
G1M7CCS	CARBÓN	50,06	128,78	0,001968	0,0002535	317,85	12,54	10,43	5,30
G1M8CCS	CARBÓN	50,11	141,52	0,001972	0,0002791	334,08	11,97	11,62	5,89
G1M9CCS	CARBÓN	48,78	125,41	0,001869	0,0002344	283,59	12,1	10,5	5,62
G1M10CCS	CARBÓN	49,85	134,78	0,001952	0,0002631	320,4	12,18	12,3	6,30
G2M1CCS	CARBÓN	49,63	126,96	0,001935	0,0002456	310,45	12,64	11,55	5,97
G2M2CCS	CARBÓN	49,33	144,10	0,001911	0,0002754	360,78	13,1	10,59	5,54
G2M3CCS	CARBÓN	49,87	129,87	0,001953	0,0002537	334,85	13,2	9,708	4,97
G2M4CCS	CARBÓN	50,21	130,47	0,00198	0,0002583	313,1	12,12	11,98	6,05
G2M5CCS	CARBÓN	50,14	118,96	0,001975	0,0002349	302,3	12,87	12,85	6,51
G2M6CCS	CARBÓN	48,97	120,36	0,001883	0,0002267	286,31	12,63	11,87	6,30
G2M7CCS	CARBÓN	49,63	124,57	0,001935	0,000241	300,03	12,45	10,66	5,51
G2M8CCS	CARBÓN	49,68	130,56	0,001938	0,0002531	330,27	13,05	12,08	6,23
G2M9CCS	CARBÓN	49,87	112,47	0,001953	0,0002197	273,95	12,47	13,63	6,98
G2M10CCS	CARBÓN	49,63	115,96	0,001935	0,0002243	284	12,66	13,12	6,78
G3M1CCS	CARBÓN	49,33	116,54	0,001911	0,0002227	297,13	13,34	12,71	6,65
G3M2CCS	CARBÓN	48,96	113,25	0,001883	0,0002132	279,95	13,13	13,57	7,21
G3M3CCS	CARBÓN	50,02	117,98	0,001965	0,0002318	298,84	12,89	11,73	5,97
G3M4CCS	CARBÓN	50,45	124,33	0,001999	0,0002485	317,63	12,78	14,39	7,20
G3M5CCS	CARBÓN	49,87	11,49	0,001953	2,244E-05	30,186	13,45	12,7	6,50
G3M6CCS	CARBÓN	48,93	124,78	0,00188	0,0002346	280,62	11,96	11,66	6,20
G3M7CCS	CARBÓN	49,66	133,69	0,001937	0,0002589	309,44	11,95	15,05	7,77
G3M8CCS	CARBÓN	49,32	120,14	0,00191	0,0002295	280,7	12,23	13,77	7,21
G3M9CCS	CARBÓN	49,62	116,52	0,001934	0,0002253	287,06	12,74	14,08	7,28
G3M10CCS	CARBÓN	50,11	110,47	0,001972	0,0002179	273,64	12,56	13,27	6,73
G4M1CCS	CARBÓN	50,08	126,62	0,00197	0,0002494	315,01	12,63	9,356	4,75
G4M2CCS	CARBÓN	48,96	133,33	0,001883	0,000251	319,79	12,74	9,658	5,13
G4M3CCS	CARBÓN	49,87	120,58	0,001953	0,0002355	303,36	12,88	12,17	6,23
G4M4CCS	CARBÓN	49,63	107,89	0,001935	0,0002087	273,63	13,11	11,14	5,76
G4M5CCS	CARBÓN	49,55	110,33	0,001928	0,0002128	282,11	13,26	9,603	4,98
G4M6CCS	CARBÓN	49,52	115,66	0,001926	0,0002228	288,7	12,96	11,13	5,78
G4M7CCS	CARBÓN	49,63	118,54	0,001935	0,0002293	295,14	12,87	11,51	5,95
G4M8CCS	CARBÓN	49,87	123,69	0,001953	0,0002416	305,63	12,65	10,35	5,30
G4M9CCS	CARBÓN	49,98	119,87	0,001962	0,0002352	300,32	12,77	9,574	4,88
G4M10CCS	CARBÓN	49,63	124,78	0,001935	0,0002414	288,46	11,95	11,36	5,87
G5M1CCS	CARBÓN	49,21	120,69	0,001902	0,0002295	275,22	11,99	9,434	4,96
G5M2CCS	CARBÓN	50,12	110,44	0,001973	0,0002179	263,65	12,1	10,34	5,24
G5M3CCS	CARBÓN	49,96	109,45	0,00196	0,0002146	262,62	12,24	11,33	5,78
G5M4CCS	CARBÓN	48,78	116,98	0,001869	0,0002186	274,58	12,56	11,57	6,19
G5M5CCS	CARBÓN	50,03	114,78	0,001966	0,0002256	288,37	12,78	12,86	6,54
G5M6CCS	CARBÓN	50,10	104,78	0,001971	0,0002066	250,35	12,12	11,59	5,88
G5M7CCS	CARBÓN	50,07	114,78	0,001969	0,000226	276,63	12,24	12,13	6,16
G5M8CCS	CARBÓN	49,23	106,98	0,001903	0,0002036	255,77	12,56	10,77	5,66
G5M9CCS	CARBÓN	49,66	103,66	0,001937	0,0002008	253,58	12,63	12,78	6,60
G5M10CCS	CARBÓN	50,13	102,58	0,001974	0,0002025	258,75	12,78	12,22	6,19
G6M1CCS	CARBÓN	48,96	106,74	0,001883	0,000201	240,34	11,96	12,95	6,88
G6M2CCS	CARBÓN	50,14	105,99	0,001975	0,0002093	273,11	13,05	12,72	6,44
G6M3CCS	CARBÓN	50,03	117,54	0,001966	0,0002311	303,62	13,14	11,17	5,68
G6M4CCS	CARBÓN	50,02	116,89	0,001965	0,0002297	285,05	12,41	12,69	6,46
G6M5CCS	CARBÓN	50,11	115,55	0,001972	0,0002279	286,22	12,56	12,01	6,09
G6M6CCS	CARBÓN	50,42	104,78	0,001997	0,0002092	258,37	12,35	12,64	6,33
G6M7CCS	CARBÓN	50,36	114,58	0,001992	0,0002282	290,99	12,75	12,09	6,07
G6M8CCS	CARBÓN	50,60	116,96	0,002011	0,0002352	297,52	12,65	13,41	6,67
G6M9CCS	CARBÓN	49,65	130,41	0,001936	0,0002525	316,37	12,53	13,96	7,21
G6M10CCS	CARBÓN	49,32	122,44	0,00191	0,0002339	301,52	12,89	11,04	5,78

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL EN ROCA (ASTM D-2938)

G7M1CCS	CARBÓN	50,12	135,44	0,001973	0,0002672	338,29	12,66	11,03	5,59
G7M2CCS	CARBÓN	49,63	107,88	0,001935	0,0002087	266,9	12,789	12,81	6,62
G7M3CCS	CARBÓN	50,21	120,55	0,00198	0,0002387	297,17	12,45	12,87	6,50
G7M4CCS	CARBÓN	50,24	109,99	0,001982	0,000218	275,39	12,63	12,07	6,09
G7M5CCS	CARBÓN	50,33	114,78	0,001989	0,0002284	286,59	12,55	11,08	5,57
G7M6CCS	CARBÓN	50,07	105,66	0,001969	0,000208	255,89	12,3	10,04	5,10
G7M7CCS	CARBÓN	49,87	109,88	0,001953	0,0002146	267,64	12,47	9,493	4,86
G7M8CCS	CARBÓN	49,66	107,66	0,001937	0,0002085	249,4	11,96	11,37	5,87
G7M9CCS	CARBÓN	49,52	114,78	0,001926	0,0002211	266,38	12,05	11,61	6,03
G7M10CCS	CARBÓN	50,12	115,90	0,001973	0,0002287	276,68	12,1	11,8	5,98
G8M1CCS	CARBÓN	49,78	116,97	0,001946	0,0002277	300,5	13,2	10,35	5,32
G8M2CCS	CARBÓN	50,11	111,63	0,001972	0,0002202	287,3	13,05	8,401	4,26
G8M3CCS	CARBÓN	50,36	105,23	0,001992	0,0002096	273,95	13,07	8,864	4,45
G8M4CCS	CARBÓN	50,23	106,97	0,001982	0,000212	279,38	13,18	9,631	4,86
G8M5CCS	CARBÓN	49,87	114,89	0,001953	0,0002244	283,44	12,63	10,18	5,21
G8M6CCS	CARBÓN	49,36	120,54	0,001914	0,0002307	296,86	12,87	10,33	5,40
G8M7CCS	CARBÓN	50,24	114,78	0,001982	0,0002275	285,79	12,56	10,84	5,47
G8M8CCS	CARBÓN	50,33	116,98	0,001989	0,0002327	300,46	12,91	10,76	5,41
G8M9CCS	CARBÓN	50,02	100,97	0,001965	0,0001984	251,19	12,66	9,629	4,90
G8M10CCS	CARBÓN	50,40	105,69	0,001995	0,0002109	260,41	12,35	10,63	5,33
G9M1CCS	CARBÓN	49,63	111,21	0,001935	0,0002151	268,28	12,47	14,7	7,60
G9M2CCS	CARBÓN	49,51	124,57	0,001925	0,0002398	300,98	12,55	13,07	6,79
G9M3CCS	CARBÓN	48,77	116,98	0,001868	0,0002185	278,62	12,75	11,99	6,42
G9M4CCS	CARBÓN	49,88	118,44	0,001954	0,0002314	288,14	12,45	12,31	6,30
G9M5CCS	CARBÓN	50,22	126,69	0,001981	0,0002509	309,42	12,33	12,95	6,54
G9M6CCS	CARBÓN	50,04	132,41	0,001967	0,0002604	326,54	12,54	14,06	7,15
G9M7CCS	CARBÓN	50,36	125,63	0,001992	0,0002502	307,79	12,3	13,35	6,70
G9M8CCS	CARBÓN	50,23	120,14	0,001982	0,0002381	285,21	11,98	13,95	7,04
G9M9CCS	CARBÓN	50,10	105,66	0,001971	0,0002083	250,99	12,05	13,9	7,05
G9M10CCS	CARBÓN	49,66	109,99	0,001937	0,000213	260,12	12,21	11,23	5,80
G10M1CCS	CARBÓN	49,87	114,78	0,001953	0,0002242	278,01	12,4	12,21	6,25
G10M2CCS	CARBÓN	50,23	123,69	0,001982	0,0002451	302,95	12,36	11,16	5,63
G10M3CCS	CARBÓN	50,21	120,54	0,00198	0,0002387	315,76	13,23	10,49	5,30
G10M4CCS	CARBÓN	50,00	104,78	0,001963	0,0002057	268,48	13,05	11,09	5,65
G10M5CCS	CARBÓN	50,24	119,88	0,001982	0,0002376	311,32	13,1	11,82	5,96
G10M6CCS	CARBÓN	50,12	120,32	0,001973	0,0002374	312,4	13,16	12,63	6,40
G10M7CCS	CARBÓN	50,31	106,99	0,001988	0,0002127	269,69	12,68	11,69	5,88
G10M8CCS	CARBÓN	49,63	111,44	0,001935	0,0002156	268,4	12,45	9,866	5,10
G10M9CCS	CARBÓN	50,22	132,56	0,001981	0,0002626	332,16	12,65	10,8	5,45
G10M10CCS	CARBÓN	49,65	128,74	0,001936	0,0002493	314,81	12,63	12,04	6,22
G11M1CCS	CARBÓN	49,32	133,69	0,00191	0,0002554	321,05	12,57	12,42	6,50
G11M2CCS	CARBÓN	50,32	120,22	0,001989	0,0002391	296,94	12,42	10,36	5,21
G11M3CCS	CARBÓN	50,12	103,66	0,001973	0,0002045	253,6	12,4	11,13	5,64
G11M4CCS	CARBÓN	50,22	109,87	0,001981	0,0002176	272,26	12,51	11,83	5,97
G11M5CCS	CARBÓN	50,20	105,66	0,001979	0,0002091	265,59	12,7	12,05	6,09
G11M6CCS	CARBÓN	50,36	116,98	0,001992	0,000233	294,52	12,64	12,43	6,24
G11M7CCS	CARBÓN	50,04	113,54	0,001967	0,0002233	285,37	12,78	10,05	5,11
G11M8CCS	CARBÓN	49,63	140,01	0,001935	0,0002709	349,4	12,9	11,7	6,05
G11M9CCS	CARBÓN	49,11	120,66	0,001894	0,0002286	290,95	12,73	10,68	5,64
G11M10CCS	CARBÓN	50,65	111,74	0,002015	0,0002251	293,81	13,05	11,99	5,95

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL EN ROCA (ASTM D-2938)

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

LOCALIZACIÓN: SECTOR MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ


G12M1CCS	CARBÓN	50,22	116,99	0,001981	0,0002317	305,89	13,2	14,14	7,14
G12M2CCS	CARBÓN	50,01	110,24	0,001964	0,0002165	278,69	12,87	12,85	6,54
G12M3CCS	CARBÓN	50,44	106,90	0,001998	0,0002136	275,55	12,9	11,77	5,89
G12M4CCS	CARBÓN	50,00	115,67	0,001963	0,0002271	287,53	12,66	11,35	5,78
G12M5CCS	CARBÓN	49,65	119,87	0,001936	0,0002321	289,4	12,47	12,84	6,63
G12M6CCS	CARBÓN	49,36	122,50	0,001914	0,0002344	295,59	12,61	12,53	6,55
G12M7CCS	CARBÓN	49,62	130,41	0,001934	0,0002522	311,44	12,35	11,02	5,70
G12M8CCS	CARBÓN	49,21	107,88	0,001902	0,0002052	256,27	12,49	13,24	6,96
G12M9CCS	CARBÓN	50,24	106,99	0,001982	0,0002121	277,21	13,07	13,22	6,67
G12M10CCS	CARBÓN	50,65	118,75	0,002015	0,0002393	315,11	13,17	14,25	7,07
G13M1CCS	CARBÓN	50,33	114,74	0,001989	0,0002283	294,02	12,88	12,04	6,05
G13M2CCS	CARBÓN	49,66	103,69	0,001937	0,0002008	254,86	12,69	12,07	6,23
G13M3CCS	CARBÓN	50,24	110,22	0,001982	0,0002185	272,47	12,47	12,77	6,44
G13M4CCS	CARBÓN	50,06	114,56	0,001968	0,0002255	285,91	12,68	13,74	6,98
G13M5CCS	CARBÓN	50,00	102,62	0,001963	0,0002015	257,31	12,77	11,51	5,86
G13M6CCS	CARBÓN	49,68	13,66	0,001938	2,648E-05	33,628	12,7	13,18	6,80
G13M7CCS	CARBÓN	49,78	110,45	0,001946	0,000215	271,93	12,65	12,09	6,21
G13M8CCS	CARBÓN	50,24	114,57	0,001982	0,0002271	290,72	12,8	13,04	6,58
G13M9CCS	CARBÓN	50,65	123,32	0,002015	0,0002485	316,56	12,74	14,29	7,09
G13M10CCS	CARBÓN	50,21	107,89	0,00198	0,0002136	262,78	12,301	14,34	7,24
G14M1CCS	CARBÓN	49,87	130,20	0,001953	0,0002543	321,71	12,65	13,11	6,71
G14M2CCS	CARBÓN	49,55	120,14	0,001928	0,0002317	289,35	12,49	13,44	6,97
G14M3CCS	CARBÓN	50,36	116,30	0,001992	0,0002317	290,73	12,55	14,18	7,12
G14M4CCS	CARBÓN	50,21	112,31	0,00198	0,0002224	277,75	12,49	12,3	6,21
G14M5CCS	CARBÓN	50,04	104,78	0,001967	0,0002061	260,26	12,63	13,9	7,07
G14M6CCS	CARBÓN	50,44	109,63	0,001998	0,0002191	279,09	12,74	13,23	6,62
G14M7CCS	CARBÓN	49,33	112,45	0,001911	0,0002149	270,58	12,59	13,55	7,09
G14M8CCS	CARBÓN	50,23	113,65	0,001982	0,0002252	287,59	12,77	13,61	6,87
G14M9CCS	CARBÓN	50,65	114,44	0,002015	0,0002306	295,15	12,8	11,85	5,88
G14M10CCS	CARBÓN	50,11	120,42	0,001972	0,0002375	301,37	12,69	14,24	7,22
G15M1CCS	CARBÓN	49,67	119,60	0,001938	0,0002317	289,68	12,5	12,07	6,23
G15M2CCS	CARBÓN	49,65	130,01	0,001936	0,0002517	317,41	12,61	12,6	6,51
G15M3CCS	CARBÓN	50,62	126,66	0,002012	0,0002549	324,75	12,74	13,02	6,47
G15M4CCS	CARBÓN	50,02	123,50	0,001965	0,0002427	307,97	12,69	10,91	5,55
G15M5CCS	CARBÓN	50,21	106,66	0,00198	0,0002112	265,68	12,58	11,66	5,89
G15M6CCS	CARBÓN	50,11	103,98	0,001972	0,0002051	261,25	12,74	13	6,59
G15M7CCS	CARBÓN	49,22	111,44	0,001903	0,000212	273,53	12,9	11,36	5,97
G15M8CCS	CARBÓN	49,78	115,55	0,001946	0,0002249	288,76	12,84	10,53	5,41
G15M9CCS	CARBÓN	50,50	120,41	0,002003	0,0002412	307,02	12,73	11,26	5,62
G15M10CCS	CARBÓN	50,21	107,77	0,00198	0,0002134	270,36	12,67	11,37	5,74

OBS: ENSAYOS REALIZADOS EN CONJUNTO CON EL INGENIERO FRANKIN AMAYA.

REVISÓ Y APROBÓ:



ING. CRISTIAN PARRA.
Director de laboratorio

 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGOMOSO- DEPARTAMENTO DE BOYACÁ									
ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL EN ROCA (ASTM D-2938)									
Muestra	Litología	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área corregida (m²)	Volumen (m³)	Peso (gr)	Peso unitario (KN/m³)	Carga (kN)	Resist. a la compresión uniaxial σ_c (Mpa)
G1M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,63	108,44	0,0018574	0,000201	466,9	23,18	24,37	13,12
G1M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,54	112,87	0,0019275	0,000218	514,3	23,64	33	17,12
G1M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,75	125,47	0,0018665	0,000234	546,8	23,35	30,7	16,45
G1M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,32	114,59	0,0018338	0,00021	504,7	24,02	27,74	15,13
G1M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,64	110,45	0,0018581	0,000205	494,6	24,1	32,33	17,40
G2M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,21	119,87	0,0018254	0,000219	522,3	23,87	25,15	13,78
G2M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,65	125,45	0,0019361	0,000243	575,4	23,69	29,89	15,44
G2M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,77	133,10	0,0018681	0,000249	583,6	23,47	31,55	16,89
G2M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,95	124,78	0,0018819	0,000235	555,6	23,66	32,31	17,17
G2M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,85	125,92	0,0019517	0,000246	576,3	23,45	32,73	16,77
G3M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	47,99	136,98	0,0018088	0,000248	573,6	23,15	29,68	16,41
G3M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,36	124,57	0,0018368	0,000229	539,1	23,56	27,31	14,87
G3M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,52	126,98	0,001926	0,000245	572,5	23,41	31,86	16,54
G3M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,56	129,30	0,001852	0,000239	566,8	23,67	29,65	16,01
G3M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,89	127,89	0,0019549	0,00025	597,3	23,89	33,29	17,03
G4M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,77	133,56	0,0018681	0,00025	588,1	23,57	24,57	13,15
G4M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,12	140,14	0,0018186	0,000255	603,8	23,69	25,68	14,12
G4M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,24	142,01	0,0019043	0,00027	643,6	23,8	25,02	13,14
G4M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,32	138,74	0,0019105	0,000265	636,7	24,02	30,8	16,12
G4M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,21	126,54	0,0018254	0,000231	557,1	24,12	28,75	15,75
G5M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,11	128,79	0,0018942	0,000244	593,3	24,32	32,39	17,10
G5M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,24	133,31	0,0019043	0,000254	597,6	23,54	30,53	16,03
G5M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,54	119,65	0,0018505	0,000221	521,9	23,57	31,42	16,98
G5M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,65	124,78	0,0018589	0,000232	555,8	23,96	26,84	14,44
G5M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,21	125,87	0,0018254	0,00023	532,6	23,18	28,29	15,50
G6M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,32	129,65	0,0018338	0,000238	552,8	23,25	32,04	17,47
G6M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	47,77	131,30	0,0017923	0,000235	567,1	24,1	27,62	15,41
G6M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,45	114,36	0,0018436	0,000211	505,2	23,96	24,21	13,13
G6M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,54	119,86	0,0019275	0,000231	551,5	23,87	29,88	15,50
G6M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,75	124,25	0,0018665	0,000232	546,4	23,56	27,46	14,71
G7M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,12	126,85	0,0018186	0,000231	558,3	24,2	28,08	15,44
G7M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,63	124,98	0,0018574	0,000232	560,1	24,13	32,62	17,56
G7M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,32	130,36	0,0019105	0,000249	594,2	23,86	28,73	15,04
G7M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,54	135,42	0,0018505	0,000251	595,7	23,77	27,7	14,97
G7M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,66	129,63	0,0019369	0,000251	591	23,54	29,5	15,23
G8M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,21	124,78	0,0018254	0,000228	538,2	23,63	31,49	17,25
G8M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,32	126,98	0,0019105	0,000243	579,5	23,89	29,75	15,57
G8M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,50	140,14	0,0019244	0,00027	646,2	23,96	30,98	16,10
G8M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,31	127,45	0,0019097	0,000243	587,5	24,14	31,82	16,66
G8M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,75	135,45	0,0018665	0,000253	613,4	24,26	31,82	17,05
G9M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,54	120,47	0,0019275	0,000232	554,7	23,89	31,23	16,20
G9M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,30	124,65	0,0019089	0,000238	573	24,08	32,78	17,17
G9M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,22	134,52	0,0019027	0,000256	616,8	24,1	25,57	13,44
G9M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,66	136,52	0,0018597	0,000254	614,1	24,19	28,17	15,15
G9M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,15	132,47	0,0018973	0,000251	602,2	23,96	32,73	17,25
G10M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	50,07	129,64	0,001969	0,000255	607,5	23,8	31,76	16,13
G10M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,54	133,74	0,0018505	0,000247	588	23,76	31,7	17,13
G10M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,68	120,41	0,0019384	0,000233	547,3	23,45	33,15	17,10
G10M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	47,54	135,65	0,001775	0,000241	556,7	23,12	28,68	16,16
G10M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,65	140,10	0,0018589	0,00026	611,8	23,49	29,69	15,97
G11M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,54	138,74	0,0019275	0,000267	630,1	23,56	33,85	17,56
G11M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	47,88	132,52	0,0018005	0,000239	565,3	23,69	25,39	14,10
G11M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,30	124,56	0,0019089	0,000238	564,5	23,74	29,02	15,20
G11M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,75	114,87	0,0018665	0,000214	506,9	23,64	32,16	17,23
G11M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,62	118,45	0,0018566	0,00022	516,8	23,5	27,64	14,89
G12M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,22	132,12	0,0018262	0,000241	570,9	23,66	29,44	16,12
G12M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,36	124,78	0,0018368	0,000229	545	23,78	31,39	17,09
G12M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,54	115,96	0,0019275	0,000224	525	23,49	27,64	14,34
G12M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,12	140,21	0,0018186	0,000255	593,9	23,29	27,41	15,07
G12M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,10	110,74	0,0018934	0,00021	491,7	23,45	26,02	13,74

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL EN ROCA (ASTM D-2938)

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

LOCALIZACIÓN: SECTOR MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

Muestra	Litología	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área corregida (m ²)	Volumen (m ³)	Peso (gr)	Peso unitario (KN/m ³)	Carga (kN)	Resist. a la compresión uniaxial σ_c (Mpa)
G13M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,96	121,45	0,0018827	0,000229	540,8	23,65	30,5	16,20
G13M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,25	126,98	0,0018285	0,000232	551,4	23,75	28,3	15,48
G13M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,87	132,45	0,0019533	0,000259	611,3	23,63	27,09	13,87
G13M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,32	118,79	0,0019105	0,000227	534,2	23,54	27,07	14,17
G13M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,25	124,56	0,001905	0,000237	562,1	23,69	28,77	15,10
G14M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,11	130,30	0,0018942	0,000247	586,9	23,78	30,46	16,08
G14M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,51	124,78	0,0018482	0,000231	543,3	23,56	28,39	15,36
G14M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,21	129,99	0,0019019	0,000247	583,7	23,61	30,03	15,79
G14M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,54	113,36	0,0018505	0,00021	491,3	23,42	28,63	15,47
G14M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,77	121,54	0,0018681	0,000227	536,1	23,61	29,46	15,77
G15M1APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,54	126,87	0,0019275	0,000245	576,4	23,57	29,45	15,28
G15M2APCS	ARCILLOLITA TECHO	50,08	127,77	0,0019698	0,000252	603	23,96	25,8	13,10
G15M3APCS	ARCILLOLITA TECHO	49,65	130,65	0,0019361	0,000253	603,8	23,87	29,24	15,10
G15M4APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,54	124,52	0,0018505	0,00023	548,2	23,79	27,39	14,80
G15M5APCS	ARCILLOLITA TECHO	48,96	126,41	0,0018827	0,000238	567,8	23,86	29,88	15,87

OBS: ENSAYOS REALIZADOS EN CONJUNTO CON EL INGENIERO FRANKIN AMAYA.

REVISÓ Y APROBÓ:



ING. CRISTIAN PARRA.

SOGAMOSO CARRERA 14 # 15-80 OFICINA 201

CEL.3133790974 -FIJO.(8)7752275

ingefsas@mail.com

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL EN ROCA (ASTM D-2938)

Muestra	Litología	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área corregida (m ²)	Volumen (m ³)	Peso (gr)	Peso unitario (KN/m ³)	Carga (kN)	Resist. a la compresión uniaxial σ_c (Mpa)
G1M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,21	132,01	0,0018254	0,000241	560	23,24	20,9	11,45
G1M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,63	124,15	0,0018574	0,000231	538,7	23,36	30,55	16,45
G1M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,21	136,12	0,0019019	0,000259	611,8	23,63	24,95	13,12
G1M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,21	105,87	0,0018254	0,000193	454,9	23,54	26,29	14,40
G1M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,54	114,75	0,0018505	0,000212	494,6	23,29	24,32	13,14
G2M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,35	115,96	0,001836	0,000213	492,2	23,12	28,07	15,29
G2M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,63	116,78	0,0018574	0,000217	517,7	23,87	24,39	13,13
G2M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,30	119,65	0,0018322	0,000219	528,3	24,1	27,7	15,12
G2M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,52	121,47	0,001849	0,000225	542,6	24,16	26,75	14,47
G2M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,41	115,78	0,0018406	0,000213	512,9	24,07	29,25	15,89
G3M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,36	136,01	0,0019136	0,00026	618,6	23,77	29,55	15,44
G3M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,25	120,14	0,001905	0,000229	548,8	23,98	25,68	13,48
G3M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,14	118,74	0,0018965	0,000225	536	23,8	30,14	15,89
G3M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,25	115,69	0,0018285	0,000212	500,1	23,64	22,76	12,45
G3M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,98	121,45	0,0018842	0,000229	535,5	23,4	25,53	13,55
G4M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,32	126,54	0,0018338	0,000232	536,3	23,11	22,19	12,10
G4M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,65	107,54	0,0018589	0,0002	469,2	23,47	26,3	14,15
G4M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,21	118,54	0,0018254	0,000216	512	23,66	25,36	13,89
G4M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,54	135,25	0,0018505	0,00025	595,2	23,78	28,52	15,41
G4M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,01	124,57	0,0018865	0,000235	551,3	23,46	27,86	14,77
G5M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,32	116,98	0,0018338	0,000215	499,8	23,3	25,05	13,66
G5M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,11	109,98	0,0018942	0,000208	481,2	23,1	26,71	14,10
G5M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,20	112,54	0,0018247	0,000205	475,6	23,16	29,58	16,21
G5M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,30	115,89	0,0019089	0,000221	514,6	23,26	27,24	14,27
G5M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,11	118,65	0,0018179	0,000216	499,5	23,16	24,34	13,39
G6M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,21	124,54	0,0019019	0,000237	551,4	23,28	28,8	15,14
G6M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	47,98	126,54	0,001808	0,000229	537,4	23,49	30,34	16,78
G6M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,32	113,65	0,0019105	0,000217	511,1	23,54	27,13	14,20
G6M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,62	118,54	0,0019338	0,000229	538,7	23,5	24,31	12,57
G6M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	50,11	121,47	0,0019721	0,00024	565,6	23,61	26,94	13,66
G7M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	50,08	119,65	0,0019698	0,000236	558,6	23,7	26,89	13,65
G7M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,77	107,87	0,0018681	0,000202	472,3	23,44	27,61	14,78
G7M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,58	116,74	0,0019306	0,000225	525,4	23,31	32,32	16,74
G7M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,30	124,58	0,0018322	0,000228	537,6	23,55	29,68	16,20
G7M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,65	121,63	0,0018589	0,000226	533,8	23,61	29,69	15,97
G8M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,21	119,65	0,0018254	0,000218	511,1	23,4	28,11	15,40
G8M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,62	128,20	0,0018566	0,000238	564,1	23,7	28,13	15,15
G8M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,25	119,87	0,0018285	0,000219	521,9	23,81	30,08	16,45
G8M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,60	126,77	0,0019322	0,000245	586,9	23,96	28,5	14,75
G8M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,52	104,98	0,001926	0,000202	482,8	23,88	27,6	14,33
G9M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,12	110,78	0,0018186	0,000201	476,3	23,64	27,46	15,10
G9M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,01	115,74	0,0018865	0,000218	513,1	23,5	30,45	16,14
G9M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,51	125,25	0,0018482	0,000231	546,5	23,61	26,61	14,40
G9M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,20	123,65	0,0019012	0,000235	551,7	23,47	29,72	15,63
G9M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,50	128,94	0,0018475	0,000238	555	23,3	24,89	13,47
G10M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,55	124,57	0,0018513	0,000231	542,9	23,54	22,47	12,14
G10M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,65	126,66	0,0019361	0,000245	580,2	23,66	26,27	13,57
G10M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,71	123,33	0,0018635	0,00023	544,9	23,71	26,18	14,05
G10M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,20	125,85	0,0018247	0,00023	537,3	23,4	26,28	14,40
G10M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,52	127,49	0,001849	0,000236	554	23,5	25,26	13,66
G11M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,12	133,30	0,0018186	0,000242	572,4	23,61	27,55	15,15
G11M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,30	132,56	0,0018322	0,000243	565,9	23,3	31,92	17,42
G11M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,29	128,96	0,0018315	0,000236	552,2	23,38	30,93	16,89
G11M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,63	126,65	0,0018574	0,000235	562	23,89	28,12	15,14
G11M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,24	134,21	0,0018277	0,000245	593,1	24,18	26,63	14,57
G12M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,65	127,45	0,0018589	0,000237	567,7	23,96	32,47	17,47
G12M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,88	121,12	0,0018765	0,000227	540,7	23,79	30,08	16,03
G12M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	47,98	136,32	0,001808	0,000246	580,9	23,57	30,07	16,63
G12M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,56	127,79	0,001852	0,000237	558,5	23,6	30,63	16,54
G12M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,21	123,03	0,0018254	0,000225	532,5	23,71	31,63	17,33

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL EN ROCA (ASTM D-2938)

PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DE LOS MANTOS DE CARBÓN Y MATERIALES DE RESPALDO DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN EL MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

LOCALIZACIÓN: SECTOR MORCÁ-MUNICIPIO DE SOGAMOSO-DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

Muestra	Litología	Diametro (mm)	Altura (mm)	Área corregida (m ²)	Volumen (m ³)	Peso (gr)	Peso unitario (KN/m ³)	Carga (kN)	Resist. a la compresión uniaxial σ_c (Mpa)
G13M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,65	130,41	0,0018589	0,000242	568,2	23,44	23,35	12,56
G13M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	47,79	125,78	0,0017938	0,000226	526,4	23,33	22,37	12,47
G13M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,57	109,96	0,0018528	0,000204	471	23,12	30,53	16,48
G13M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,65	118,79	0,0018589	0,000221	520,2	23,56	28,16	15,15
G13M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,65	124,87	0,0019361	0,000242	579,5	23,97	27,43	14,17
G14M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,10	130,22	0,0018934	0,000247	597,7	24,24	27,63	14,59
G14M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,12	119,97	0,0018186	0,000218	519,3	23,8	29,81	16,39
G14M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,33	136,54	0,0018345	0,00025	592,9	23,67	23,48	12,80
G14M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,24	124,20	0,0018277	0,000227	535,5	23,59	23,85	13,05
G14M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,65	135,25	0,0018589	0,000251	586,6	23,33	28,63	15,40
G15M1ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,25	112,47	0,0018285	0,000206	475,9	23,14	21,89	11,97
G15M2ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,44	116,90	0,0018429	0,000215	503	23,35	23,75	12,89
G15M3ATCS	ARCILLOLITA TECHO	49,47	117,85	0,0019221	0,000227	532,1	23,49	28,58	14,87
G15M4ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,63	105,25	0,0018574	0,000195	462,7	23,67	29,59	15,93
G15M5ATCS	ARCILLOLITA TECHO	48,50	132,31	0,0018475	0,000244	575,6	23,55	27,31	14,78

OBS: ENSAYOS REALIZADOS EN CONJUNTO CON EL INGENIERO FRANKIN AMAYA.

REVISÓ Y APROBÓ:

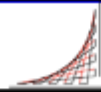


ING. CRISTIAN PARRA.
Director de laboratorio

SOGAMOSO CARRERA 14 # 15-80 OFICINA 201

CEL.3133790974 - FIJO.(8)7752275

ingefsas@mail.com

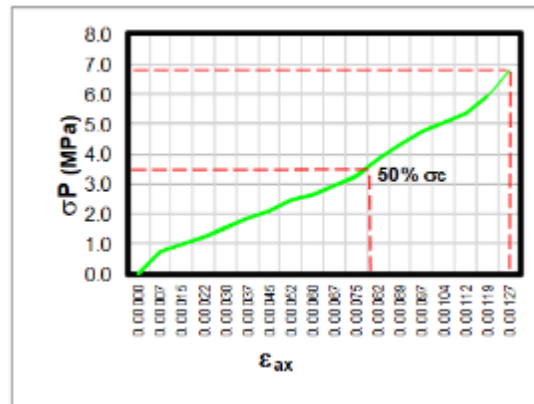


ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION UNIAJIAL EN ROCA CON MEDICION DE DEFORMACIONES

Carga (kN)	σ_p (MPa)	ϵ ax. (%)	ϵ transv.(%)
0	0.00	0.000000	0.000000
1.44	0.73	0.000075	-0.000021
1.95	0.99	0.000149	-0.000040
2.39	1.22	0.000224	-0.000063
2.98	1.52	0.000298	-0.000082
3.64	1.86	0.000373	-0.000102
4.11	2.10	0.000447	-0.000123
4.79	2.44	0.000522	-0.000143
5.14	2.62	0.000596	-0.000164
5.78	2.95	0.000671	-0.000184
6.34	3.23	0.000746	-0.000205
7.54	3.85	0.000820	-0.000225
8.45	4.31	0.000895	-0.000264
9.35	4.77	0.000969	-0.000266
9.94	5.07	0.001044	-0.000287
10.54	5.38	0.001118	-0.000307
11.62	5.93	0.001193	-0.000328
13.3	6.78	0.001268	-0.000348
	0.00	0.000000	0.000000
	0.00	0.000000	0.000000

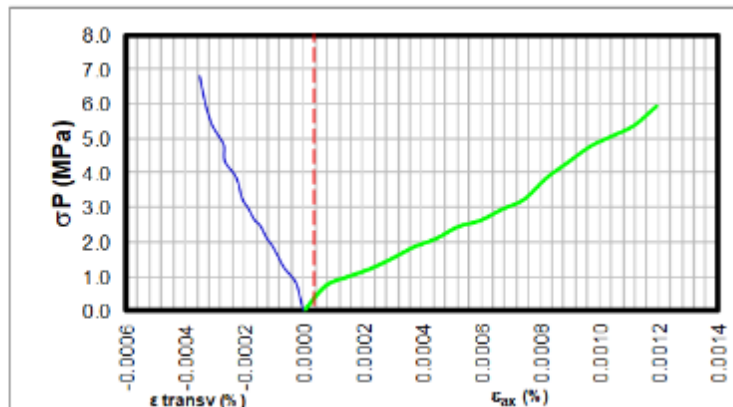
DATOS DE LA MUESTRA

Muestra	G1-M6-CCSI
Diámetro (mm)	49.98
Altura (mm)	134.12
Área corregida (m²)	0.00196
Peso unitario (KN/m³)	13.35



MÓDULO TANGENTE

$\sigma_c/2$ (MPa)	3.39
ϵ axial (%)	0.00079
E tang (MPa)	4291.14



COEFICIENTE DE POISSON

ϵ axial	0.00079
ϵ transv	0.00022
μ	0.281

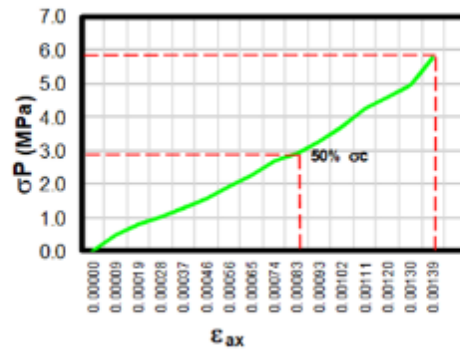
ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL EN ROCA CON MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.8
1.9

Carga (kN)	σ_p (MPa)	ϵ ax. (%)	ϵ transv.(%)
0	0.00	0.000000	0.000000
0.89	0.46	0.000093	-0.000024
1.57	0.81	0.000185	-0.000051
1.98	1.03	0.000278	-0.000078
2.54	1.32	0.000371	-0.000106
3.05	1.58	0.000463	-0.000122
3.75	1.94	0.000556	-0.000148
4.33	2.24	0.000649	-0.000178
5.21	2.70	0.000741	-0.000219
5.57	2.89	0.000834	-0.000223
6.31	3.27	0.000927	-0.000254
7.12	3.69	0.001020	-0.000280
8.2	4.25	0.001112	-0.000297
8.88	4.60	0.001205	-0.000331
9.56	4.95	0.001298	-0.000356
10.54	5.76	0.001390	-0.000400
	0.00	0.000000	0.000000
	0.00	0.000000	0.000000

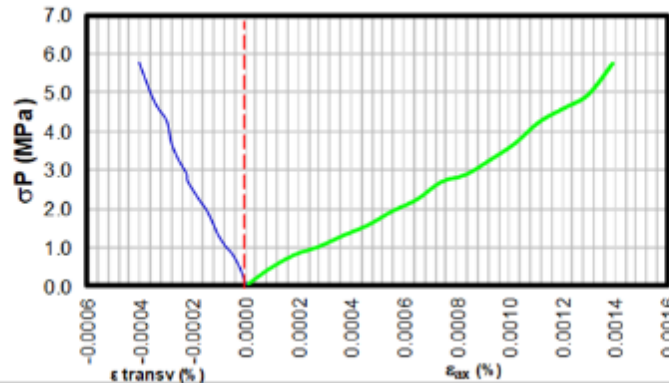
DATOS DE LA MUESTRA

Muestra	G4-M4-CCSI
Diámetro (mm)	49.63
Altura (mm)	107.89
Área corregida (m²)	0.00193
Peso unitario (KN/m³)	13.11



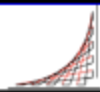
MÓDULO TANGENTE

$\sigma_c/2$ (MPa)	2.88
ϵ axial (%)	0.00089
E tang (MPa)	3235.96



COEFICIENTE DE POISSON

ϵ axial	0.00089
ϵ transv	0.00024
μ	0.267



ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL EN ROCA CON MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

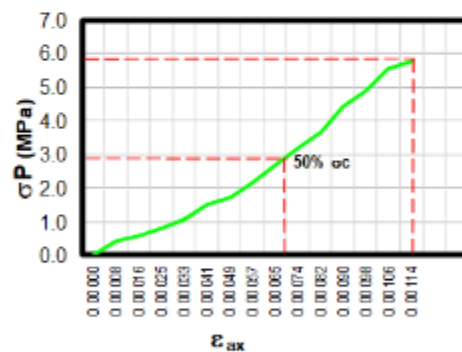
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9

Carga (kN)	σ_p (MPa)	ϵ ax. (%)	ϵ transv.(%)
0	0.00	0.000000	0.000000
0.77	0.40	0.000082	-0.000023
1.11	0.58	0.000163	-0.000041
1.54	0.81	0.000245	-0.000070
2.1	1.10	0.000327	-0.000090
2.87	1.50	0.000408	-0.000107
3.24	1.70	0.000490	-0.000125
4.09	2.14	0.000572	-0.000157
5.14	2.69	0.000653	-0.000179
6.05	3.17	0.000735	-0.000196
6.98	3.65	0.000817	-0.000224
8.41	4.40	0.000898	-0.000247
9.32	4.88	0.000980	-0.000261
10.56	5.53	0.001062	-0.000292
11.04	5.78	0.001143	-0.000314
	0.00	0.000000	0.000000
	0.00	0.000000	0.000000

0
-0.2714
-0.2714
-0.27145
-0.2741
-0.2832
-0.2847
-0.2783
-0.274
-0.267
-0.2743
-0.2743
-0.2743
-0.265
0.000000
0.000000
0.000000
0.000000
0.000000

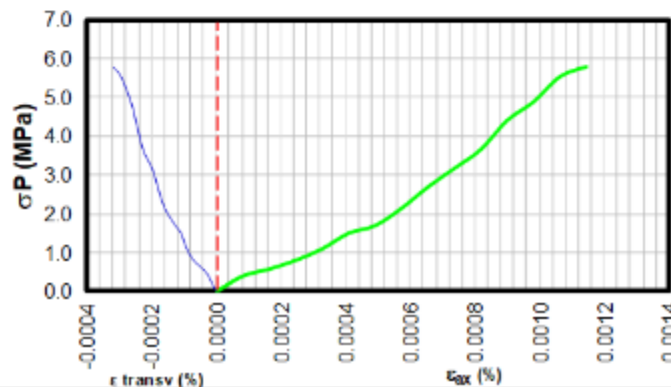
DATOS DE LA MUESTRA

Muestra	G6-M10-CCSI
Diámetro (mm)	49.32
Altura (mm)	122.44
Área corregida (m²)	0.00191
Peso unitario (KN/m³)	12.89



MÓDULO TANGENTE

$\sigma_c/2$ (MPa)	2.89
ϵ axial (%)	0.00069
Etang (MPa)	4188.48



COEFICIENTE DE POISSON

ϵ axial	0.00069
ϵ transv	0.00019
μ	0.278

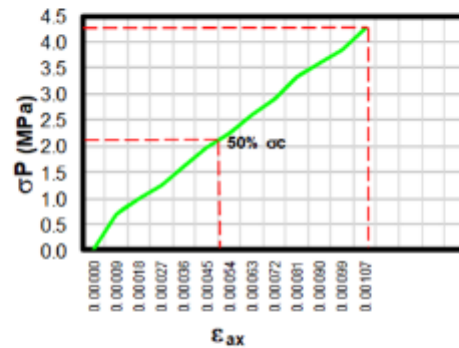


ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL EN ROCA CON MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

Carga (kN)	σ_p (MPa)	ϵ ax. (%)	ϵ transv.(%)
0	0.00	0.000000	0.000000
0.1	1.35	0.000090	-0.000025
0.2	1.94	0.000179	-0.000050
0.3	2.46	0.000269	-0.000071
0.4	3.19	0.000358	-0.000091
0.5	3.87	0.000448	-0.000118
0.6	4.44	0.000537	-0.000137
0.7	5.11	0.000627	-0.000172
0.8	5.74	0.000717	-0.000196
0.9	6.57	0.000806	-0.000215
1	7.06	0.000896	-0.000237
1.1	7.57	0.000985	-0.000242
1.2	8.4	0.001075	-0.000287
1.3			
1.4			
1.5			
1.6			
1.7			
1.8	0.00	0.000000	0.000000
1.9	0.00	0.000000	0.000000

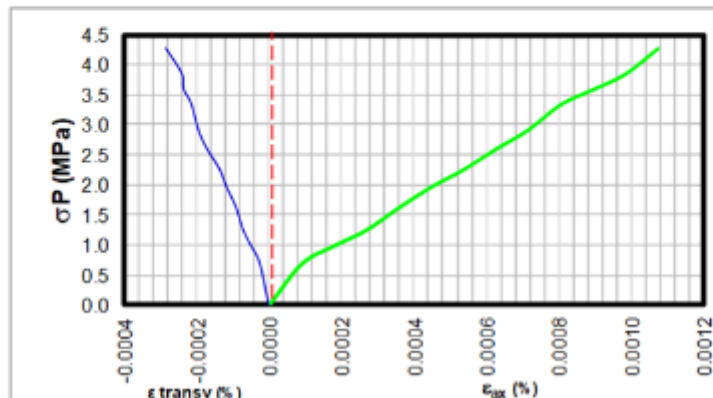
DATOS DE LA MUESTRA

Muestra	G8-M2-CCSI
Diámetro (mm)	50.11
Altura (mm)	111.63
Área corregida (m²)	0.00197
Peso unitario (KN/m³)	13.05



MÓDULO TANGENTE

$\sigma_c/2$ (MPa)	2.13
ϵ axial (%)	0.00045
E tang (MPa)	4737.73



COEFICIENTE DE POISSON

ϵ axial	0.00045
ϵ transv	0.00013
μ	0.284



ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAIXIAL EN ROCA CON MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

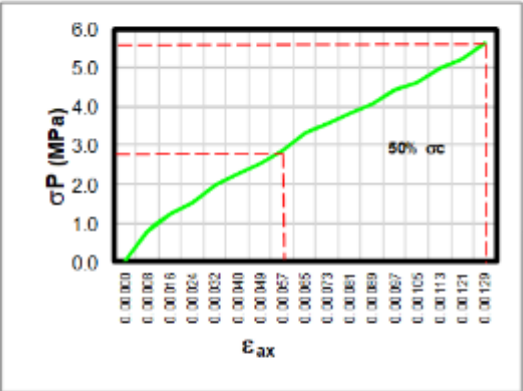
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9

Carga (kN)	σ_p (MPa)	ϵ ax. (%)	ϵ transv.(%)
0	0.00	0.000000	0.000000
1.59	0.80	0.000081	-0.000023
2.44	1.23	0.000162	-0.000043
3.04	1.54	0.000243	-0.000064
3.9	1.97	0.000323	-0.000076
4.47	2.26	0.000404	-0.000099
4.98	2.52	0.000485	-0.000125
5.64	2.85	0.000566	-0.000163
6.55	3.31	0.000647	-0.000177
7.05	3.56	0.000728	-0.000199
7.54	3.81	0.000808	-0.000222
8.04	4.06	0.000889	-0.000244
8.78	4.43	0.000970	-0.000266
9.14	4.62	0.001051	-0.000288
9.87	4.98	0.001132	-0.000310
10.34	5.22	0.001213	-0.000332
11.16	5.64	0.001294	-0.000354
	0.00	0.000000	0.000000
	0.00	0.000000	0.000000

0.000000
-0.000023
-0.000043
-0.000064
-0.000076
-0.000099
-0.000125
-0.000163
-0.000177
-0.000199
-0.000222
-0.000244
-0.000266
-0.000288
-0.000310
-0.000332
-0.000354
0.000000
0.000000
0.000000

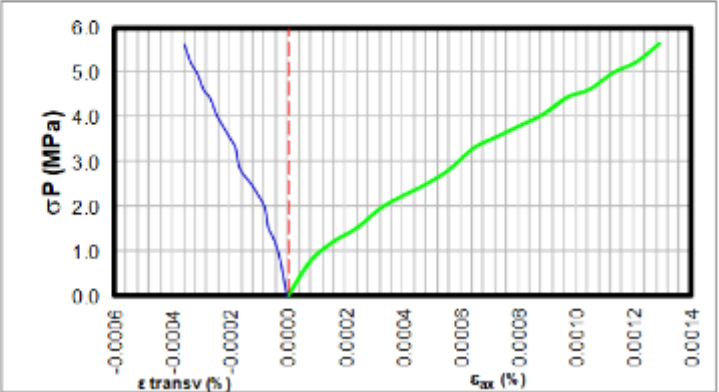
DATOS DE LA MUESTRA

Muestra	G10-M2-CCSI
Diámetro (mm)	50.23
Altura (mm)	123.69
Área corregida (m²)	0.00198
Peso unitario (KNm⁻³)	11.16



MÓDULO TANGENTE

$\sigma_c/2$ (MPa)	2.82
ϵ axial (%)	0.00055
E tang (MPa)	5123.97



COEFICIENTE DE POISSON

ϵ axial	0.00055
ϵ transv	0.00015
μ	0.267

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA-MÉTODO BRASILEIRO

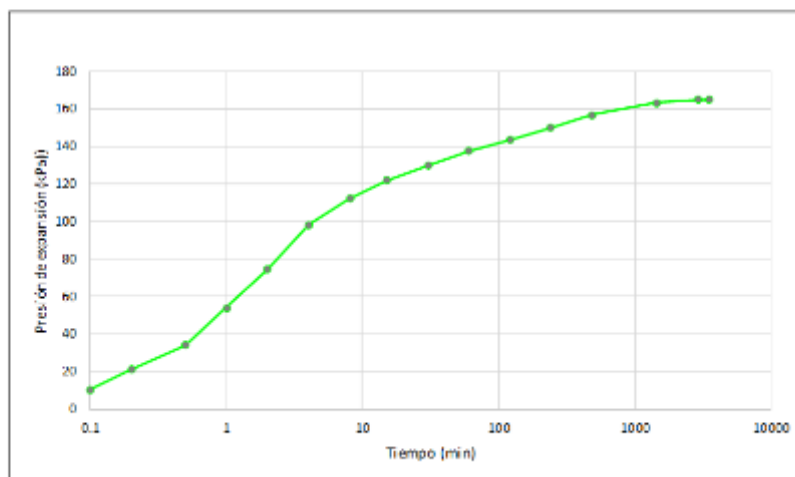
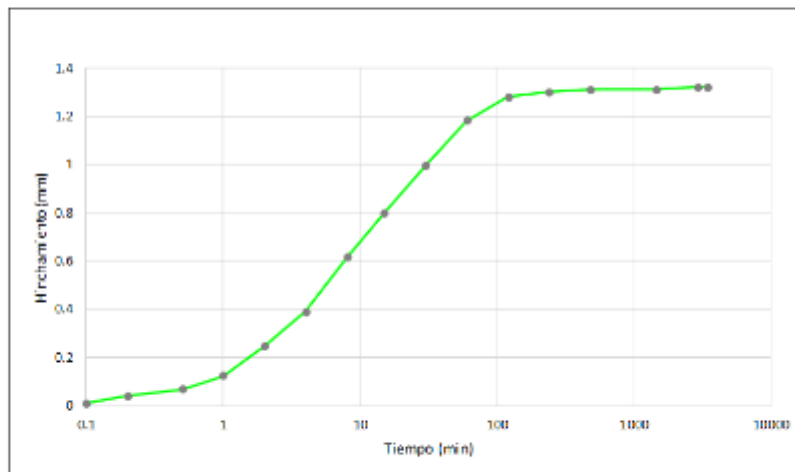
Muestra	Litología	Diámetro (mm)	Carga P KN	Longitud (mm)	σ_t (MPa)	Muestra	Litología	Diámetro (mm)	Carga P KN	Longitud (mm)	σ_t (MPa)
G1M1CTI	CARBÓN	48.21	2.91	36.65	1.05	G13M1CTI	CARBÓN	48.96	2.68	36.36	0.96
G1M2CTI	CARBÓN	48.63	2.90	41.21	0.92	G13M2CTI	CARBÓN	48.25	3.97	46.35	1.13
G1M3CTI	CARBÓN	49.21	2.45	31.05	1.02	G13M3CTI	CARBÓN	49.87	3.46	40.21	1.1
G1M4CTI	CARBÓN	48.21	2.83	35.65	1.05	G13M4CTI	CARBÓN	49.32	3.18	35.07	1.17
G1M5CTI	CARBÓN	48.54	3.42	47.25	0.95	G13M5CTI	CARBÓN	49.25	3.18	36.69	1.12
G2M1CTI	CARBÓN	48.35	2.82	38.65	0.96	G14M1CTI	CARBÓN	49.11	4.21	41.36	1.32
G2M2CTI	CARBÓN	48.63	2.87	34.20	1.10	G14M2CTI	CARBÓN	48.51	4.30	45.12	1.25
G2M3CTI	CARBÓN	48.3	2.66	33.99	1.03	G14M3CTI	CARBÓN	49.21	2.98	33.25	1.16
G2M4CTI	CARBÓN	48.52	3.31	40.25	1.08	G14M4CTI	CARBÓN	48.54	3.28	39.45	1.09
G2M5CTI	CARBÓN	48.41	3.02	41.33	0.96	G14M5CTI	CARBÓN	48.77	3.33	37.11	1.17
G3M1CTI	CARBÓN	49.36	3.30	37.65	1.13	G15M1CTI	CARBÓN	49.54	131.49	33.87	49.89
G3M2CTI	CARBÓN	49.25	3.38	36.99	1.18	G15M2CTI	CARBÓN	50.08	163.27	41.41	50.12
G3M3CTI	CARBÓN	49.14	3.59	40.78	1.14	G15M3CTI	CARBÓN	49.65	196.96	47.25	53.45
G3M4CTI	CARBÓN	48.25	2.92	38.55	1.00	G15M4CTI	CARBÓN	48.54	193.99	40.97	62.1
G3M5CTI	CARBÓN	48.98	2.94	34.74	1.10	G15M5CTI	CARBÓN	48.96	135.81	35.41	49.87
G4M1CTI	CARBÓN	48.32	2.94	30.22	1.28						
G4M2CTI	CARBÓN	48.65	2.74	32.56	1.10						
G4M3CTI	CARBÓN	48.21	3.02	36.96	1.08						
G4M4CTI	CARBÓN	48.54	3.03	34.24	1.16						
G4M5CTI	CARBÓN	49.01	2.62	36.20	0.94						
G5M1CTI	CARBÓN	48.32	3.23	38.65	1.10						
G5M2CTI	CARBÓN	49.11	2.79	30.63	1.18						
G5M3CTI	CARBÓN	48.2	3.03	42.54	0.94						
G5M4CTI	CARBÓN	49.3	2.72	40.36	0.87						
G5M5CTI	CARBÓN	48.11	3.56	39.54	1.19						
G6M1CTI	CARBÓN	49.21	2.19	30.77	0.92						
G6M2CTI	CARBÓN	47.98	3.55	41.30	1.14						
G6M3CTI	CARBÓN	49.32	3.23	38.27	1.09						
G6M4CTI	CARBÓN	49.62	2.51	36.23	0.89						
G6M5CTI	CARBÓN	50.11	3.14	30.65	1.30						
G7M1CTI	CARBÓN	50.08	3.91	37.65	1.32						
G7M2CTI	CARBÓN	48.77	3.89	40.66	1.25						
G7M3CTI	CARBÓN	49.58	3.41	37.77	1.16						
G7M4CTI	CARBÓN	48.3	3.19	38.61	1.09						
G7M5CTI	CARBÓN	48.65	3.78	42.32	1.17						
G8M1CTI	CARBÓN	48.21	3.13	43.56	0.95						
G8M2CTI	CARBÓN	48.62	4.61	46.05	1.31						
G8M3CTI	CARBÓN	48.25	3.57	41.74	1.13						
G8M4CTI	CARBÓN	49.6	3.95	39.32	1.29						
G8M5CTI	CARBÓN	49.52	3.19	35.68	1.15						
G9M1CTI	CARBÓN	48.12	3.24	39.02	1.10						
G9M2CTI	CARBÓN	49.01	3.80	36.34	1.36						
G9M3CTI	CARBÓN	48.51	4.12	38.65	1.40						
G9M4CTI	CARBÓN	49.2	4.19	41.36	1.31						
G9M5CTI	CARBÓN	48.5	4.04	45.36	1.17						
G10M1CTI	CARBÓN	48.55	3.97	40.05	1.30						
G10M2CTI	CARBÓN	49.65	3.43	39.28	1.12						
G10M3CTI	CARBÓN	48.71	3.37	37.64	1.17						
G10M4CTI	CARBÓN	48.2	3.57	41.05	1.15						
G10M5CTI	CARBÓN	48.52	3.30	43.33	1.00						
G11M1CTI	CARBÓN	48.12	3.64	36.52	1.32						
G11M2CTI	CARBÓN	48.3	3.79	44.21	1.13						
G11M3CTI	CARBÓN	48.29	3.35	46.02	0.96						
G11M4CTI	CARBÓN	48.63	3.13	38.30	1.07						
G11M5CTI	CARBÓN	48.24	3.40	37.69	1.19						
G12M1CTI	CARBÓN	48.65	3.49	41.87	1.09						
G12M2CTI	CARBÓN	48.88	3.69	43.25	1.11						
G12M3CTI	CARBÓN	47.98	3.04	35.35	1.14						
G12M4CTI	CARBÓN	48.56	3.84	39.65	1.27						
G12M5CTI	CARBÓN	48.21	3.64	40.77	1.18						

Tiempo (min)	Expansión (mm)	Presión de Expansión (Kpa)	%expansión
	0	0	0.00
0.1	0.01	10.31	0.05
0.2	0.04	21.14	0.18
0.5	0.067	34.12	0.30
1	0.124	54.1	0.56
2	0.247	74.54	1.12
4	0.389	98.2	1.77
8	0.614	112.07	2.79
15	0.798	122.01	3.63
30	0.996	129.65	4.53
60	1	137.45	5.36
120	1.28	143.56	5.82
240	1.3	150.12	5.91
480	1.31	156.78	5.95
1440	1.31	163.45	5.95
2880	1.32	164.78	6.00
3456	1.32	164.78	6.00

MUESTRA
 G3-M1-AP-EXP-ALT

ALTURA (mm)
 22

DIÁMETRO (mm)
 50



Tiempo (min)	Expansión (mm)	Presión de Expansión (Kpa)	% expansión
	0.000	0	0.00
0.1	0.010	0.89	0.05
0.2	0.015	2.46	0.07
0.5	0.019	8.65	0.09
1	0.054	14.2	0.25
2	0.122	18.79	0.55
4	0.178	25.24	0.81
8	0.229	30.21	1.04
15	0.251	36.24	1.14
30	0.274	42.42	1.25
60	0.296	46.52	1.35
120	0.305	51.54	1.39
240	0.324	56.87	1.47
480	0.332	60.36	1.51
1440	0.338	63.12	1.54
2880	0.340	64.45	1.55
3456	0.340	64.91	1.55

MUESTRA
G3-M1-AP-EXP INALT

ALTURA (mm)
22

DIÁMETRO (mm)
50

