ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO DE LA FORMACIÓN MIRADOR PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL MINERO EN LA VEREDA LA SELVA, CORREGIMIENTO LA DONJUANA, MUNICIPIO DE BOCHALEMA, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

JUAN CARLOS ARÉVALO ESPINEL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL BUCARAMANGA 2014 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO DE LA FORMACIÓN MIRADOR PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL MINERO EN LA VEREDA LA SELVA, CORREGIMIENTO LA DONJUANA, MUNICIPIO DE BOCHALEMA, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

JUAN CARLOS ARÉVALO ESPINEL

Trabajo de aplicación para optar al título de Magister en Geotecnia

> HEBENLY CELYS LEGUISAMO INGENIERA CIVIL, MG. DIRECTORA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL BUCARAMANGA 2014

AGRADECIMIENTOS

Muy especialmente a mi directora Hebenly Celis Leguizamo, por su confianza y asesoría durante todas las etapas de mi maestría. A la Universidad central de Venezuela y al doctor Miguel Castillejo quien permitió el desarrollo del presente trabajo en los laboratorios de la escuela de petróleos y fue muy amable en orientarme para el desarrollo de los ensayos.

A todos los profesores de la Maestria, en especial al Ingeniero Álvaro Pedroza y al Ingeniero Jaime Suarez por permitirme ser parte de esta cohorte; a los Ingenieros Wilfredo del toro, Jorge Puerto, Vladimir Merchán y Eduardo Castañeda por la ayuda brindada en el transcurso de mis estudios. Igualmente al MSc. Fernando Fernández Lagazio por impartirme sus conocimientos como parte del diplomado de geomecánica minera subterránea de la empresa consultora Intercade.

A la Universidad Francisco de Paula Santander, al grupo de investigación GIGA, y a mis compañeros de ingeniería de minas de la Universidad Francisco de Paula Santander por el acompañamiento en las prácticas de campo y en la preparación de las muestras.

A aquellas entidades que de manera servicial suministraron la información requerida para el desarrollo de mi investigación: A la Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia, el Instituto de geología y minas (Ingeominas) ,el Instituto geográfico Agustín Codazzi, la Universidad Nacional, la Universidad de los Andes, la empresa Petróleos de Venezuela (PDVSA), y el Instituto de Geología de Venezuela. De igual manera, al señor Carlos García, gerente de Minas la Aurora dos, por facilitarme el acceso al túnel a través de la formación Mirador en el municipio del Zulia.

A mi amiga la Ingeniera de minas Alexandra Ochoa por su amistad y asesoramiento en el adelanto de mi trabajo.

A mis compañeros de Maestria, en especial a la ingeniera Laura López y Claudia Marcela Blanco a quienes aprecio por su simpatía y colaboración.

A mi grupo de amigos, Vanesa Martinez, Adrián Flores, Doña Matilde Bastos, Erika Torres, Angie Mantilla, Caterine Benitez, Jeison Cabeza, Sonia Caballero, Eliana Araque, Luis Carlos Granados, Juan Carlos Pedraza, Alvaro Peñaloza y Omar Mojica; quienes me prestan su amistad en los buenos y malos momentos.

Por ultimo quiero agradecerle a mi familia que está siempre ahí llenándome de motivación y en especial a mi tía Clara Edilia por esas palabras de aliento.

DEDICATORIA

Quiero expresarle mi agradecimiento al Señor, fuente de mi perseverancia. A todos los que me han rodeado de tanto cariño y me han brindado su apoyo.

A mi padre, fuente de mi inspiración, quien me ha encaminado en el sector minero y ha depositado su confianza en mí.

A mi madre, por estar tan pendiente durante mis viajes, por el calor de hogar y recordarme lo bonito de estar en familia.

A mi hermana, por su acompañamiento y comprensión.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
1. GENERALIDADES	20
1.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.3 PROBLEMÁTICA	20
1.4 ANTECEDENTES	21
1.5 LOCALIZACION GEOGRÁFICA	23
1.6 HIDROLOGÍA Y CLIMATOLOGIA	24
1.7 GEOLOGIA	24
1.7.1 Geología regional	25
1.7.1.1 Formación Barco (Tpb)	25
1.7.1.2 Formación Los Cuervos (Tpc)	25
1.7.1.3 Formación Mirador (Tem)	26
1.7.1.4 Formación Carbonera (Tec)	26
1.7.2 Geología local	26
1.7.2.1 Litología	28
1.7.2.2 Espesor	29
1.7.2.3 Era geológica	30
1.7.2.4 Influencia marina	30

2. CARACTERIZACION GEOMECANICA	32
2.1 PROPIEDADES DE LA MATRIZ ROCOSA	32
2.1.1 Porosidad	32
2.1.2 Peso específico	32
2.1.3 Humedad	33
2.1.4 Permeabilidad	33
2.1.5 Durabilidad	33
2.1.6 Alterabilidad	34
2.1.7 Resistencia a la compresión simple	34
2.1.8 Resistencia a la tracción	34
2.1.9 Velocidad de ondas sónicas Vp y Vs	34
2.1.10 Cohesión	34
2.1.11 Angulo de fricción	34
2.1.12 Modulo de Young	35
2.1.13 Coeficiente de Poisson	35
2.2 RQD	35
2.3 RMR	37
2.3.1 La resistencia a la compresión	38
2.3.2 El índice RQD	38
2.3.3 La separación entre diaclasas	38
2.3.4 El estado de las discontinuidades	39
2.3.5 El agua freática	39
2.3.6 Corrección por la orientación de las discontinuidades	40

2.3.7 Resultados de la clasificación RMR	40
2.4 Q de Barton	41
2.4.1 Índice RQD	42
2.4.2 Numero de juntas J _n	42
2.4.3 Número de rugosidad de la junta J_r	43
2.4.4 Numero de alteración J_a	44
2.4.5 Factor de reducción de agua de la junta J_w	44
2.4.6 Factor de reducción de esfuerzos SRF	45
2.4.7 Resultados de la clasificación Q	45
2.5 GSI	46
2.6 RESUMEN DE LA CARACTERIZACION GEOMECANICA	48
3. ENSAYOS DE ROCAS	49
3.1 ENSAYO ESCLERÓMETRICO	51
3.2 ENSAYO PETROGRÁFICO	52
3.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA	59
3.4 ENSAYO DE TRACCION O BRASILERO	65
3.5 ENSAYO DE ULTRASONIDO	68
4. ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO	71
4.1 CALCULOS PRELIMINARES	71
4.1.1 Estimación del estado tensional	71
4.1.2 Diseño de la excavación	73

4.1.2.1 Dimensiones del túnel según el RMR de Bieniawski (1989)				
4.1.2.2 Geometría del túnel				
4.1.2.3 Espesor del daño en el macizo rocoso				
4.1.2.4 Orientación del túnel y familia de fallas con el software Dips	77			
4.1.3 Diseño de sostenimiento según el índice q de Barton	79			
4.1.4 Análisis de esfuerzos y desplazamientos	80			
4.1.4.1 Calculo de los parámetros de resistencia con el	software			
Rocdata	80			
4.1.4.2 Concentración de esfuerzos y desplazamientos con el	software			
Phase 2	82			
4.2 ANALISIS DE CUÑAS MAXIMAS	85			
4.2.1 Cálculo de cuñas máximas con el software Unwedge	85			
4.2.2 Análisis estático	88			
4.2.3 Análisis dinámico	89			
5. CONCLUSIONES				
BIBLIOGRAFÍA	93			
ANEXOS	97			

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Vista del proyecto	21
Imagen 2. Fotografía de la bocamina del túnel Aurora 2	22
Imagen 3. Fotografía del interior del túnel Aurora 2	22
Imagen 4. Mapa de la ubicación Geográfica del proyecto	23
Imagen 5. Área proyecto	23
Imagen 6. Litología columna estratigráfica generalizada	27
Imagen 7. Mapa modificado del plano N°1 del Bloque la Sorzana	28
Imagen 8. Fotografía panorámica de la formación Mirador	29
Imagen 9: Fotografía del Espesor de la formación Mirador en la Quebra	da la
Regadera en Colombia	30
Imagen 10. Columna estratigráfica de la formación Mirador	31
Imagen 11. Bloques con tres familias de juntas. A la izquierda un bl	loque
equidimensional, a la derecha el bloque de la formación Mirador	36
Imagen 12. Favorabilidad de un túnel	40
Imagen 13. Forma de los bloques en los macizos rocosos. A. Poliédricos. Tabul	lares.
C. Prismáticos. D. Equidimensionales. E. Romboidales. F. Columnares	42
Imagen 14. Estimación del GSI con base en descripciones geológicas	47
Imagen 15. Fotografías de la extracción de la roca con martillo y disco diaman	itado 49
Imagen 16. Muestras tomadas en campo a través de la falla la regadera	49

Imagen 17. Ubicación de la toma de muestras	50
Imagen 18. Fotografía del pulido, medición y alistamiento de los núcleos	50
Imagen 19. Equipo servo-controlado de ensayos triaxiales sobre rocas (RDS-	500) 51
Imagen 20. Medición del rebote en 11 taludes de la formación Mirador	52
Imagen 21. Fotografía de las muestras para el ensayo petrográfico	53
Imagen 22. Fotografía de la cortadora PETROCUT marca BUEHLER	53
Imagen 23. Fotografía del equipo de desbaste PETRO THIN marca BUEHLER	54
Imagen 24. Fotografía del microscopio de luz polarizada	54
Imagen 25. Fotografía petrográfica de la muestra M1	55
Imagen 26. Fotografía petrográfica de la muestra M2	56
Imagen 27. Fotografía petrográfica de la muestra M3	57
Imagen 28. Fotografía petrográfica de la muestra M4	58
Imagen 29. Ensayo de compresión inconfinada	60
Imagen 30. Esfuerzo Desviador Vs Deformación Axial	63
Imagen 31.Esfuerzo Desviador Vs Tiempo y Deformación Axial Vs Tiempo.	64
Imagen 32. Ensayo de tracción, orientación del espécimen	65
Imagen 33 Esfuerzo Desviador Vs Tiempo y Deformación Axial Vs Tiempo.	67
Imagen 34 Velocidad de onda p.	69
Imagen 35 Velocidad de onda s	70
Imagen 36. Variación de la tensión vertical con la profundidad y la variación oH	/σν
con la profundidad.	72
Imagen 37. RMR vs Roof Span.	74

Imagen 38. Dimensiones del túnel

Imagen 39. Imagen de la profundidad de daño en un macizo rocoso según Hoek & Brown y la Dirección de esfuerzos en la formación mirador visto en la mina Aurora dos 76 Imagen 40. Diagrama de polos 77

74

- Imagen 41. Diagrama de contornos 78 78 Imagen 42. Diagrama de Rosetas Imagen 43 Sostenimiento según el índice Q 80 Imagen 44. Envolvente de Mohr según ensayos brasileros y de compresion 82 Imagen 45. Trayectoria y concentracion de esfuerzos verticales, z= 500 m 83 Imagen 46. Trayectoria y concentracion de esfuerzos horizontales, Z= 500 m 84 Imagen 47. Concentración de esfuerzos y desplazamientos, Z=1 m 84 Imagen 48. Desplazamientos verticales y horizontales, Z= 500 m 85
- Imagen 49. Vista lateral de las cuñas formadas86Imagen 50. Ángulos de fricción básica para rocas sedimentarias.87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades básicas de la matriz rocosa	33
Tabla 2. Valores típicos en las areniscas.	35
Tabla 3. Calidad de la roca a partir del Índice de calidad RQD	36
Tabla 4. Registro de las familias de discontinuidad	37
Tabla 5. Parámetro de resistencia para el cálculo del RMR	38
Tabla 6. Puntuación del parámetro RQD	38
Tabla 7. Separación entre diaclasas para el cálculo del RMR	39
Tabla 8. Estado de discontinuidades para el cálculo del RMR	39
Tabla 9. Grado de humedad para el cálculo del RMR	40
Tabla 10. Resultados de la clasificación RMR basados en trabajo de campo	40
Tabla 11. Valoración del Q de Barton	41
Tabla 12. Puntuación del parámetro Jn	43
Tabla 13. Puntuación del parámetro Jr	43
Tabla 14. Puntuación del parámetro Ja	44
Tabla 15. Puntuación del parámetro Jw	44
Tabla 16. Puntuación del parámetro SRF	45
Tabla 17. Resumen de la caracterización Q de Barton	46
Tabla 18. Resumen de la caracterización geo mecánica	48
Tabla 19. Coordenadas planas de las muestras tomadas (Datum Bogota)	50
Tabla 20. Media del ensayo esclerómetro en la formación Mirador	52

Tabla 21. Componentes principales	55
Tabla 22. Descripción de los parámetros petrográficos en las muestras	58
Tabla 23. Configuración del ensayo de compresión simple	61
Tabla 24. Datos del testigo.	61
Tabla 25. Resultados del ensayo de compresión simple	62
Tabla 26. Configuración del ensayo de brasilero	66
Tabla 27. Datos del testigo para el ensayo brasilero	66
Tabla 28. Resultados del ensayo brasilero	66
Tabla 29. Configuración del ensayo de ultrasonido	68
Tabla 30. Datos del testigo para el ensayo de ultrasonido	68
Tabla 31. Resultados del ensayo de ultrasonido	69
Tabla 32. Talores de ESR	79
Tabla 33. Parámetros de entrada al software Rocdata	81
Tabla 34. Resultados del software Rocdata	81
Tabla 35. Datos de laboratorio para el criterio de Mohr Coulomb	82
Tabla 36. Parámetros de entrada al software Phase 2	83
Tabla 37. Parámetros iniciales de diseño	85
Tabla 38. Resultados del software Unwedge para la cuña de techo	87
Tabla 39. Parametros de carga desplazamiento para elementos de soporte	e 88
Tabla 40. Calculo de FS para principales sismos registrados en la zona de	estudio 90

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Topografia de la zona de estudio	97
Anexo B. Datos estructurales de los estratos de la formación Mirador	98
Anexo C. Resultados del ensayo esclerómetro en la formación Mirador	99
Anexo D. Resultados del ensayo de petrografia	100
Anexo E. Resultados de los ensayos de Compresion, tracción y ultrasonido	108

RESUMEN

TITULO: Análisis de estabilidad del macizo rocoso de la formación mirador para la construcción de un túnel minero en la vereda la selva, corregimiento la Donjuana, municipio de Bochalema, Norte de Santander, Colombia

AUTOR: Juan Carlos Arevalo Espinel

PALABRAS CLAVE: Túnel; estabilidad; cuña; macizo rocoso; excavación.

DESCRIPCION

En este documento se presenta la estimación de la estabilidad para un túnel en roca que operará como parte de una excavación minera en la vereda la Selva, municipio de Bochalema, Norte de Santander, Colombia.

Como consecuencia de las actividades de campo programadas para este proyecto, se obtuvo información geológica y geotécnica de la formación Mirador a partir de pruebas de laboratorio y levantamientos de campo a través de la falla la Regadera.

En este trabajo se implementó una caracterización geomecánica mediante el RMR, el RQD, el Q de Barton y el GSI. Además se determinaron los parámetros del macizo rocoso por medio del ensayo esclerómetrico, de petrografía, compresión, tracción y ultrasonido.

Para el diseño de la perforación, se calculó las dimensiones del túnel según el RMR de Bieniawski, la profundidad de daño en un macizo rocoso según Hoek & Brown y la orientación del túnel en el software Dips.

Los parámetros de resistencia fueron calculados con el software Rocdata. Se calculó la concentración de esfuerzos y desplazamientos mediante el software Phase 2 y la estimación de los sostenimientos a partir del índice Q de Barton.

Adicionalmente, para una mejor apreciación, se realizó un análisis de estabilidad estática y dinámica utilizando fortificación con pernos, lo que requirió el estudio de cuñas de techo del túnel mediante el software Unwedge y el diseño del factor de seguridad de los bloques potencialmente inestables.

Trabajo de Grado

Facultad de Ingenierías. Escuela de ingeniería Civil. Director M. Sc. HEBENLY CELIS LEGUIZAMO.

ABSTRACT

TITLE: Stability analysis of the rocky wall of mirador formation for the construction of a tunnel mining in the selva village, the township of La Don Juana, the municipality Bochalema, Norte de Santander, Colombia

AUTHOR: Juan Carlos Arevalo Espinel

KEY WORDS: Tunnel; stability; wedge-shaped rocks; rock formation.

DESCRIPTION

In this paper is presented the estimation of stability for rock tunnel which will operate as part of a mining excavation in the village of La Selva, municipality of Bochalema, Norte de Santander.

As a result of field activities planned for this project, geological and geotechnical information from the Mirador formation from laboratory tests and field surveys obtained through the failure of Regadera.

This paper presents a implementation of a geomechanical characterization by RMR, the RQD, the Q and GSI Barton. Also, the parameters of the rock mass through the scclerometer test, the test of petrography, compression, traction and ultrasound were determined.

For the design of the drilling, the dimensions of the tunnel in RMR of Bieniawski, the depth of damage in a rock mass according to Hoek & Brown and orientation of the tunnel in the software Dips calculated.

The strength parameters were calculated with the software Rocdata. The concentration of stresses and displacements in the software Phase 2 and the estimation of roof supports from Barton index Q was calculated.

Additionally, for a better assessment, an analysis of static and dynamic stability fortification using bolts, which required the study of tunnel ceiling wedges by Unwedge software and design safety factor of the potentially unstable blocks.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio surge del interés del consorcio minero los Laches por atravesar perpendicularmente los estratos de la formación Mirador para extraer el carbón inmerso en las vetas de la formación Cuervos, mediante un túnel con inclinación ascendente que permita extraer el mineral y el agua por gravedad

Sin embargo el desconocimiento de las propiedades físico mecánicas de los materiales rocosos de Mirador, impide predecir el comportamiento de estos previamente a la ejecución de las labores subterráneas.

Para satisfacer esta necesidad se requiere caracterizar el macizo rocoso de la formación Mirador y diseñar un análisis de estabilidad del túnel a construir mediante la realización de ensayos de la roca, trabajo de observación de la calidad del macizo en los taludes descubiertos por la falla la regadera y la aplicación de software de aplicación geotécnica.

Para ello se deben implementar los modelos de caracterización más representativos como el RMR, el RQD, el Q de Barton y el GSI. Además se pretende conocer la resistencia de la roca y su reacción ante esfuerzos inducidos producto de la excavación.

Es necesario significar que la zona de estudio donde se realiza la investigación, abarca una extensa región, por lo que se realiza un macro estudio de las características geomecánicas de los macizos a una escala estratégica, lo que implicaría una investigación de detalle una vez se conozcan los contextos de este trabajo.

Este trabajo con la motivación hacia el conocimiento de la Ingeniería; espera que aporte algunos elementos del saber en procura de fortalecer la investigación en el campo de la geotecnia minera, cumpliendo con los objetivos planteados por la Universidad Industrial de Santander

1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de esta tesis es analizar la estabilidad del macizo rocoso de la formación Mirador para la construcción de un túnel minero en la vereda la Selva, corregimiento la Donjuana, municipio de Bochalema, Norte de Santander, Colombia.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el macizo rocoso de la formación Mirador en la vereda la Selva.
- Estimar la estabilidad del macizo a causa de la construcción del túnel.

1.3 PROBLEMÁTICA

Desde el año 1992, el consorcio minero los Laches ha estado explotando el carbón de los mantos de la formación cuervos sobre la cota 764, esto es, por encima de la altitud local de la vereda la Selva, del municipio de Bochalema. Estos mantos se explotan en su mayoría por gravedad, siendo este método el más factible técnica y económicamente, teniendo en cuenta los altos costos que incrementan el uso de malacates para elevar el mineral a la superficie, así como, de motobombas para evitar la acumulación de agua al interior de las minas.

Sin embargo, los mantos por debajo de la cota 764, sólo pueden ser íntegramente aprovechados por este método, con la construcción de un túnel desde el otro lado de la montaña, en dirección opuesta a las labores actuales, donde la superficie se encuentra a 615 m de altitud sobre el nivel del mar, como se observa en la imagen 1.

En síntesis, es más factible atravesar perpendicularmente los estratos de la formación Mirador hasta alcanzar las vetas de carbón de la formación Cuervos, mediante un túnel con inclinación ascendente que permita extraer el carbón y el agua por gravedad.

No obstante, el desconocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales rocosos de Mirador, impide predecir el comportamiento de estos previamente a la ejecución de las labores subterráneas.

Para satisfacer esta necesidad se requiere caracterizar el macizo rocoso de la formación Mirador y diseñar un análisis de estabilidad del túnel a construir mediante la realización de ensayos de la roca, trabajo de observación de la calidad del macizo en los taludes descubiertos por la falla la regadera y la aplicación de software de aplicación geotécnica.

Imagen 1. Vista del proyecto



Fuente: Modificado Software Google Earth

Es necesario significar que la zona de estudio donde se realiza la investigación, abarca una extensa región, por lo que se realiza un macro estudio de las características geomecánicas de los macizos a una escala estratégica, lo que implicaría una investigacion de detalle una vez se conozcan los contextos de este trabajo.

1.4 ANTECEDENTES

Los estudios de la Society of Petroleum Engineers en el año 1996 destacan la alta madurez composicional y textural de la formación Mirador, así como su afinidad netamente cuarzosa, que señala una arenisca de tercer grado de sedimentación. Se describe que en la quebrada la regadera, la mineralogía esta por el orden de 78% de cuarzo, 14% de cemento de cuarzo y bajos contenidos de arcilla. Además, que las areniscas mantienen una porosidad de entre ocho y diez por ciento, con una permeabilidad de 60 md en el miembro inferior y un máximo de 110 md. Al respecto se reflexiona que su alta permeabilidad a bajas porosidades es un efecto de grandes tamaños de poro, una buena interconectividad y la cementación secundaria del cuarzo que a su vez da como resultado altas resistencias a la compresión inconfinada.

Poco tiempo después, en el año 2003, la empresa carbonífera Minas la Aurora, realizó un túnel que atravesaba la formación Mirador con el objeto de cruzar las vetas de carbón de la formación Cuervos en el sector conocido como Aurora dos, situado en la vereda 20 de Julio del municipio del Zulia.

Este túnel tiene una profundidad es de aproximadamente 280 m y alcanza una longitud de 300 m lineales para luego cruzar hacia el oeste siguiendo el rumbo de las vetas del mineral.

Imagen 2. Fotografía de la bocamina del túnel Aurora 2

Fuente: Propia

Recientemente, en una visita de campo realizada a esta construcción, se inspeccionó que el 80 por ciento ha sido socavado sin sostenimiento. En algunas zonas fisuradas del túnel se instaló entibación con madera, así también en las áreas donde se presentaron desprendimiento de cuñas de techo que se encontraban sujetas entre las tres familias de discontinuidad presentes en el macizo.

Por otra parte, aunque el túnel se encuentra estable presenta una ligera condición húmeda proveniente de filtraciones de las labores realizadas en la formación cuervos.

Imagen 3. Fotografía del interior del túnel Aurora 2



Fuente: Propia

1.5 LOCALIZACION GEOGRÁFICA

El proyecto de estudio se encuentra ubicado en el municipio de Bochalema, Norte de Santander, sobre la formación Mirador en el lugar conocido como Peñas Blancas. Limita hacia el norte con la quebrada la regadera, hacia el suroeste con la vereda la selva, el consorcio minero los Laches y el consorcio minero la Sorzana y hacia el este con el rio pamplonita, la vía Cúcuta Pamplona y el peaje los Acacios.

Imagen 4. Mapa de la ubicación Geográfica del proyecto



Fuente: Alcaldía de Bochalema, 2013

El area del proyecto tiene una extension total de 1,35 km cuadrados. La longitud del tunel propuesto es de aproximadamente 1000 metros iniciando en la cota 620 a una profundidad del orden de los 380 m.

Imagen 5. Área proyecto.



Fuente: Software Google Earth

1.6 HIDROLOGÍA Y CLIMATOLOGIA

La zona de influencia del proyecto por su misma configuración geológica carece de fuentes naturales a nivel subterráneo. Se encuentra a orillas del rio pamplonita a una altura de aproximadamente 600 m.s.n.m.

El clima es templado a frio con baja humedad relativa de 65% a razón de la baja precipitación, la alta temperatura ambiental y la ausencia de masas de agua que humedecen la atmosfera.

Los factores de precipitación indican que estos oscilan entre los 1000 a 1500 milímetros registrándose las más altas precipitaciones en los meses de abril y noviembre. La temperatura promedio es de 26,9°C, siendo agosto y septiembre los meses más cálidos con más de 28°C. En contraste, la atmosfera es inferior a los 26°C en diciembre y enero.

Los movimientos de aire en la zona alcanzan velocidades máximas de 9,6 m/s en los meses desde junio hasta agosto mientras que de noviembre a febrero los niveles disminuyen a 6,1 m/s.

La vegetación predominante es la herbácea y arbustiva constituida por especies rastreras, semileñosas y rastrojos; seguida de la vegetación boscosa maderable y lechosa. Predominan el pardillo blanco, el anacao, el potrico, el peraco, el yabo, siete cueros y el guácimo.

En cuanto a la fauna terrestre se encuentran entre los mamíferos: el venado, el cachicamo, los zorros, las faras y las ardillas. Las aves más representativas son el colibrí, las torcazas, las rabiblancas, los azulejos, el gavilán, la guacharaca, los zopilotes y los paticojos y en reptiles habitan las lagartijas, la culebra coral, la culebra cazadora, el mapaná y la rabiamarilla.

1.7 GEOLOGIA

El área evaluada se enmarca desde el punto de vista geológico estructural dentro de la formación geológica Mirador (Tem) y está localizado en el flanco oriental del Anticlinal Cúcuta y al occidente del Río Pamplonita, sobre la Cordillera oriental colombiana.

En toda la zona se encuentran las formaciones Barco (Tpb), Los Cuervos (Tpc), Mirador (Tem) y Carbonera (Tec); que pertenecen a la parte media de la cuenca del Catatumbo y estratigráficamente a la cuenca de Maracaibo. Dichas formaciones rocosas presentan complejidad tectónica y fuerte control estructural representado por estructuras con dirección general norte-sur. Este capítulo se adaptó del informe de las mina las Peñas presentado por (MOROS, 1997). 1.7.1 Geología regional. Las formaciones Barco, Cuervos, Mirador y Carbonera se caracterizan por un aumento considerable de sedimentos arenosos y la presencia de mantos de carbón explotables. Las formaciones terciarias presentan diferente composición litológica que facilita su diferenciación.

Por la importancia que poseen para los fines del estudio se hace una descripción de cada una de las formaciones constitutivas del Terciario de antiguas a moderna.

1.7.1.1 Formación Barco (Tpb). Tiene un espesor promedio de 80 m. y está formada por estratos de arenisca de color gris verdoso, con estratificación cruzada y granos de cuarzo en cementa siliceo. Hacia el techo de la formación se estratifican con las areniscas anteriores capas de lutitas carbonosas de aspecto ripioso (de 0,30 m. de espesor) y limolita siliceas (de 0,10 m a 0,20 m.) de color negro y pardo rojizo.

La formación Barco presenta un manto de carbón con abundantes intercalaciones lutiticas y espesor promedio de 3,2 m que se conoce con el nombre de "Veta Polvorin"; produce un coque de alta resistencia aunque abundante en cenizas. Este manto se encuentra localizado hacia el techo estratigráfico de la formación. Los afloramientos principales de la formación Barco se observan en la carretera La Don Juana - Chinacota, quebrada regadera y en los rios Peralonso y San Miguel.

1.7.1.2 Formación Los Cuervos (Tpc). (Paleoceno medio y Eoceno inferior – 245 m a 480 m), es la formación de mayor interés económico para los fines de este estudio ya que a través del túnel propuesto se pretende explotar los mantos pertenecientes a esta formación. Posee varios mantos de carbón coquizable explotables económicamente en el área de contratación de la Mina la Selva, que es la empresa que se encuentra explotando la veta 3.

La formación consta de una secuencia ínter-estratificada de arcillolitas, arenitas, limolitas y manifestaciones de varias capas de carbón, hasta de 2,3 m de espesor, con predominio de las arcillolitas. Estas arcillolitas son de color gris claro, con algunos paquetes verdosos, en ocasiones limosas y carbonosas particularmente hacia la base de la formación. Se registran en niveles delgados hasta paquetes de 5,0 m; se distribuyen en toda la secuencia, con predominio hacia la parte media - superior y superior de la formación.

Las areniscas son de color gris claro a gris pardo, de grano fino a medio, con laminación interna plano paralelas y onduladas. Se revelan en capas delgadas, medias y gruesas, tabulares. Son frecuentes hacia la base de la formación donde están inter-estratificadas con arcillolitas grises y las manifestaciones de carbón.

Está conformada por lutitas ripiosas de color gris oscuro a negro, que constituyen más del 60% de las rocas de esta formación; estas lutitas se interestratifican con areniscas grises fino granulares de composición suba cosica y arcosica y con

limolitas siliceas; dicha interestratificacion varia de techo a piso por el aumento gradual del espesor de los estratos de arenisca y limolita, pues en el piso tienen espesores de 0,10 m a 0,50 m. mientras que en el techo se observan estratos mayores de 2,0 m.

En el techo y hacia el centro de la formación se estratifican seis mantos de carbón coquizable con espesores entre 0,60 m y 2,20 m. y varias cintas de carbón de igual calidad con espesores menores o iguales a 0,50 m., algunas de las cuales se engruesan localmente.

Los mantos de carbón se encuentran en un paquete lutítico-arenoso de 100 m. de espesor aproximado que modifica su posición estratigráfica en la formación. A lo largo de la cuenca el espesor de los mantos de carbón varía, pero en general conservan sus límites económicos. La formación Los Cuervos es concordante con la formación Barco y presenta un espesor que varía entre 300 m y 400 m.; está expuesta a lo largo de toda la faja carbonífera pero sus mejores afloramientos se observan en la quebrada Regadera, carretera Cúcuta-Bucaramanga (3 km. Antes de llegar a la Don Juana) y en general en toda la concesión.

1.7.1.3 Formación Mirador (Tem). Es la formación de mayor interés para los fines de este estudio y forma parte de la geología local descrita en el capítulo 1.7.2.

1.7.1.4 Formación Carbonera (Tec). La formación Carbonera reposa concordantemente sobre la Mirador y está constituida por arcillolitas abigarradas interestratificadas con areniscas micáceas de colores gris claro y verde, grano medio a fino, con estratificación cruzada y marcas de olas. Las arcillolitas son compactas, de fractura angular, con nódulos y con creciones sideríticas de núcleos arcillosos.

Hacia el techo predominan areniscas hasta de 2,0 m. de espesor estratificadas con capas de arcillolitas laminares hasta de 0,5 m., dichas areniscas presentan marcas de olas y parten en lajas de espesores menores a 0,10 m. En esta secuencia se estratifican también varios mantos de carbón no coquizable de los cuales dos tienen espesores que varían desde 0,7 m. hasta 1,4 m. El espesor total de la formación es del orden de 500 m.

1.7.2 Geología local. En la zona de estudio la geología local está compuesta por la formación Mirador la cual se encuentra dividida por la Falla la regadera a través de la cual pasa una quebrada con el mismo nombre. A través de esta formación se pretende construir un túnel que permita alcanzar las vetas de carbón de la formación los Cuervos.

1.0	ED	AD		ESPESOR	LITOLOGÍA	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA
	Cuator	Reciente			Qat Qi	Aluviones, pedimentos, demumbes, terrazas
		Pliocono	0110	50	0 Formación Necesidad	
CENOZOICO	TERCIARIO	Míoceno Oligoceno Eoceno		800 - 2640		Grupo Guayabo
S 2 4 6 4				350 - 785		Formación León
				410 - 720		C Formación Carbonera C C
				160 - 450	Ten	Formación Mirador
		Paleoceno		245 - 490	12111211, 12111211, 12111211, 1211121,	C Formación Los Cuervos
				150 - 275	Tpb	Formación Barco
				100 - 300	Tset	Formación Catatumbo
0			uperior	275 - 420	Ksm	Formación Mito Juán
DIC		60	รั	215 - 460	Ksc	Formación Colón
ozo		tac	1	45 - 86	Ka I I I	Formación La Luna
MESO		Cre	.9	218 - 435		Formación Cogolio
			Med	418 - 503	225.225.2 235.235.2 51.255.2 51.2	Aguardiente Formación Uribante Mercedes Tibú
DICO DICO DICO DICO DICO DICO DICO DICO		Rocas Cristalinas			Esquistas Neises	
						Intrusivos Granfiticos
		a		Carbón		4 0
		de cuarzo	1. 1.	Arcillolita		

Imagen 6. Litología columna estratigráfica generalizada

Fuente: MINERCOL, 2013

La formación Mirador se encuentra entre la formación carbonera y la formación cuervos en dirección noreste. Su extensión geográfica va desde el Zulia suroccidental en el estado Táchira en Venezuela pasando por la Donjuana, Cerrotasajero en el departamento Norte de Santander en Colombia y los llanos orientales. Su topografía resalta por formar filas en una aparente continuidad por donde se han agrupado las formaciones: Barco, Los Cuervos, Mirador y Carbonera.

Imagen 7. Mapa modificado del plano Nº1 del Bloque la Sorzana



Fuente: INGEOMINAS, MINERCOL, Sergein Ltda. Adecuación de áreas de minería de carbón en las zonas de la Sorzana y san Pedro, 2002.

Su nombre se debe a la secuencia de areniscas del cerro El Mirador en el estado Táchira; fue usado por Loys en 1918 en un informe difundido por (GARNER, 1926), y detallado por (NOTESTEIN, 1944.).

En la imagen 8 se vislumbra una panorámica de la formación mirador y de la falla la regadera en sus vistas frontal y posterior. En la parte inferior de la fotografía, se contemplan las labores actuales realizadas por el consorcio minero los Laches en los mantos de la formación cuervos; mientras que en la parte superior se aprecia la zona donde iniciarán los trabajos del túnel propuesto.

1.7.2.1 Litología. Según (GONZALEZ DE JUANA, y otros, 1980) la litología está caracterizada por areniscas blancas de grano fino a medio con capas delgadas de gránulos de cuarzo, presencia de carbonatos e intercalaciones de lutitas en algunas regiones al norte de Venezuela.

En una publicación del año 1948, el Staff of Caribbean Petroleum seccionó informalmente la formación rocosa en tres unidades denominadas como: arenisca inferior, lutita intermedia" y "Arenisca Superior". El intervalo inferior, constituido por

areniscas de grano grueso intercaladas con arcillas limo arenosas. Hacia el sur, areniscas de grano fino laminadas con presencia de conglomeraciones. El intervalo medio es un intervalo lutitico o arcillolita de color gris claro de hasta 20 m que según el Staff de Caibbean Petroleum Co. (1948) no tienen continuidad hacia el sur y desaparece. El intervalo superior son areniscas cuarzosas de grano grueso a conglomeraticos



Imagen 8. Fotografía panorámica de la formación Mirador

Fuente: Propia

Azpiritxaga y Casa (1989) sólo identificaron dos unidades sedimentarias: una en la base de la formación caracterizada por facies en crecimiento del tamaño de grano hacia el tope y la segunda con litología homogénea con facies de areniscas de grano fino y estratificación cruzada en presencia de restos de vegetación.

De igual forma, Fajardo (2000) distinguió dos miembros: el inferior constituido por areniscas de grano medio a grueso con estratificación delgada en la parte superior; y la superior conformado por areniscas cuarzosas que aumentan el espesor a medida que asciende estratigráficamente.

1.7.2.2 Espesor. El espesor de la formación mirador muestra cambios drásticos que aumentan de manera irregular en sentido noroeste. En Colombia, en el Casanare y Arauca se muestran espesores de 88 m en el pozo Chiguiro-uno, 103 m en el pozo pituco (INGEOMINAS, 2010) y de 341 m en la Quebrada la Selva en Norte de Santander INGEOMINAS (1980).

Imagen 9: Fotografía del Espesor de la formación Mirador en la Quebrada la Regadera en Colombia.



Fuente: Propia

El contacto superior con la formación carbonera se marca donde las areniscas de color claro del Mirador dan paso a lutitas carbonosas (Ramirez y Campos, 1972). Mientras que el contacto inferior se traza con las arcillolitas y limolitas de la formación cuervos, que cambia visiblemente de color claro a oscuro.

1.7.2.3 Era geológica. La formación Mirador se sedimentó en la era Cenozoica en el Periodo Paleogeno en la época del Eoceno, alrededor de 40 millones de años antes de cristo. De acuerdo a las especies palinológicas encontradas: Cicatricosisporitis dorongensis, Jandufouria seamrogiformis y spirasyncolpites spiralis, se le atribuye la edad del Eoceno- Oligoceno temprano (INGEOMINAS, 2010); entre el Eoceno Medio tardío (NOTESTEIN, 1944.) (GONZALEZ DE JUANA, 1951) y el Oligoceno medio (LIDDLE, 1946).

1.7.2.4 Influencia marina. La depositación de la formación Mirador tuvo lugar durante el Eoceno Tardio en un ambiente fluvial en la base y transicional en el tope en ausencia de influencia marina a causa de una topografía elevada Santos, Jaramillo, Torres, Rueda, Flórez y Rodríguez (2007). Lo anterior fue corroborado mediante los índices de salinidad en diferentes perforaciones realizadas en Colombia.

Imagen 10. Columna estratigráfica de la formación Mirador

400 m. Cubierto. 1.30 m. Arenisco gris verder 10.20 m. Cubierto. 2.90 m. Intercatociones de o de color gris claro. 2.20 m. Arenisco de color ven 1.80 m. Cubierto 2.20 m. Arenisco conglomert 5.50 m. Cubierto 2.70 m. Arenisco conglomert 5.00 m. Cubierto 1.50 m. Cubierto 1.50 m. Cubierto 1.50 m. Cubierto 2cm 12.50 m. Cubierto 2.50 m. Arenisc 1.70 m. Arenisc 6.50 m. Cubiert 8.50 m. Arenisc da color blonco, gris claro gi cilluta color aris con 6 6 341 mts 4.10 m parte media. Las banc 0.4 92.00 m. 3 æ 0 0 A æ M 10.00 m. Cubierto 1.86 m. 12.70 m Cubierte ACION gris verdaso con estratrific ta de 0.40m 11.50 m. Cub 13.70 M de 2 50 m æ 8.50 m tritercalaciones de arenis gris en capas de 0.30 m 0 1150 m Arenisca de color bli 2.00 m 4 icas a color 999 45.00 m. Arenisoas de color gris claro grano fim contos hasta de 5cm. de diámetro. Areniscos de color grís claro compactas de grano medio - grueso en parte conglomensico con 21.00 m. 0.70 m. de espesor con comento arciltos (colori) con contes menores de 2.cm. de diámetro ester mediano, hocia la base areniscos de grano fino - muy fino de color bitonco. ente congrossi icidod y redor

Fuente: INGEOMINAS, 2013

La clasificación geo mecánica proporciona una evaluación global del macizo rocoso a partir de observaciones de campo. Para empezar se describirán las propiedades básicas de la matriz rocosa de la arenisca. En seguida se calcularan las principales clasificaciones del macizo rocoso, como son: el RQD, el RMR, el Q de Barton y el GSI.

2.1 PROPIEDADES DE LA MATRIZ ROCOSA

Las propiedades físicas son resultado de la composición mineralógica, la historia geológica ambiental incluyendo su meteorización. Estas propiedades determinan el comportamiento mecánico.

La mecánica de solidos asume un comportamiento homogéneo que las rocas no tienen. La diferente composición química representa su variabilidad como consecuencia de la historia geológica, los poros, discontinuidades entre otros.

A escala de macizo, la matriz rocosa suele considerarse como un material isótropo. A nivel de probeta estas propiedades deben ser investigadas en detalle, aunque tendrán menor importancia en el estudio de macizos rocosos resistentes, donde los bloques pueden ser considerados homogéneos.

Las discontinuidades también son relativas según su escala ya que si afectan al comportamiento del macizo debe estudiarse por separado.

En la tabla 01 se definen los parámetros básicos para la identificación de las propiedades básicas de las rocas:

2.1.1 Porosidad. Es la relación entre el volumen ocupado por los huecos o poros en la roca. Esta propiedad es la que más afecta las características resistentes y es inversamente proporcional a la resistencia, la densidad; además es proporcional a la deformabilidad, ya que la existencia de poros puede dar lugar a zonas de debilidad. En las rocas sedimentarias los valores de porosidad son muy elevados.

2.1.2 Peso específico. Se define como el peso por unidad de volumen. Las rocas presentan una gran variación de valores de peso específico a diferencia de los suelos.

2.1.3 Humedad. El contenido de humedad (w) se llama también contenido de agua y se define como la relación del peso del agua entre el peso de solido en un volumen dado de roca.

	Propiedades			
	Composición mineralógica			
	Fabrica y textura			
	Tamaño de grano			
Draniadadaa da	Color			
Propiedades de	Porosidad			
	Peso especifico			
Clasificación	Contenido de humedad			
	Permeabilidad			
	Durabilidad			
	Alterabilidad			
	Resistencia a la compresión simple σ_c			
	Resistencia a la tracción σ _t			
Propiodados mosánicas	Velocidad de ondas sónicas Vp, Vs			
Fropiedades mecanicas	Resistencia (parámetros c y Φ)			
	Deformabilidad (módulos de deformación elástica E, v)			
Eventer VALLEIO, Luis, Ingeniería, Caelogía, Madrid, Dreptica, Lall. 2004				

Tabla 1. Propiedades básicas de la matriz rocosa

Fuente: VALLEJO, Luis. Ingeniería Geología. Madrid: Prentice Hall. 2004.

2.1.4 Permeabilidad. La permeabilidad es la propiedad que permite pasar o retener el agua a través de los vacíos de una roca, esta se mide por el cociente de permeabilidad. La resistencia del flujo depende del tipo de roca, la geometría de los poros en la roca y la tensión superficial del agua (temperatura y viscosidad). El coeficiente de permeabilidad esta entonces en función del tipo de roca, tamaño de poro, el aire atrapado en los poros, la temperatura de la roca y la viscosidad del agua (GOEL, 1999).

Debido a la irregularidad de las rocas la permeabilidad varía. La mayoría de estas presentan permeabilidades bajas y el flujo del agua se produce a favor de los poros y fisuras. En la mayoría de las rocas el flujo sigue la ley de Darcy.

2.1.5 Durabilidad. Es la resistencia que la roca presenta a los procesos de alteración y desintegración La durabilidad de la roca aumenta con la densidad y disminuye con el contenido de agua. Este se evalúa mediante el ensayo de sequedad humedad desmoronamiento o slake durability test (SDT).

2.1.6 Alterabilidad. Se define como alterabilidad de una roca o de una obra a la velocidad de alteración en el tiempo. Esta definición se hace más evidente cuando se compara un volumen determinado, para una misma roca en las condiciones del estado de su composición mineralógicas, texturas y estructuras.

2.1.7 Resistencia a la compresión simple. La resistencia a la compresión simple es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial. Este permite clasificar la roca por su resistencia.

2.1.8 Resistencia a la tracción. La resistencia a la tracción es el máximo esfuerzo que soporta el material ante la rotura por tracción.

2.1.9 Velocidad de ondas sónicas Vp y Vs. La velocidad de propagación de las ondas al atravesar la roca depende de la densidad y las propiedades elásticas del material, lo cual aporta información de su porosidad.

La velocidad de compresión (Vp) también conocida como onda primaria, son ondas longitudinales en el cual el suelo es comprimido y dilatado en dirección de la propagación. Nos sirve para clasificar la roca ya que se relaciona linealmente con la resistencia a la compresión simple. Viajan a través de sólido y líquido a una velocidad 1,8 veces la velocidad de la onda Vs. En rocas la velocidad varía entre 1000 a 6000 m/s. Por debajo de 900 m/s se encuentran las rocas meteorizadas y las más competentes como el granito por el orden de los 6000 m/s.

La velocidad de onda transversal (Vs), también conocida como onda secundaria, se desplaza de forma transversal a la dirección de propagación. Su velocidad es menor que la de las ondas primarias. Debido a ello, éstas aparecen en el terreno algo después que las primeras. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños. Sólo se trasladan a través de elementos sólidos.

2.1.10 Cohesión. La resistencia por cohesión es definida como la medida de las fuerzas que cementas las partículas de roca. La cohesión puede ser establecida a partir de los ensayos y del trazado de la envolvente de falla, esta puede ser determinada como el intercepto de la línea de falla con el plano vertical.

2.1.11 Angulo de fricción. Es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca, el cual permite determinar la resistencia al deslizamiento. En la mayoría de las

rocas ente ángulo varía entre 25 y 45 grados. La fuerza friccional depende del ángulo de fricción y del esfuerzo normal que actúa sobre el plano considerado.

2.1.12 Modulo de Young. Es una constante de proporcionalidad conocido como módulo de elasticidad. En el campo elástico, la deformación es proporcional al esfuerzo y se cumple la relación: $E = \sigma/\epsilon_{ax}$

A partir de un determinado nivel de deformaciones, la roca no puede mantener el comportamiento elástico, llegando a un punto donde se comienzan a producir deformaciones dúctiles o plásticas y no se cumple la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación.

2.1.13 Coeficiente de Poisson. Es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento vertical y ensanchamiento horizontal de un material al ser comprimido. Se define según la relación: v= ϵ_t / ϵ_{ax} , donde ϵ_t es la deformación transversal y ϵ_{ax} es la deformación axial.

En la tabla 02 se muestran los valores típicos en las areniscas.

Propiedad	Símbolo	Valor
Porosidad %	Р	5-25 (16)
Peso específico (g/cm3)	Ý	2,3-2,6
Permeabilidad (m/s)	k	10 ⁻⁵ – 10 ⁻¹⁰
Resistencia a la compresión simple (MPa)	σ_{c}	54-137
Resistencia a la tracción (MPa)	σ_{t}	5-20
Velocidad de propagación de las ondas Vp (m/s)	Vp	1400-4200
Cohesión (kp/cm2)	С	80-350
Angulo de fricción (grados)	Φ	27-45
Módulo de Young estatico (Kg/cm2 x 10E5)		0.3-6.1
estático	E	0,5-0,1
Módulo de Young dinámico (Kg/cm2 x 10E5)	E	0,5-5,6
Coeficiente de Poisson	V	0,1-0,4
Fuente: (GOODMAN, 1989) (RAHN, 1986). (W	ALTHAN, 1999)	(FARMER, 1968)
(VALLEJO, 2004)		

Tabla 2. Valores típicos en las areniscas.

2.2 RQD

La clasificación de Deere o del RQD (RQD = Rock Quality Designation) se funda en la cuantificación del grado de fractura de la roca.

La calidad de roca RQD se determina a partir de juntas Jv que indican el número de juntas por m3 observadas en el afloramiento mediante la fórmula de Palstrom (ISRM, 1981):

La calidad de la roca se obtiene a partir del índice RQD con base en la tabla 03.

Tabla 3. Calidad de la roca a partir del Índice de calidad RQD

Índice de Calidad RQD %	Calidad
0 -25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 - 100	Excelente.

Fuente: VALLEJO, Luis I. Ingeniería Geología. Madrid: Prentice Hall. 2004.

Siguiendo el procedimiento anterior, se observa que la forma de los bloques del macizo rocoso de la formación Mirador es equidimensional. A nivel general se presentan tres familias de juntas dominantes, aproximadamente ortogonales con muy pocas diaclasas ocasionales. Aunque una de las familias tiene poca persistencia, se encuentra bien definida (ver Imagen 11).

Imagen 11. Bloques con tres familias de juntas. A la izquierda un bloque equidimensional, a la derecha el bloque de la formación Mirador



Fuente: Propia

A continuación, se registran las familias de discontinuidades como se muestra en la tabla 04.

Tabla 4. Registro de las familias de discontinuidad

Familia	Buzamiento	Separación entre las diaclasas	#discontinuidades /Longitud
Familia 1	45°	0.2 mm	2
Familia 2	56°	0.2 mm	2
Familia 3	85°	0.2 mm	1
		Jv	5

Fuente: Propia

Siendo Jv la sumatoria de discontinuidades por longitud. Así, para un macizo con tres familias de discontinuidades (J1, J2 y J3), Jv será la sumatoria del número de discontinuidades por longitud de J1, J2 y J3 respectivamente, obteniéndose un Jv de cinco.

A partir del registro anterior, se calcula el índice de calidad de la roca por medio de la fórmula de Palstrom:

2.3 RMR

La clasificación geomecánica o clasificación del macizo rocoso RMR fue desarrollado por el consejo sudafricano de investigación científica e industrial (CSIR) por Bieniawski en 1973 sobre la base de sus experiencias en túneles poco profundos en rocas sedimentarias. Desde entonces, la clasificación ha sido objeto de varios cambios significativos desde la disminución de parámetros, los ajustes de reducción y su adopción a la norma ISRM.

La calificación RMR es determinada como la suma algebraica de las calificaciones de todos los parámetros indicados, seguido de los ajustes para la orientación de discontinuidades.

- La resistencia a la compresión
- El índice RQD
- La separación entre diaclasas
- El estado de las discontinuidades
- El agua freática
- Corrección por la orientación de las discontinuidades

2.3.1 La resistencia a la compresión. Este parámetro debe obtenerse de muestras de roca intacta en el laboratorio. La clasificación de este parámetro se muestra en la tabla 5 con base en los resultados de los ensayos de compresión (ver capítulo 3.3):

Resistencia a la compresión simple (Mpa)	Puntuación
>250	15
100-250	12
50-100	7
25-50	4
5-25	2
1-5	1
<1	0

Tabla 5. Parámetro de resistencia para el cálculo del RMR

Fuente: BHAWANI, Singh, & R.K, Goel. Rock mass classification. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999.

2.3.2 El índice RQD. Es el índice que indica el grado de facturación de la roca. La puntuación de este parámetro se detalla en la tabla 6 con base en los resultados de la clasificación RQD (ver capítulo 2.2):

Tabla 6. Puntuación del parámetro RQD

Descripción	RQD	Puntuación
Excelente	90-100	20
Bueno	75-90	17
Medio	50-75	13
Bajo	25-50	8
Muy Bajo	<25	3

Fuente: BHAWANI, Singh & R.K., Goel. Rock mass classification. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999.

2.3.3 La separación entre diaclasas. Este parámetro se encuentra en las superficies de debilidad incluyendo juntas, articulaciones, foliaciones, cizallamientos, fallas leves y otros. La tabla 7 muestra la puntuación de este parámetro con fundamento en el espaciamiento entre diaclasas.
Tabla 7. Separación entre diaclasas para el cálculo del RMR

Descripción	Espaciamiento (m)	Puntuación
Muy ancho	>2	20
Ancho	0,6-2	15
Moderadamente cerrado	0,2-0,6	10
Cerrado	0,06-0,2	8
Muy cerrado	<0,06	5

Fuente: BHAWANI, Singh & R.K., Goel. Rock mass classification. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999.

2.3.4 El estado de las discontinuidades. Este parámetro incluye la rugosidad de las superficies de discontinuidad, su separación, longitud o continuidad, el interperismo de las paredes de roca o los planos de debilidad y el material de relleno. El estado de las discontinuidades se califica en la tabla 8:

Tabla 8. Estado de discontinuidades para el cálculo del RMR

Descripción	Puntuación
Muy rugosa, protegida de la intemperie, pared de roca firme y discontinuo sin	
separación	30
Áspero y ligeramente degradado, pared de roca superficie de separación menor a 1	
mm	25
Un poco áspero, de moderado a altamente meteorizado, con superficie de separación	
menor a 1 mm	20
Superficie ligeramente pulida con superficie de separación de 1 a 5 mm	10
Superficie suave a liso con superficie de separación de 1 a 5 mm	0

Fuente: BHAWANI, Singh & R.K., Goel. Rock mass classification. Oxford: Elsevier

Science Ltd, 1999.

2.3.5 El agua freática. Este parámetro determina el grado de humedad o tasa de flujo presente en el túnel calificándose según las condiciones de agua del macizo.

En el caso de túneles de puede determinar la tasa de flujo de entrada de agua o definir un estado general como seco, húmedo o fluido, para lo cual se utiliza la tabla 9.

Tabla 3. Otado de Humedad para el calculo del Mill	Tabla 9.	Grado de	humedad	para el	cálculo	del RMF
--	----------	----------	---------	---------	---------	---------

Descripción	Flujo para 10 m de túnel	Presión de agua en las diaclasas	Puntuación
Completamente			
seco	ninguno	0	15
Húmedo	<10	0-0,1	10
Mojado	10-25	0,1-0,2	7
Goteo	25-125	0,2-0,5	4
Fluido	>125	>0,5	0

Fuente: BHAWANI, Singh & R.K., Goel. Rock mass classification. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999.

2.3.6 Corrección por la orientación de las discontinuidades. Esta correccion se realiza analizando la orientación del túnel tal como lo indica la siguiente Imagen 12.

Imagen 12. Favorabilidad de un túnel.



Fuente: BHAWANI, Singh & R.K., Goel. Rock mass classification. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999.

2.3.7 Resultados de la clasificación RMR. Los resultados de la clasificación RMR se muestran en la tabla 10, los cuales se realizaron del análisis del macizo mediante observaciones de campo sobre los taludes de la formación mirador a través de la falla la regadera.

Tabla 10. Resultados de la clasificación RMR basados en trabajo de campo

Parámetros de clasificación		Puntuación	
Resistencia de la ma	atriz rocosa (MPa)	100-50	7
RQD		90%-100%	20
Separación de diacla	asas	0,6 - 2 m	15
	Longitud de la discontinuidad	1-3 m	4
Estado de las	Abertura	Nada	6
discontinuidades	Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
	Relleno	Ninguno	6

	Altoración	Inaltorada	6
1	Alleracion	Inditeratia	0
	Caudal por 10 m de túnel	<10 litros/min	
Agua freática	Relación: Presión de agua/ Tensión principal mayor	0-0,1	10
	Estado general	Ligeramente húmedo	
Corrección por la orientación de las discontinuidades	Dirección y buzamiento	Medianamente favorable	-5
Clasificación	Clase 2 - calidad buena	Valor RMR	72
Fuente: Propia			

2.4 Q DE BARTON

Barton, Lien y Lunde (BARTON, 1974) en el Instituto Geotécnico de Noruega (NGI) propusieron el sistema Q de clasificación de macizo rocoso sobre la base de alrededor de 200 casos de túneles.

La Clasificación de Q oscila entre 0,001 y 1000 como se ilustra en la tabla 11:

Q (rock mass quality)	Valoración
0,001 - 0,01	Excepcionalmente mala
0,01 - 0,1	Extremadamente mala
0,1 - 1.0	Muy mala
1,0 - 4	Mala
4 – 10	Regular
10 - 40	Buena
40 – 100	Muy buena
100 - 400	Extremadamente buena
400 - 1000	Excepcionalmente buena

Tabla 11. Valoración del Q de Barton

Fuente: BHAWANI, Singh & R.K., Goel. Rock mass classification. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999.

Por consiguiente, se ha definido el macizo rocoso de calidad Q como:

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

Donde,

RQD = Designación de la calidad de la roca de Deere ≥ 10cm

 J_n = numero de juntas

 J_r = numero de rugosidad de la junta

 J_a = numero de alteración J_w = factor de reducción de agua de la junta SRF =factor de reducción de esfuerzos

Estos autores consideran esta clasificación tomando en cuenta el RQD relacionándola con los seis parámetros anteriores. El primer coeficiente RQD/ J_n representa en la formula el tamaño de los Bloques, donde J_n Representa el numero de conjuntos de diaclasas. El segundo coeficiente J_r/J_a representa en la formula la resistencia al corte de los bloques. El tercer y último coeficiente J_w/SRF representa en la formula el macizo rocoso.

2.4.1 Índice RQD. Es el índice de Deere que depende del grado de fractura de la roca. La deducción de este parámetro se detalla en el capítulo 2.2.

2.4.2 Numero de juntas J_n . El parámetro Jn representa el número de familias de discontinuidad, el cual es usualmente afectado por foliaciones, esquistosidad. Aquellas diaclasas que se repiten en forma paralela son consideradas como una familia de discontinuidad y las que solo aparecen de forma ocasional son consideradas como una probable familia de discontinuidad.

Para identificar los juegos dominantes de discontinuidades se debe tener el cuenta la forma de los bloques con el fin de analizar la persistencia e irregularidad conque se presentan, tal como lo indica la siguiente Imagen 13:

Imagen 13. Forma de los bloques en los macizos rocosos. A. Poliédricos. Tabulares. C. Prismáticos. D. Equidimensionales. E. Romboidales. F. Columnares



Fuente: (Universidad Nacional de Cordoba, QUINTANA C. E., 1991)

La Tabla 12 muestra la puntuación de este parámetro con fundamento en el número de familias.

Tabla 12. Puntuación del parámetro Jn

Jn número de familias valor	Puntuación
Roca masiva	0,5 – 1
Una familia de juntas	2
Id. con otras juntas ocasionales	3
Dos familias de juntas	4
Id. con otras juntas ocasionales	6
Tres familias de juntas	9
Id. con otras juntas ocasionales	12
Cuatro o más familias, roca muy fracturada	15
Roca triturada	20

Fuente: BHAWANI, Singh & R.K., Goel. Rock mass classification. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999

2.4.3 Número de rugosidad de la junta J_r . El parámetro Jr representa la rugosidad de las paredes de diaclasas. El Jr puede ser obtenido de una junta determinada tomando siempre el caso más desfavorable.

La tabla 13 muestra la puntuación de este parámetro con fundamento en el grado de rugosidad.

Tabla 13. Puntuación del parámetro Jr

Jr coeficiente de rugosidad de la junta valor	Puntuación	
Juntas (contacto entre las dos caras)		
Discontinuas	4	
Onduladas, rugosas	3	
Onduladas, lisas	2	
Onduladas, perfectamente lisas	1,5	
Planas, rugosas o irregulares	1,5	
Planas, lisas	1	
Planas y perfectamente lisas	0,5	
Juntas rellenas(relleno impide contacto entre las dos caras)		
Material arcilloso	1	
Material arenoso, de grava o triturado	1	

Fuente: BHAWANI, Singh & R.K., Goel. Rock mass classification. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999

2.4.4 Numero de alteración J_a . El parámetro Ja representa el grado de alteración de las paredes de diaclasas o el material de relleno. El Ja puede ser obtenido de una junta determinada tomando siempre el caso más desfavorable.

El número de alteración de las paredes de diaclasas se deduce de la tabla 14.

Tabla 14. Puntuación del parámetro Ja

Ja coeficiente de alteración de la junta valor	Puntuación	
Juntas (sin minerales de relleno intermedios)		
Juntas de paredes sanas	0,75 – 1	
Ligera alteración	0,75 – 1	
Alteraciones arcillosas	4	
Juntas (minerales de relleno en pequeño espesor)		
Con partículas arenosas	4	
Con minerales arcillosos no blandos	6	
Con minerales arcillosos blandos	8	
Con minerales arcillosos expansivos	8 – 12	
Juntas (minerales de relleno en gran espesor)		
Con roca triturada/desintegrada y arcilla	6 – 12	
Con zonas de arcilla limosa o arenosa	5	
Con zonas de arcillosos (espesor grueso)	10 - 20	
Fuente: (BHAWANI SINGH 1999)		

Fuence: (BRAWAINI SINGR, 1999)

2.4.5 Factor de reducción de agua de la junta J_w . El parámetro Jw es una medida de la presión del agua que tiene efecto adverso en la resistencia a la cizalladura de las juntas. Esto es debido a la reducción en la tensión a través de las articulaciones.

El agua además puede provocar el ablandamiento y lavar la arcilla presente en las articulaciones. Para obtener el grado de reducción de agua se utiliza la tabla 15.

Tabla 15. Puntuación del parámetro Jw

1
0,66
0,5
0,33
0,2 - 0,1
0,1 – 0,05

Fuente: (BHAWANI SINGH, 1999)

2.4.6 Factor de reducción de esfuerzos SRF. El factor de reducción de esfuerzos es una medida de la perdida de presión en el caso de excavaciones a través de zonas de cizalla. Este factor se estima de la tabla 16.

Tabla 16. Puntuación del parámetro SRF

SRF Valor	Puntuación	
Zonas débiles intersectan a la excavación:		
Multitud de zonas débiles o milonitos	10	
Zonas débiles aisladas, con arcilla o roca descompuesta (cobertura ≤		
50 m)	5	
Id. con cobertura > 50 m	2,5	
Abundantes zonas débiles en roca competente	7,5	
Zonas débiles aisladas en roca competente (cobertura ≤ 50 m)	5	
Id. con cobertura > 50 m	2,5	
Roca competente (problemas tensionales en las rocas)		
Bajas presiones, $qc/\sigma_1 > 200$	2,5	
Medianas presiones , qc/ σ_1 200-10	1	
Altas presiones, qc/ σ_1 10-5	0,5 – 2	
Rocas deformables (flujo plástico de roca)		
Con bajas presiones	5 – 10	
Con altas presiones	10 – 20	
Rocas expansivas		
Con presión de hinchamiento moderada	5 – 10	
Con presión de hinchamiento alta	10-15	

Fuente: (BHAWANI SINGH, 1999)

Conociendo que es una roca competente, que el esfuerzo de compresión simple es de 86.6 MPa (ver capítulo 3.3) y que el esfuerzo principal es de 13.5 MPa (ver capítulo 4.1.1) se tiene que:

$$qc/\sigma_1 = 86.62/13.5$$

= 6.4

Con lo que se estima un factor SWF de 0,6

2.4.7 Resultados de la clasificación Q. Se caracteriza el macizo rocoso a partir de los parámetros RQD, Jn, Ja, Jr, Jw, y SWF .Los resultados de la clasificación Q se muestran en la tabla 17. Este análisis se realizó mediante observaciones de campo sobre los taludes de la formación mirador a través de la falla la regadera.

En todos los casos, fueron valoradas las condiciones más desfavorables posibles. Es así como se señaló un coeficiente de afluencia media de agua como coeficiente reductor por presencia de agua, ante una posible incertidumbre causada por filtraciones.

Parámetro	Descripción	Valor
RQD	Calidad de roca regular	98,5
Jn	Tres familias de discontinuidad	9
lr	Rugosas o irregulares, corrugadas Paredes	
JI	ligeramente alteradas,	3
Ja	Juntas de paredes sanas o ligera alteración	1
Jw	Afluencia media con lavado de algunas juntas	0,66
SRF	Altas presiones, qc/ σ_1 10-5	0,6
Valor Q	Calidad de roca Buena	36,1

Tabla 17. Resumen de la caracterización Q de Barton

Fuente: Propia

El índice de calidad Q es calculado reemplazando los parámetros indicados como sigue:

$$Q = \frac{\text{RQD}}{J_n} x \frac{J_r}{J_a} x \frac{J_w}{\text{SRF}}$$
$$Q = \frac{98,5}{9} x \frac{3}{1} x \frac{0,66}{0,6}$$
$$Q = 36,1$$

2.5 GSI

Hoek y Brown (HOEK, 1997) introdujeron el índice de resistencia geológica tanto para masas de roca dura y débil. Los ingenieros y geólogos de campo en general se mostraron agradados con una clasificación simple, rápida y fiable basada en la inspección visual de las condiciones geológicas. Además, sugieren que esta clasificación no sea lineal en rocas pobres con gran deterioro. Basados en estas necesidades, ideadas en especial para la simulación de estructuras rocosas por computación, Hoek y Brown (HOEK, 1997) idearon gráficos simples para la estimación del GSI sobre la base de las siguientes correlaciones:

GS/= RMR -5	para GSI≥18 o RMR≥23
GSI= 9 LnQ +44	para GSI<18

Donde,

Q= índice de calidad modificado para tuneles RMR= Índice del macizo rocoso (Bieniawski, 1989) Estos gráficos se resumen en la carta para GSI la cual sirve para clasificar el macizo rocoso mediante inspección visual, basado en los cuatro parámetros adoptados de la clasificación de Terzagui.

Atendiendo las instrucciones anteriores, y teniendo en cuenta que se cuenta con un RMR≥23, se dice que:

GSI = RMR - 5 para $GSI \ge 18 \circ RMR \ge 23$

La imagen 14 nos confronta el valor obtenido de GSI para un macio rocoso sin alterar, con bloques en contacto de forma cubica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales sin relleno y condiciones de frente muy buenas con superficies muy rugosas sin alterar.

Imagen 14. Estimación del GSI con base en descripciones geológicas.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX					es Dg	es
According to geological conditions, pick the appropriate box in this chart. Estimate the			ained	altered	surfao containi	surfao
Index GSI from the contours		id surface:	ed, iron sta	athered or	veathered or fillings	reathered fillings
	NDITION	weathere	weathere	ately wea	highly v oatings o	nighly w atings or
	SCONTINUIT	ERY GOOD sry rough, un	DOD ugh, slightly ffaces	IR hooth, moder faces	OR ckensided, 1 h compact c gular rock fra	RY POOR ckensided. 1 h soft clay co
STRUCTURE	222	55	N N N	FA	Sili	with VE
BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets		80				
VERY BLOCKY - interlocked, partially distributed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets			60 50			[]
BLOCKY/FOLDED - folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks				40	30	
CRUSHED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks						10/10

Fuente: (HOEK, 1997)

2.6 RESUMEN DE LA CARACTERIZACION GEOMECANICA

A continuación se presenta un resumen de la caracterización geo mecánica obtenida por los métodos de clasificación RMR, RQD, Q de Barton y GSI.

Tabla 18. Resumen de la caracterización geo mecánica

Clasificación	Puntuación	Descripción de la calidad de la roca
RMR	67	Buena
RQD	98,5	Excelente
Q de Barton	36,1	Buena
GSI	67	Muy Buena

Fuente: Propia

3. ENSAYOS DE ROCAS

Los ensayos de rocas sirven para determinar los parámetros del macizo rocoso y diseñar el modelo geotécnico para el túnel propuesto. Dentro de los ensayos realizados están el esclerómetrico, el petrográfico, el de compresión inconfinada, el de tracción, y el de ultrasonido.

Una vez realizada la caracterización del macizo, se procedió a extraer la roca con martillo picador y cortadora con disco diamantado como se observa en la imagen 15.



Imagen 15. Fotografías de la extracción de la roca con martillo y disco diamantado

Fuente: Propia

A través de la falla la regadera se obtuvo un bloque de muestra cada 50 metros, tomando como factor restrictivo el costo de los ensayos. Las coordenadas donde se tomaron las muestras se observan en la tabla 19.

Imagen 16. Muestras tomadas en campo a través de la falla la regadera



Fuente: Propia

Muestra	Este	Norte
M1	1161794	1346551
M2	1161765	1346544
M3	1161745	1346578
M4	1161651	1346679

Tabla 19. Coordenadas planas de las muestras tomadas (Datum Bogota)

Fuente: Propia

Imagen 17. Ubicación de la toma de muestras



Fuente: Software Google Earth

A continuación las muestras se extrajeron de los bloques para obtener un diámetro de aproximadamente 50,8 mm por medio del extractor de núcleos. En seguida se procede a realizar el pulido de las caras, la medición de los núcleos y su colocación en la maquina universal.

Imagen 18. Fotografía del pulido, medición y alistamiento de los núcleos.



Fuente: Propia

Los ensayos de laboratorio se realizaron en la escuela de petróleos de la universidad Central de Venezuela en la maquina universal GCTS Testing system (ver imagen 19)



Imagen 19. Equipo servo-controlado de ensayos triaxiales sobre rocas (RDS-500).

Fuente: www.gcts.com. (Geotechnical Consulting and Testing Systems)

3.1 ENSAYO ESCLERÓMETRICO

Es un ensayo no destructivo que proporciona valores aproximados para la determinación de la resistencia a la compresión insitu de las paredes del macizo rocoso. Su funcionamiento consiste en una pesa tensada que es lanzada contra la roca y mide su rebote. Su valor de rebote R permite medir la dureza y correlacionarlo con la compresión simple.

Para su utilización se "tara" el martillo usando el yunque patrón. Se hacen 10 medidas y se calcula la media. El factor de corrección se calcula como:

Factor de corrección =
$$\frac{Valor estandar del yunque patron}{media de las 10 medidas}$$

La resistencia a la compresión inconfinada (oci) es relacionada con el rebote del martillo de Schmidt, utilizando la expresión desarrollada por (Dincer, 2004):

$$\sigma \sigma_{ci}$$
= 2,75R -36,83

Donde R es el rebote del martillo Schmidt.

Se realizó la toma de datos perpendicularmente al buzamiento de la estratificación, tal como se representa en la imagen 20.

Imagen 20. Medición del rebote en 11 taludes de la formación Mirador



Fuente: Propia

Los resultados del ensayo esclerómetro tomados en los 11 taludes identificados arrojan una resistencia a la compresión de 112 MPa que según (VALLEJO, 2004) se clasifica como una roca R6 extremadamente dura, tal como se muestra en la tabla 21 y tomando como factor de corrección 1.2.

Tabla 20. Media del ensayo esclerómetro en la formación Mirador

Número de Taludes	Promedio Rebote	Dureza del rebote	Resistencia a la compresión inconfinada Mpa (Dincer 2004)	Clase (Gonzales de Vallejo 2002)
11	47	54	112	R6 Roca extremadamente dura

Fuente: Propia

3.2 ENSAYO PETROGRÁFICO

La Petrografía es el estudio al microscopio de las superficies pulidas, de rocas y materiales inmersos en resinas de índices de refracción conocido, que por exposición a la luz permiten analizar las secciones delgadas que proyectan.

El estudio petrográfico permite interpretar las propiedades físicas en función de sus componentes y características petrográficas: poros, fisuras, uniones intergranulares, anisotropías, minerales, composición química, etc. Esta práctica comprende el corte, pulido, elaboración de secciones delgadas y el análisis microscópico de la roca.

Para poder estudiar las muestras en el microscopio petrográfico fue necesario hacer previamente una preparación de la roca en las siguientes etapas:

Primero se secciona cada trozo de roca con una cortadora CLIPPER con disco de diamante de 35 pulgadas, para obtener superficies planas de las cuatro secciones de la roca, las cuales fueron identificadas como M1, M2, M3 y M4 de forma respectiva.

Se pule la superficie plana para eliminar las huellas de corte y obtener un plano lo más suave posible con una pulidora de disco marca BUEHLER.

Se fija la superficie pulida sobre un portaobjetos de vidrio con un agente cementante incoloro e isótropo como es la resina epoxica y se adhiere con una plancha de calentamiento.



Imagen 21. Fotografía de las muestras para el ensayo petrográfico

Fuente: Propia

Se recorta otra vez para obtener una sección fina con una cortadora PETROCUT marca BUEHLER (ver imagen 22)

Imagen 22. Fotografía de la cortadora PETROCUT marca BUEHLER



Fuente: Propia

Se desgasta la muestra hasta alcanzar un espesor de unas 30 micras, con un equipo de desbaste PETRO THIN marca BUEHLER, que mediante dos micrómetros de precisión controlan el recorte y adelgazamiento de la copa de desbaste.

Imagen 23. Fotografía del equipo de desbaste PETRO THIN marca BUEHLER



Fuente: Propia

Finalmente se cubre la muestra con un cubreobjetos pegándolo con resina de poliéster para pasarla por el microscopio de luz polarizada.

Imagen 24. Fotografía del microscopio de luz polarizada



Fuente: Propia

En la tabla 21 se comparan los componentes principales de las muestras M1, M2, M3 y M4, obtenidos del ensayo petrográfico.

Muestra	Granos %	Matriz %	Cemento %	Porosidad %
M-1	70	28	2	<1
M-2	90	5	3	2
M-3	70	8	20	2
M-4	65	30	5	< 1

Tabla	21.	Com	ponentes	princi	pales
i abia	<u> </u>	00111	pononicoo	printor	paioo

Fuente: JAIMES, Marlyne. Caracas, 4 de Julio de 2012

A continuación de describen las muestras analizadas en el laboratorio:

- La muestra M1 es una roca clástica, medianamente escogida, compuesta por granos de cuarzo en una matriz de óxido de hierro y arcilla. El cemento esta compuestos por minerales de hierro (óxido de hierro: hematita y carbonato de hierro: siderita). Sus granos son predominantemente de cuarzo de origen metamórfico. También se observan fragmentos de roca ricas en cuarzo (Chert y cuarcita). Esta muestra es muy similar a la muestra Santander M3

En la imagen 25 se observa la fotografía petrográfica de la muestra M1. En la parte superior: a la izquierda la vista general; a la derecha, la matriz de minerales de arcilla y óxidos de hierro. En la parte inferior: a la izquierda, la vista general de la muestra y los granos redondeados de cuarzo; a la derecha fragmento de roca Cuarita.

Imagen 25. Fotografía petrográfica de la muestra M1



Fuente JAIMES, Marlyne. Caracas, 4 de Julio de 2012

La MUESTRA M2 es una roca clástica, bien escogida, compuesta por granos de cuarzo en una matriz de óxido de hierro y arcilla. El cemento principal es cuarzo.. Sus granos predominantemente de cuarzo de origen metamórfico e ígneo (hipoabisal a volcánico). También se observan fragmentos de roca ricas en cuarzo (chert y cuarcita). Como minerales accesorios se observaron turmalina, epidoto, moscovita, circón y apatito. La presencia de los contactos observados en la muestra, así como el alto nivel de compactación indican efectos diagéneticos tardíos. La presencia de cuarzo de diferentes tipos indica dos posibles rocas fuertes, cuyos sedimentos presentan distintos grados de madurez. Esta muestra es muy similar a la muestra Santander M-4.

En la imagen 26 se observa la fotografía petrográfica de la muestra M2. En la izquierda, la vista general de la muestra. En la parte derecha, fragmento de Chert.



Imagen 26. Fotografía petrográfica de la muestra M2

Fuente: JAIMES, Marlyne. Caracas, 4 de Julio de 2012

La MUESTRA M3 es una roca clástica, bien escogida, compuesta por granos de cuarzo de distintas fuentes en una matriz de óxido de hierro y arcilla. El cemento principal es óxido de hierro y cuarzo. El tamaño de grano promedio es de 0,01 a 0,03 cm, pero se observan granos de hasta 0,5 mm. Dependiendo de la redondez los granos de cuarzo de pueden agrupar en los que son medianamente angulosos, de origen metamórfico, y los que son subredondeados a redondeados, de origen ígneo. Sus granos son predominantemente de cuarzo de origen metamórfico e ígneo (hipoabisal a volcánico). También se observan fragmentos de roca ricas en cuarzo (Chert y cuarcita). Como minerales accesorios se observaron turmalina, circón, apatito, moscovita y pirita. La presencia de los contactos observados en la muestra, así como el alto nivel de compactación indican efectos diagéneticos tardíos. La presencia de cuarzo de diferentes tipos indica dos posibles rocas fuertes, cuyos sedimentos presentan distintos grados de madurez.

En la imagen 27 se observa la fotografía petrográfica de la muestra M3. En la parte superior, la vista general y el cemento de óxidos de hierro. En la parte inferior, a la

izquierda, la vista general y los contactos cóncavo-convexos y suturados entre los granos de cuarzo; a la derecha, pequeño fragmento de Chert.



Imagen 27. Fotografía petrográfica de la muestra M3

Fuente: JAIMES, Marlyne. Caracas, 4 de Julio de 2012

La MUESTRA M4 es una roca clástica, medianamente escogida, compuesta por granos de cuarzo en una matriz de óxido de hierro y arcilla. El cemento principal es cuarzo. El tamaño de grano promedio es de 0,01 mm, pero se observan granos de hasta un mm. La mayor parte de los granos son angulares, pero los de mayor tamaño son muy redondeados. Sus granos son predominantemente de cuarzo de origen metamórfico e ígneo (hipoabisal a volcánico). También se observan fragmentos de roca ricas en cuarzo (Chert y cuarcita). Como minerales accesorios se observaron turmalina, epidoto y apatito. La presencia de cuarzo de diferentes tipos indica dos posibles rocas fuertes, cuyos sedimentos presentan distintos grados de madurez.

En la imagen 28 se observa la fotografía petrográfica de la muestra M4. En ella se observa la vista general de la muestra y la variedad en la forma de granos que existen.

Imagen 28. Fotografía petrográfica de la muestra M4



Fuente: JAIMES, Marlyne. Caracas, 4 de Julio de 2012

En la tabla 22 se muestra una recopilación de los parámetros petrográficos analizados.

Tabla 22. Descripción de los parámetros petrográficos en las muestras de la formación Mirador

Muestra	M-1	M-2	M-3	M-4	
Tipo de Roca	Sedimentaria	Sedimentaria	Sedimentaria	Sedimentaria	
	Grauvaca Lítica	Cuarzoarenita	Sublitarenita	Grauvaca Lítica	
	(68,6 % cuarzo,	(92,15 %	(86,4 % cuarzo,	(69,3 % cuarzo,	
	0% feldespato,	cuarzo, 0%	0% feldespato,	0% feldespato,	
Clasificación	1,4% de	feldespato,	13,5% de	0,7% de	
	fragmentos de	2,85 % de	fragmentos de	fragmentos de	
(1907)	roca, 30% matriz)	fragmentos de	roca, 8%	roca, 30% matriz)	
		roca, 5%	matriz)		
		matriz)			
	Predominancias	Predominancia	Predominancia	Predominancia	
	de cuarzo de	de cuarzo de	de cuarzo de	de cuarzo de	
	origen	origen	origen	origen	
	metamórfico,	metamórfico e	metamórfico e	metamórfico e	
	fragmentos de	ígneo	ígneo	ígneo (hipoabisal	
Granos	roca ricas en	(hipoabisal a	(hipoabisal a	a volcánico). Se	
	cuarzo (Chert y	volcánico),	volcánico),	observan	
	cuarcita) y	fragmentos de	fragmentos de	fragmentos de	
	minerales	roca ricas en	roca ricas en	roca ricas en	
	accesorios:	cuarzo (chert y	cuarzo (Chert y	cuarzo (Chert y	
	turmalina,	cuarcita) y	cuarcita). Y	cuarcita) y	

Muestra	M-1	M-2	M-3	M-4
	epidoto, apatito y minerales r		minerales	minerales
	moscovita.	accesorios	accesorios:	accesorios:
		como turmalina,	turmalina,	turmalina, epidoto
		epidoto,	circón, apatito,	y apatito.
		moscovita,	moscovita y	
		circón y apatito.	pirita.	
	Minerales de	Minerales de	Minerales de	Minerales de
	arcilla (caolinita e	arcilla (caolinita	arcilla (caolinita	arcilla (caolinita e
Motriz	illita) y óxidos de	e illita), cuarzo y	e illita) y óxidos	illita)
Iviauiz	hierro (siderita y	óxidos de hierro	de hierro	
	hematita)	(siderita y	(siderita y	
		hematita)	hematita)	
	Óxidos de hierro	Óxido de hierro	Óxidos de	Cuarzo.
Comento	y cuarzo	(siderita y	hierro y cuarzo.	
Cemento		hematita) y		
		cuarzo.		
Porosidad	Intrapartícula.	Intrapartícula.	Intrapartícula.	Intrapartícula.
Compactación	Media	Alta	Alta	Media
	Grano -matriz,	Contacto	Contacto	Grano -matriz,
	seguido por	cóncavo –	cóncavo –	seguido por
Contacto	contacto	convexo,	convexo,	contacto
nredominante	longitudinal,	suturado y	suturado y	longitudinal,
predominante	tangencial y	grano-cemento	grano-cemento.	tangencial y
	cóncavo –			cóncavo –
	convexo.			convexo.
	Se presenta	Se presenta	Se presenta	Se presenta
	rellenando poros	rellenando	rellenando	como sobre
Comentación	y como sobre	poros y como	poros y como	crecimiento de
Comonación	crecimiento de	sobre	sobre	granos.
	granos.	crecimiento de	crecimiento de	
		granos.	granos.	

Fuente: JAIMES, Marlyne. Caracas, 4 de Julio de 2012

3.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA

Este ensayo permite determinar la resistencia uniaxial no confinada de la roca o resistencia a la compresión simple y sus constantes elásticas: el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. Consiste en la aplicación de una carga de compresión axial a cilindros moldeados o núcleos a una velocidad prescrita hasta que se presente la falla. La relación entre los esfuerzos aplicados en el ensayo es: $\sigma 1 \neq \sigma 2 = \sigma 3 = 0$

La velocidad de carga a aplicar depende de la prensa a utilizar y de los estándares adoptados para este método. El estándar D7012 sugiere una velocidad entre 0,5 y 1 MPa/s. Velocidades mayores a las normalizadas producen resultados de resistencias mayores y el caso contrario las resistencias obtenidas son menores. La probeta normalizada es cilíndrica con un diámetro mínimo de 47 mm y una longitud con una relación de diámetro 2:1 y 2.5:1.

Una vez realizado el ensayo de ultrasonido, se procedió a realizar el ensayo de compresión a un cilindro de roca siguiendo el procedimiento explicado en la Norma D7012 que reemplaza y combina las normas D2664, D5407, D2938 Y D3148.

El ensayo fue programado mediante el software GCTS CATS para que el actuador de carga se detuviera una vez que la muestra alcanzara una deformación axial de 2%. El software del equipo permite introducir las especificaciones del espécimen (diámetro, altura, peso) con las cuales realiza un cálculo inmediato del área del espécimen, y de los esfuerzos desviadores y deformaciones axiales a medida que aumenta la carga y los desplazamientos. La adquisición de datos fue realizada cada 1 segundo.



Imagen 29. Ensayo de compresión inconfinada

Fuente: Propia

La variable de control es la fuerza cuya magnitud y velocidad puede ser controlada, Las deformaciones axiales que se van produciendo en la probeta se miden mediante comparadores o bandas extensometricas. Durante el ensayo se van registrando las curvas esfuerzo deformación axial de la probeta. También se puede medir la deformación radial. Tabla 23. Configuración del ensayo de compresión simple

Configuración de compresión simple						
Dato de entrada	Deformación axial					
Control del ensayo	< 2,3% de deformación					
Tipo de onda Incremental						
Retroalimentación	Carga Axial					
Intervalo de captura de datos	1 s					
Rata de variación	80 kN/	min				
Duración máxima	15 min	I				

Fuente: Propia

La tabla 23 se presenta la configuración utilizada en el ensayo de compresión simple con toma de velocidad de pulso ultrasónico, a continuación se presentan los datos del testigo de las muestras M1, M2, M3 y M4.

Tabla 24. Datos del testigo.

Datos del espécimen							
Parámetro	Muestra M1	Muestra M2	Muestra M3	Muestra M4	Unidad		
Altura	112,4	121,9	125,6	118,6	mm		
Diámetro	50,9	50,7	50,8	50,8	mm		
Área	20,348	20,189	20,268	20,268	cm ²		
Peso	579,9	584,6	651,6	587,9	gr		
Densidad	2,53549	2,37547	2,55961	2,44569	(g/cm ³)		
Volumen	228,714	246,099	254,57	240,382	cm ³		
Fuente: Pronia							

Fuente: Propia

Los resultados del ensayo de compresión inconfinada se muestran en la tabla 25.

Resultados								
Parámetro	Muestra M1	Muestra M2	Muestra M3	Muestra M4	Promedio	Unidad		
Duración del ensayo	138,0	126,4	164,6	93,4	130,6	Segundos		
Carga Axial - q Máxima	186,0	171,9	220,3	125,3	175,9	kN		
Esfuerzo desviador - Sd Máxima	91,3	85,0	108,6	61,7	86,6	MPa		
Desplazamiento Axial Máximo	2,2	2,5	2,5	2,6	2,4	mm		
Deformación Axial Máximo	2,0	2,0	2,0	2,2	2,0	%		

Tabla 25. Resultados del ensayo de compresión simple

Fuente: Propia

Con las tablas de datos almacenados por el servidor del ensayo, se elaboraron las curvas de esfuerzo en función del tiempo y deformación en función del tiempo, colocando variaciones de esfuerzos y deformaciones cada un segundo (ver imagen 30)

En la imagen 30 se observa como las deformaciones crecen de manera constante en función del tiempo, debido a la configuración del ensayo en la cual se estableció una rata de variación de los desplazamientos axiales de 80 kN/min.

Igualmente se observa de manera ampliada el comportamiento atípico presentado por el material hasta alcanzar los 92 MPa, el cual no es más que una fase de asiento originada por la prensa al entrar en contacto con el material.



Imagen 30. Esfuerzo Desviador Vs Deformación Axial

Para la determinación del módulo elástico, se debe utilizar la pendiente de la siguiente etapa de la curva donde los esfuerzos aumentan de manera lineal sobre la recta AB la cual indica de manera esquemática el rango elástico del testigo ensayado.

Con los datos almacenados, se realizaron los diagramas de deformación y esfuerzo en función del tiempo, en el cual se aprecia el crecimiento de las deformaciones de manera constante hasta alcanzar la máxima deformación impuesta de un 2%.



Imagen 31. Esfuerzo Desviador Vs Tiempo y Deformación Axial Vs Tiempo.

En la curva de variación de los esfuerzos en función del tiempo, y en el diagrama de esfuerzo deformación, se aprecia cómo el testigo comienza a desarrollar esfuerzos crecientes en función de las deformaciones, hasta alcanzar una resistencia última del material de 91,3 MPa o esfuerzo desviador máximo, una vez alcanzado el pico de la curva, se evidencia la grieta en el testigo.

Fuente: Propia

3.4 ENSAYO DE TRACCION O BRASILERO

El ensayo brasilero o de tracción indirecta, es un ensayo de compresión aplicado a probetas cilíndricas, que destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un material y obtener la carga máxima que aguanta antes de la falla.

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

Los especímenes utilizados en el ensayo fueron discos circulares cortados con una relación espesor/diámetro de 0.5 aproximadamente. El espécimen se orientó de forma vertical siendo el eje de aplicación de la carga una línea trazada a lo largo del diámetro en cada espécimen.



Imagen 32. Ensayo de tracción, orientación del espécimen

Fuente: Propia

La carga normal fue aplicada con velocidad constante de manera que la falla se produjese entre 1 y 10 minutos luego de iniciado el ensayo

La tabla 26 presenta la configuración utilizada en el ensayo brasilero. A continuación se presentan los datos del testigo de las muestras M1, M2, M3 y M4 (ver tabla 27)

Tabla 26. Configuración del ensayo de brasilero

CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO BRASILERO O TRACCION INDIRECTA					
Dato de entrada	Deforma	ción axial			
Control del ensayo	< 1% de d	eformación			
Tipo de onda	Incremental				
Retroalimentación	Carga	Carga Axial			
Intervalo de captura de datos	5	S			
Rata de variación	12	kN/min			
Duración máxima	15	min			
	15	111111			

Fuente: Propia

Tabla 27. Datos del testigo para el ensayo brasilero

Datos de El Espécimen							
Parámetro	Muestra Muestra Muestra Muestra M1 M2 M3 M4						
Altura	17,5	22,7	18,9	22,5	mm		
Diámetro	50,9	50,8	50,5	50,8	mm		
Área	20,3482	20,2683	20,02962	20,2683	cm ²		
Volumen	35,6093	46,00904	37,85598	45,60367	cm ³		

Fuente: Propia

Los resultados del ensayo brasilero se exponen en la tabla 28. Se observa una alta resistencia a la tracción del orden de los 20,8 Mpa por encima de los valores habituales debido al alto contenido de cuarzo de las muestras.

Tabla 28. Resultados del ensayo brasilero

Resultados del ensayo brasilero								
Parámetro	Muestra M1	Muestra M2	Muestra M3	Muestra M4	Promedio	Unidad		
Duración del ensayo	32,0	35,6	42,8	21,1	32,9	Segundos		
Carga Axial - q Máxima	7,2	8,0	9,2	5,1	7,4	kN		
Esfuerzo desviador - Sd Máxima	20,5	19,1	31,6	12,0	20,8	MPa		
Desplazamiento Axial Máximo	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	mm		
Deformación Axial Máximo	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	%		
Fuente: Propia								



Imagen 33. Esfuerzo Desviador Vs Tiempo y Deformación Axial Vs Tiempo.

Fuente: Propia

Con los datos almacenados, se realizaron los diagramas de deformación y esfuerzo en función del tiempo (ver imagen 33), en el cual se aprecia el crecimiento de las deformaciones de manera constante hasta alcanzar la máxima deformación impuesta del 1%.

En la muestra M2 ocurre una microfisura a los 24 segundos, hasta fracturarse totalmente soportando con una carga axial de 8,04 kN. De igual forma la muestra M4 tiene micro fisuras hasta que se rompe inicialmente con 4,84 kN y se termina de romper con 5,05kN.

En síntesis, el ensayo brasilero nos refleja la capacidad del material a la tracción del orden de los 7,4 kN, este esfuerzo se induce de forma indirecta dado que es la carga máxima soportada por los núcleos en posición horizontal.

3.5 ENSAYO DE ULTRASONIDO

El ensayo de ultrasonido permite medir la velocidad de las ondas elásticas longitudinales y transversales, Vp y Vs, al atravesar una probeta de roca. La velocidad de las ondas está relacionada con las características mecánicas del material, su resistencia y deformabilidad y a partir de ella se calculan los módulos de deformación elásticos dinámicos: Elasticidad E y Poisson v.

El ensayo consiste en transmitir ondas longitudinales mediante compresión ultrasónica y medir el tiempo que tardan dichas ondas en atravesar la probeta; de igual forma se transmiten ondas transversales o de corte mediante pulsos sónicos y se registran los tiempos de llegada. Las velocidades correspondientes, Vp y Vs, se calculan a partir de los tiempos. El transmisor de la fuerza compresiva de los pulsos se fija sobre un extremo de la probeta y en el otro se sitúa el receptor que mide lo que tardan las ondas en atravesar la longitud de la muestra de roca.

Tabla 29. Configuración del ensayo de ultrasonido

Configuración del ensayo de ultrasonido					
Numero de ondas 32 ondas					
Número de puntos por onda	4096	puntos			
Límite de frecuencia	100	kHz			

Fuente: Propia

La tabla 29 presenta la configuración utilizada en el ensayo de ultrasonido, a continuación se presentan los datos del testigo de las muestras M1, M2, M3 y M4

Tabla 30. Datos del testigo para el ensayo de ultrasonido

Datos del espécimen					
Parámetro	Muestra M1	Muestra M2	Muestra M3	Muestra M4	Unidad
Altura	128,3	130,2	112,4	118,6	mm
Diámetro	50,8	50,5	50,9	50,8	mm
Área	20,3	20,0	20,3	20,3	cm ²
Peso	670,9	615,6	579,9	587,9	gr
Densidad	2,6	2,4	2,5	2,4	(g/cm ³)
Volumen	260,0	260,8	228,7	240,4	cm ³

Fuente: Propia

El ensayo de pulso ultrasónico se realizó previo a la ejecución del ensayo de compresión simple, los resultados se muestran en la tabla 31.

Tabla 31. Resultados del e	ensayo de ultrasonido
----------------------------	-----------------------

Resultados								
Parámetro	Muestra M1	Muestra M2	Muestra M3	Muestra M4	Promedio	Unidad		
Velocidad Onda P	2603,0	3281,0	2990,0	2087,0	2740,3	ms		
Velocidad Onda S	1446,1	1822,8	1661,1	1159,4	1522,4	ms		
Módulo de Young	158429,3	229263,1	22137,4	99083,6	127228,3	MPa		
Módulo de corte	24780,2	39467,3	6006,3	18494,2	22187,0	MPa		

Fuente: Propia

En las imágenes 34 y 35 se visualizan las llegadas de las ondas p y s con respecto al tiempo.



Imagen 34. Velocidad de onda p.



Imagen 35. Velocidad de onda s



4. ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO

Se presenta el análisis de estabilidad por formación de cuñas debido a la excavación de un túnel que se construirá en roca de la formación Mirador en el municipio Bochalema, Norte de Santander. Los análisis fueron realizados con la informacion geológica y geotécnica obtenida de los trabajos de campo y laboratorio.

Cuando se va excavar un túnel los problemas de inestabilidad son comúnmente controlados por la presencia de discontinuidades. La intersección de estas estructuras geológicas puede liberar bloques o cuñas que deslizaran por la superficie expuesta de la excavación. Debido a lo anterior es muy importante interpretar las características del macizo rocoso, seguido de un estudio de cuñas, así como el diseño del refuerzo para la estabilización de los mismos.

Este análisis se presenta de la siguiente manera:

En el capítulo 4.1, se determinan las características geológico-estructurales del macizo rocoso y del túnel que incluye: la estimación del estado tensional, el diseño de la excavación (dimensiones, geometría, espesor de daños, orientación del túnel), el análisis de esfuerzos y desplazamientos, además de un diseño preliminar del sostenimiento basada sólo en el índice Q de Barton.

Luego, en el capítulo 4.2 se identifican las cuñas potencialmente deslizables y que pueden fallar por el techo, el frente o las paredes del túnel; por último calculamos el factor de seguridad (FS), mediante análisis estático y dinámico, de aquellos bloques potencialmente deslizables y determinamos la cantidad de refuerzo requerido para que se alcancen los niveles aceptables de estabilidad.

4.1 CALCULOS PRELIMINARES

Como resultado de la informacion geológica y geotécnica obtenida a partir de pruebas de laboratorio y levantamientos de campo, se desarrolla una síntesis de las características que conforman el sitio.

En primer lugar se calculan los esfuerzos principales con los que se evalúa el índice de daños y la concentración de esfuerzos y desplazamientos. Seguidamente se diseña la geometría y orientación del túnel que a su vez nos servirán como datos de entrada para el análisis de cuñas.

4.1.1 Estimación del estado tensional. Utilizando el grafico de Hoek y Brown se calcula los esfuerzos vertical y horizontal.

Imagen 36. Variación de la tensión vertical con la profundidad y la variación $\sigma H/\sigma v$ con la profundidad.



Fuente: (BROWN, 2004)

En la imagen 36 a la izquierda se tiene en el eje y, la profundidad y en el eje x, el esfuerzo vertical en mega pascales. Se encuentra trazada la línea que correlaciona los puntos que representan al esfuerzo vertical como el producto de 0,027 con profundidad, es decir $\sigma_V = 0,027$ z (MPa).

En la imagen 36 a la derecha se observa la variación de la profundidad con σ H/ σ v que es el coeficiente k, para k=0,3, σ_H = 0,3 σ_V .

Estas correlaciones se corroboraron con la tesis de maestría presentada por (Morales, 2011) donde se deduce un $\sigma_V = 0,023 \text{ z}$ (MPa).y $\sigma_H = 0,28 \sigma_V$.para la formación Mirador en el anticlinal del Guavio.

Tomando como base la orientación de los daños del túnel Aurora dos (ver imagen 39), se supondrá que el esfuerzo vertical es el esfuerzo mayor y que el estado tensional es el correspondiente a las fuerzas gravitacionales que ejercen los materiales confinantes, es decir $\sigma_V = \sigma_1$.

Reemplazando en la fórmula de Hoek & Brown y contando con una profundidad máxima de 500 metros se da que:

 $\sigma_V = 0.027 \text{ z (MPa)}$

 $\sigma_V = 0.027 (500 \text{ m}) (\text{MPa})$

$$σ_V = σ1 = 13,5$$
 MPa
 $σ_H = 0,33 σ_V$
 $σ_H = 0,33 (13,5$ MPa)
 $σ_H = σ3 = 4,46$ MPa

Conociendo el esfuerzo mayor, el esfuerzo menor y siguiendo el supuesto que el esfuerzo σ_2 se encuentra dentro de este rango, se dice que:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$
$$\sigma_2 = \frac{13,5 \text{ Mpa} + 4,46 \text{ MPa}}{2}$$

 $\sigma_2 = 8,98 \text{ MPa}$

Se calcula ahora los esfuerzos inducidos según lo dispuesto por (Martin, 1997)

$$\sigma_A = 3\sigma_3 - \sigma_1$$
 (Esfuerzo mínimo)
 $\sigma_A = 3 (4,46 \text{ MPa}) - (13,5 \text{ MPa})$
 $\sigma_A = -0,12 \text{ Mpa}$
 $\sigma_B = 3\sigma_1 - \sigma_3$ (Esfuerzo máximo)
 $\sigma_B = 3 (13,5 \text{ MPa}) - (4,46 \text{ MPa})$
 $\sigma_B = 36,04 \text{ MPa}$

4.1.2 Diseño de la excavación. El diseño de la excavación consiste en calcular: las dimensiones del túnel, la geometría de la excavación, el espesor del daño y la orientación del túnel.

4.1.2.1 Dimensiones del túnel según el RMR de Bieniawski (1989). Basados en el Rock Mass Rating de Bieniawski (1989) se puede aproximar al ancho del túnel (Roof Span) dependiendo de la calidad geo mecánica del macizo rocoso, obteniéndose que con un ancho de techo inferior a los tres metros, se consigue un tiempo de estabilidad superior a diez años sin necesidad de sostenimiento (Stand up time) para un valor del RMR de 67.

En la imagen 37 se observa la gráfica logarítmica que relaciona el RMR de Bieniawski (1989) con el ancho del techo y el tiempo de permanencia de este sin necesidad de sostenimiento (Stand up time).

Imagen 37. RMR vs Roof Span.



Fuente: HOEK, Brown. Excavaciones subterráneas en roca. México: Mc Graw Hill, 1985.

4.1.2.2 Geometría del túnel. A continuación se muestra las dimensiones del túnel minero propuesto para nuestro caso de estudio:

Imagen 38. Dimensiones del túnel



Fuente: Propia
En nuestro túnel se tienen dos áreas: el Área uno que corresponde a un rectángulo y el Área dos que representa un semicírculo. A continuación se realiza una analogía para la geometría propuesta, calculando una equivalencia al modelo de excavación circular de Hoek & Brown (Brown, 1998).

Para esto se calculan las áreas parciales y el área total del túnel.

Area 1 (rectangular) = base x altura

Area 1 = 2,5 m x 1,25 m

Area 1 = 3, 13 m^2

Area 2 (semicirculo) = $\frac{1}{2} \pi r^2$

Area 2 = $\frac{1}{2}\pi$ 1, 25 m^2

Area 2 = 2, 45 m^2

Area Total = Area 1 + Area 2

Area Total = 3, 13 m^2 + 2, 45 m^2

Area Total = 5, 58 m^2

Se supondrá ahora que el área del círculo es igual al área total, siendo el Área del círculo igual a pi por el diámetro al cuadrado, con lo que se despeja el radio:

Área circulo = Área Total

 $\Pi a^2 = 5,58 m^2$

a = 1,33 m

4.1.2.3 Espesor del daño en el macizo rocoso. Basados en la información de daños que nos proporciona el estado actual de la mina la Aurora dos (ver imagen 39), se determina que el esfuerzo máximo está dado por el esfuerzo vertical que causa una profundidad de desprendimiento con la horizontal.

Imagen 39. Imagen de la profundidad de daño en un macizo rocoso según Hoek & Brown y la Dirección de esfuerzos en la formación mirador visto en la mina Aurora dos.



Fuente: Propia

Es así como observando las muescas debido a la concentración de esfuerzos en los bordes, se asume un comportamiento elástico en el que la roca falla por dichos esfuerzos.

La profundidad de daño para un túnel de 2,5 metros de diámetro, con radio de 1,3 metros, será según (Martin, 1997):

Rf/a = 0,49 (+- 0,1) + 1,25
$$\frac{\sigma max}{\sigma c}$$

Rf =
$$(0,5 + 1,25 \frac{36,04 MPa}{86,62 MPa}) \times 1,33 m$$

Rf = 1,36 m

Rf = $(0,48 + 1,25 \frac{36.04 MPa}{86.62 MPa}) \times 1,33 m$

Rf = 1,34 m

Por lo que el radio de daño, Rf total, será en promedio igual a 1.35 m y la profundidad de daño igual a:

Df = Rf- a

Df = 1,36 - 1,25

Df = 0,1 m

Siendo este un daño mínimo para la profundidad calculada, se obtendrá el índice de daño, Di, según lo propuesto por (Martin, 1997):

 $Di = \sigma_{max} / \sigma_c$

Di = 36,04 MPa / 86,62 MPa

Di = 0,416

Lo anterior indica que el índice de daño excede en 0,016 el comportamiento elástico, generándose así posibles daños leves. Al excederse el 40% de la compresión uniaxial de la roca aumenta la dificultad de soporte a partir de un Di superior a 0,4. No obstante siendo este índice de daño inferior al 60% de la compresión uniaxial, esto cuando Di es inferior a 0,6, no se pronostican daños severos en la construcción del túnel planteado.

4.1.2.4 Orientación del túnel y familia de fallas con el software Dips. Mediante el uso del software Dips se diseña el gráfico de las orientaciones de datos estructurales tomados de la formación Mirador a través de la quebrada la regadera.

Imagen 40. Diagrama de polos



Fuente: Propia. Software Dips

A continuacion se contempla la concentracion de los datos estructurales, observando una sola familia de fallas.



Imagen 41. Diagrama de contornos

A continuación se encuentra la dirección ideal para el túnel propuesto, trazando una perpendicular a la orientación de los rumbos, basado en la densidad de rumbos que nos arroja el diagrama de rosetas.

Imagen 42. Diagrama de Rosetas



Fuente: Propia. Software Dips

Fuente: Propia. Software Dips

Lo anterior nos da una orientación ideal para el túnel de 262 grados de azimut.

4.1.3 Diseño de sostenimiento según el índice q de Barton. Para la estimación de los sostenimientos a partir del índice Q **(Barton, 2002)** se debe calcular el diámetro equivalente del túnel (De) con base en la variable ESR (radio de soporte de la excavación), la cual depende del tipo de excavación y sus valores se indican en el siguiente cuadro:

Tabla 32. Talores de ESR

S. No.	Type of Excavation	ESR
1	Temporary mine openings, etc.	3 - 5 ?
2	Vertical shafts: (i) circular section (ii) rectanular / square section	2.5 ? 2.0 ?
3	Permanent mine openings, water tunnels for hydro power (excluding high pressure penstocks), pilot tunnels, drifts and headings for large excavations, etc.	1.6
4	Storage rooms, water treatment plants, minor road and railway tunnels, surge chambers, access tunnels, etc.	1.3
5	Oil storage caverns, power stations, major road and railway tunnels, civil defence chambers, portals, intersections, etc.	1.0
6	Underground nuclear power stations, railway stations, sports and public facilities, factories, etc.	0.8 ?

VALUES OF EXCAVATION SUPPORT RATIO ESR (BARTON ET AL., 1974)

Fuente: (BARTON, 1974)

Teniendo en cuenta que el ancho del túnel es de 2,5 metros y el ESR está valorado en 1.6 para excavaciones mineras permanentes, se dice que:

 $De = \frac{Ancho \ o \ alto \ del \ tunel}{ESR}$ $De = \frac{2.5 \ m}{1.6}$

De= 1,56

Se observa en la imagen 43 que un indice Q de calidad de roca igual a 36,1 y diametro equivalente (De) igual a 1,56, pertenece a la categoria 1 que corresponde al diseño sin sostenimiento.





Fuente: (VALLEJO, 2004)

4.1.4 Análisis de esfuerzos y desplazamientos. Para el cálculo de los esfuerzos inducidos producto de la excavación se ha desarrollado un análisis esfuerzodeformación con el software geo mecánico Phase 2. Este análisis requiere del cálculo de los parámetros de resistencia.

4.1.4.1 Cálculo de los parámetros de resistencia con el software Rocdata. Se utiliza el criterio generalizado de Hoek – Brown, teniendo en cuenta que es el modelo que mejor se ajusta a las características de un macizo rocoso con 3 familias de discontinuidades.

En la tabla se muestran los parámetros de entrada al software rocdata. GSI es el índice de resistencia geológica, sgci es la resistencia a la compresión inconfinada de la roca, mi es el parámetro de roca intacta y D es el factor de perturbación.

Tanto el GSI como el mi se determinan para la arenisca y dependiendo de las condiciones de las paredes del macizo. D es un factor que depende sobre todo del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo.

Parámetro	Valor	Descripción/ Unidad
GSI	72	Roca intacta
Sigci	86,62	Compresión inconfinada
Mi	17	Areniscas
D	0	Excelente control de voladura
Peso unitario de la roca	0,024	MN/m3
Profundidad del túnel	500	m
Fuente: Dronie		

Tabla 33. Parámetros de entrada al software Rocdata

Fuente: Propia

A continuación se muestran los resultados del análisis por el criterio de Hoek-Brown. Donde mb es un valor reducido de la constante del material mi; además s y a son constantes del macizo rocoso.

Tabla 34. Resultados del software Rocdata

Parámetro	Valor
mb	6,25
S	0,0446
а	0,5
cohesión	3,54 Mpa
Angulo de fricción	51,61 grados
Em (modulo Young)	33022,43 MPa

Fuente: Propia

A continuación se presentan los parámetros de ingreso para graficar la envolvente de Mohr basados en los ensayos de compresión y tracción.

Sigma 3	Sigma 1	Ensayo		
-20,53		Brasilero		
-19,14		Brasilero		
-31,64		Brasilero		
-11,38		Brasilero		
	91,26	Compresión inconfinada		
	84,98	Compresión inconfinada		
	108,56	Compresión inconfinada		
	61,66	Compresión inconfinada		

Tabla 35. Datos de laboratorio para el criterio de Mohr Coulomb

Fuente: Propia

Imagen 44. Envolvente de Mohr según ensayos brasileros y de compresion



Fuente: Propia, Software Rocdata

4.1.4.2 Concentración de esfuerzos y desplazamientos con el software Phase 2. El análisis estructural determina las deformaciones del macizo rocoso, visualizando el comportamiento de los campos de esfuerzos. Se realiza una excavación con las dimensiones que se muestran en el capítulo 4.1.2.2 y los siguientes parámetros iniciales:

Propiedades del ca	ampo de esfuerzos			
Sigma 1	13,5	Мра		
Sigma 3	4,46	Mpa		
Sigma 2	8,98	Mpa		
Angulo	0	grados		
Propiedades del mate	rial de la roca Mirador			
Tipo de Elasticidad	Isotro	pica		
Módulo de Young Mpa	33022,4	Мра		
Resistencia a la compresion Mpa	86,62	MPa		
Radio de Poisson	0,	0,3		
Tipo de Elasticidad	Isotro	pica		
Criterio de falla	Generalizado	Hoek-Brown		
Tipo de Material	Elas	tico		
Parametro mb	6,2	54		
Parametro s	0,04	46		
Parametro a	0,5	01		
Fuente: Pronia				

Tabla 36. Parámetros de entrada al software Phase 2

Fuente: Propia

Imagen 45. Trayectoria y concentracion de esfuerzos verticales, Z=500 m



Fuente: Propia, Software Phase 2 - Rockscience

Las pequeñas cruces de color rojo nos indican la trayectoria y la concentración de esfuerzos en las esquinas de la excavación. En la parte superior se encuentran las máximas concentraciones de hasta 34 MPa en el techo, mientras en la parte inferior derecha son de hasta 32 MPa. No se observan concentraciones que conlleven a estallidos de roca.



Imagen 46. Trayectoria y concentracion de esfuerzos horizontales, Z= 500m

Fuente: Propia, Software Phase 2 - Rockscience

Existen concentraciones pequeñas de hasta 9,4 MPa que afectan las esquinas inferiores.

Esta concentración de esfuerzos nos ha generado desplazamientos máximos de 0,09 milímetros con la horizontal y 0,03 milímetros con la vertical. Lo anterior indica que los desplazamientos son mínimos.



Imagen 47. Desplazamientos verticales y horizontales, Z=500 m

Fuente: Propia, Software Phase 2 - Rockscience

En la imagen 48 se observa la concentración de esfuerzos y desplazamientos para una profundidad de un metro para el cual se calcula un esfuerzo vertical de 0,027 Mpa y un esfuerzo horizontal de 0,009 MPa siguiendo la metodología para estimación de esfuerzos presentada en el capítulo 4.1.1

De los resultados de este análisis se deduce que no se presenta estallido de roca. En la parte izquierda se muestran concentraciones máximas de 0.06 MPa causadas por el esfuerzo principal. A la derecha desplazamientos inferiores a 1 milímetro.



Imagen 48. Concentracion de esfuerzos y desplazamientos, Z=1 m

Fuente: Propia, Software Phase 2 - Rockscience

4.2 ANALISIS DE CUÑAS MAXIMAS

Partiendo del levantamiento geológico realizado a los taludes de la formación Mirador es posible pronosticar las cuñas máximas que se formaran en nuestro túnel con el software Unwedge. Una vez conocidas las dimensiones y el peso de la cuña se realizara un diseño estático y dinámico utilizando fortificación con pernos de fricción Split set.

4.2.1 Cálculo de cuñas máximas con el software Unwedge. Mediante el software Unwedge se visualizan las cuñas que rodearan la excavación. Para este análisis se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros iniciales:

Orientación del túnel			
TREND (Dirección del túnel) 262 °			
PLUNGE (Buzamiento del túnel)	1	0	
Peso unitario			
Roca	2,4	t/m3	
Agua	0,98	t/m3	
Propiedades de la falla			
Angulo de fricción 0 °			
Cohesión	0	MPa	

Tabla 37. Parámetros iniciales de diseño

Esfuerzo de tensión	No será considerado	t/m2	
Orientación de las discontinuidades			
NUMERO DE JUNTAS	Dirección de buzamiento	Buzamiento	
Junta 1 (Propiedades de falla)	106	45	
Junta 1 (Propiedades de falla) Junta 2 (Propiedades de falla)	106 66	45 56	

Fuente: Propia

Para una cohesión y fricción igual a cero el factor de seguridad será de cero al no existir ninguna fortificación. A continuación se muestran las cuñas formadas por los planos de discontinuidad.

Imagen 49. Vista lateral de las cuñas formadas



Fuente: Propia, Software Unwedge – Rockscience

Los resultados del software Unwedge para el bloque conformado por la cuña de techo son los siguientes:

Tabla 38. Resultados del software Unwedge para la cuña de techo

Resultados Unwedge cuña techo				
Volumen de la cuña	1,795	m3		
Peso unitario de la cuña	4,8	t		
Longitud a través del túnel	1,88	m		
Área de la cara de la cuña	2,09	m2		
Altura del ápex	3,46	m		
Factor de seguridad 0				

Fuente: Propia, Software Unwedge – Rockscience

El coeficiente de friccion para el caso mas desfavorable en areniscas fue obtenido de la imagen 50 para ensayos de corte en juntas de roca (BARTON, 1977).

Imagen 50. Ángulos de fricción básica para rocas sedimentarias.

Rock type	Moisture condition	Basic friction angle ϕ_b	Reference
A. Sedimentary	Rocks		
Sandstone Sandstone Sandstone Sandstone Sandstone Sandstone Sandstone Shale Siltstone Siltstone Siltstone Conglomerate Chalk Limestone	Dry Wet Wet Dry Dry Wet Wet Dry Wet Dry Wet Dry Wet	26-35 $25-33$ 29 $31-33$ $32-34$ $31-34$ 33 27 31 $31-33$ $27-31$ 35 30 $31-37$ $27-35$	Patton, 1966 Patton, 1966 Ripley & Lee, 1962 Krsmanović, 1967 Coulson, 1972 Coulson, 1972 Richards, 1975 Ripley & Lee, 1962 Coulson, 1972 Coulson, 1972 Krsmanović, 1967 Hutchinson, 1972 Coulson, 1972

Table 1. Basic Friction Angles of Various Unweathered Rocks Obtained From Flat and Residual Surfaces

Fuente: (BARTON, 1977)

Teniendo en cuenta las tensiones naturales y el coeficiente de fricción, el factor de seguridad aumenta a 3,4.

4.2.2 Análisis estático. Se calcula el número de pernos necesario para obtener un factor de seguridad estático de tres utilizando fortificación con pernos de fricción Split-set, diseñados para macizos rocosos de alta competencia. La capacidad de carga pico para pernos Split-set es 50 KN (5,1 Ton) según la tabla 39.

Tabla 39. Parametros de carga desplazamiento para elementos de soporte

Description	Peak Load (kN)	Displace Limit (mm)	Energy Absorption (kJ)	
19 mm resin-grouted rebar	100 — 170	10 30	1 — 4	
16 mm cable bolt	160 — 240	20 — 40	2 — 6	
16 mm, 2 m mechanical bolt	70 — 120	20 — 50	2 — 4	
16 mm, 4 m debonded cable	160 — 240	30 50	4 — 8	
16 mm grouted smooth bar	70 — 130	50 — 100	4 10	
yielding Swellex bolt	80 — 90	100 — 150	8 — 12	
yielding Super Swellex bolt	180 — 190	100 — 150	18 25	
Split Set bolt	50 — 100	80 — 200	5 15	
16 mm cone bolt	90 — 150	100 — 200	10 — 25	
#6 gauge welded-wire mesh	20 30	100 200	1.5 — 2.5/m,	
#4 gauge welded-wire mesh	30 — 45	150 — 200	2.5 — 4 /m,	
#9 gauge chain-link mesh	30 35	350 450	3 — 4 /m,	
Shotcrete and welded-wire mesh	2 x mesh	< mesh	3 to 5 x mesh	

The displacement limit and energy absorption are taken at the point of failure for rock bolts and at peak load for mesh or shotcrete

Fuente: (KAISER, 1996)

El factor de seguridad estático está dada por la expresión:

 $FS Estático = \frac{Numero \ de \ pernos \ x \ Capacidad \ del \ sostenimiento}{Peso \ de \ la \ cuña}$

 $3 = \frac{Numero \ de \ pernos \ x \ 5.1 \ toneladas}{4.8 \ toneladas}$

Numero de pernos = 3

A continuación se calcula la longitud de los pernos para la cuña de techo, considerando una longitud de anclaje libre de un metro.

L Pernos = Altura del ápex + 1 metro

L Pernos = 3,46 + 1 metro

L Pernos = 5 metros

Esto nos indica que para una carga demandada de 4,8 toneladas, se deben instalar tres pernos de fricción de cinco metros de longitud para mantener un factor de seguridad estático igual a tres.

4.2.3 Análisis dinámico. A partir del análisis estático, se calcula el factor de seguridad dinámico simulando un sismo de 2,6 en la escala de Richter, desde una distancia de 100 metros desde la fuente de una falla. Se estima que los pernos de fricción tendrán una deformación axial del 10% y que soportaran un desprendimiento de 10 centímetros de la cuña de techo. Además se conoce que el peso de la cuña es de 4,8 toneladas (4800 Kg) y que la capacidad de los pernos es de 50 KN (tabla 39) (KAISER, 1996).

El factor de seguridad dinámico está dada por la expresión:

 $FS \text{ dinámico} = \frac{Energia \text{ Disponible (soporte)}}{Energia \text{ Liberada (demanda)}}$

La energía disponible es la capacidad del soporte para absorber la energía liberada por la energía cinética y potencial; producto de la caída de material.

 $FS \text{ dinámico} = \frac{\Sigma(Capacidad \ Carga \ x \ Capacidad \ Desplazamiento) \ soporte}{Energia \ cinetica + Energia \ Potencial}$

FS dinámico = $\frac{(N \ pernos \ x \ Capacidad \ Carga) \ x \ (\% \ Deformacion \ x \ desplazamiento \ del \ soporte)}{\frac{1}{2}mV^2 + qmgd}$

FS dinámico = $\frac{(3 \text{ pernos } x \text{ 50kN}) x (10\% x \text{ 0,1 } m)}{\left(\frac{1}{2} x \text{ 4800 } kg x \left(\frac{0,2m}{s}\right)^2\right) + (1 x \text{ 4800 } kg x \text{ 9,81} \frac{m}{s^2} x \text{ 0,01 } m)}$

FS = 2.63

Donde la capacidad de carga total es el producto de la cantidad de soportes instalados en la cuña por la capacidad de cada perno de fricción; la capacidad de desplazamiento es el producto de la elongación máxima del soporte al producirse una grieta.

La distancia de desplazamiento del soporte es el producto de la deformación axial por la distancia que se deforma a través de la grieta, es decir:

d = 10% x 0,1 m d = 0,01 m

Entonces la energía de soporte será:

Energía de soporte = 3 pernos x 50 kN x (10% x 0,1 m)

Energía de soporte = 1.5 kJ

La energía liberada por la eyección del bloque de roca es función de la velocidad máxima de partícula (PPV), la cual se halla utilizando la fórmula de McGarr (Weber, 2007), para magnitud local de 2,6 y radio de 100 metros desde la fuente:

 $ML = 2 Log (R \times Vmax)$

2,6 = 2 Log (100 m x Vmax)

 $Vmax = \frac{10^{2,6/2}}{100 \, m}$

Vmax = 0,2 m/s

La máxima velocidad de partícula generada por la onda de corte es igual a 0,2 m/s. Siendo q un factor que para proyección de bloques desde el techo es igual a uno. Por consiguiente la energía liberada será:

Energía liberada = E cinética + E potencial

Energía liberada = $\frac{1mV^2}{2}$ + qmgd

Energía liberada = $\left(\frac{1}{2} x \, 4800 \, kg \, x \left(\frac{0,2m}{s}\right)^2\right) + \left(1 \, x \, 4800 \, kg \, x \, 9,81 \frac{m}{s^2} \, x \, 0,01 \, m\right)$ Energía liberada = 0,57 kJ

En la tabla 40 se muestra el factor de seguridad calculado con base en las magnitudes locales más altas registradas en la zona de estudio por la red sismológica nacional hasta el mes de enero de 2014.

Tabla 40. Calculo de FS para principales sismos registrados en la zona de estudio

Fecha aaaa/mm/dd	Latitud Grados	Longitu d Grados	Municipio	Magnitud ML	Profundi dad Km	Vmax m/s	FS Dinámico
29/03/2003	8.455	-71968	CUCUTA	4.3	35	0.004	3.2
31/08/2006	8.025	-72.41	CUCUTA	4.3	31.8	0.004	3.2
19/05/2007	8.171	-72.074	CUCUTA	4.2	32.1	0.004	3.2
			BOCHAL				
19/01/1994	7.623	-72.712	EMA	4.1	5	0.022	3.2
Eucato: Brania, Datas da la rad sismalágica pasional Ingoaminas 2014							

Fuente: Propia, Datos de la red sismológica nacional Ingeominas 2014

5. CONCLUSIONES

En este capítulo intentaremos resumir las principales conclusiones que se pueden extraer de todas las actividades y cálculos realizados en este trabajo de aplicación.

En primer lugar, con la presentación de antecedentes generales de la mina Aurora 2, junto con algunas imágenes del tipo de sostenimiento, el estado y la profundidad de daños utilizados en ella, se permitió enfocar tanto el modelamiento como la obtención de resultados a la realidad del túnel propuesto para el consorcio minero los Laches.

Los resultados de las clasificaciones geo mecánicas a partir del RMR, RQD, Q de Barton y GSI; concluyen que la roca que conforma la formación Mirador es de una calidad óptima, lo cual permitió demostrar la factibilidad para la construcción de un túnel utilizando sostenimiento con pernos sólo en las cuñas potencialmente inestables.

Los ensayos de petrografía muestran la predominancia del cuarzo en la matriz rocosa indicando una alta resistencia a la alteración química. Siendo una roca sedimentaria, la muestra presenta bajos niveles de porosidad del orden del 1%, con lo cual se establecen pocas zonas de deformabilidad y un bajo nivel de debilidad en la matriz rocosa. Así mismo, al no ser una roca porosa, la permeabilidad de la matriz rocosa es despreciable y se espera que el agua fluya a favor de las superficies de discontinuidad y no a través de la matriz.

Los ensayos de compresión arrojan una resistencia promedio de 86,62 Mpa con lo que se corrobora la buena calidad del macizo. También, se observa una alta resistencia a la tracción, de 20,85 Mpa en promedio, por encima de los valores habituales para la arenisca. Los valores elevados de la velocidad de onda al atravesar la muestra representan un diminuto grado de alteración en la matriz rocosa al igual que sirven de indicador de la calidad de la roca, debido a su relación con la resistencia a la compresión simple.

En el análisis estructural con el software Phase se observan bajas concentraciones que conlleven a estallidos de roca y desplazamientos casi nulos. Se advierte que la geometría de la sección del techo en forma de arco permite que el sostenimiento trabaje mejor y juega un papel principal en la distribución de las tensiones. Mediante el software Unwedge se visualizan las cuñas que rodearan la excavación y se calcula que para una carga demandada de 4.8 toneladas, que es el peso de la cuña de techo, se deben instalar al menos tres pernos de fricción de cinco metros de longitud para mantener un factor de seguridad estático de tres. Igualmente se analiza que simulando un sismo de 2.6 en la escala de Richter desde 100 metros de la fuente se obtendrá un factor de seguridad de 2.63 aplicando pernos con capacidad de 50KN.

Se recomienda que para una mejor interpretación de los resultados se realicen ensayos instrumentales para medir la dirección y magnitud de las tensiones, y con ello realizar un análisis preciso de la concentración de esfuerzos.

Igualmente se registre una mayor cantidad de datos estructurales tomando en cuenta los cambios de rumbo en la falla la regadera y analizando la orientación del túnel conforme a la trayectoria general de la formación Mirador en dirección noreste.

Finalmente se propone que para un trabajo futuro, de recojan tanto las conclusiones como las recomendaciones acá expuestas, con el fin de realizar una investigacion de detalle que incluya un estudio de fallas presente en el área de estudio y a su vez implementar una metodología de diseño de soporte conforme a la resistencia de la madera y su función de retención de bloques en el contorno de la excavación y que es muy utilizada en la minería subterránea en Colombia.

BIBLIOGRAFÍA

ALDO TAMBURRINO, Tavantzis. Universidad de Chile Modulo de Young y coeficiente de poisson para distintos materiales [Libro].

BARTON, N. & CHOUBEY. The shear strength of rock joints in theory and practice [Publicación periódica] // Rock Mechanics. - 1977. - págs. 1-54.

BARTON, N., LIEN, R. & Lunde Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics. [Sección de libro]. - [s.l.] : Springer-Verlag. Vol. 6., 1974.

BARTON. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design [Publicación periódica] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. - 2002. - págs. 185-216.

BHAWANI SINGH R.K. Rock mass classification [Libro]. - Oxford : Elsevier Science Ltd, 1999.

BIENIAWSKI, Z.T. Engineering Rock Mass Classifications [Libro]. - 1989.

BROWN Brady. Rock Mechanics for underground mining [Libro]. - New York : Kluver Academic Publishers, 2004.

BROWN, Hoek & Parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels [Libro]. - 1998.

C. Walthan. A. Foundations of engineering geology [Sección de libro]. - [s.l.] : E & FN Spoon, 1999. DAS BRAJA, M. Fundamentos de Ingenieria Geotecnica [Libro]. - Mexico : Thomson Editores SA, 2001.

DINCER I., ACAR, A., COBANOGLU, I., URAS, Y. Correlation betwen Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts

and tuffs. [Publicación periódica] // Bulletin of Enginnering Geology and the Environment 63. - 2004. - págs. 141-148.

FARMER Engineering properties of rocks [Sección de libro]. - [s.l.] : Spoon ltd. London, 1968.

GARNER A. H. Suggested nomenclature and correlation of the geological formations in Venezuela, in Petroleum development and techonology [Informe]. - [s.l.] : Am. Inst. Min. Metall. Eng., Tr, 1926. - págs. 677-684.

GOEL Bhawani Singh & R.K Rock Mass Classification [Libro]. - India : Elsevier, 1999.

GONZÁLEZ DE JUANA C. Introducción al estudio de la geología de Venezuela, Boll de Geol. (Venezuela) [Libro]. - 1951. - págs. 265-287..

GONZALEZ DE JUANA C. y PICARD I. de Arozena y X. Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas [Libro]. - Caracas : Ed. Foninves, 1980. - Vol. 2 Tomos : pág. 1031 p..

GOODMAN Introduction to rock mechanics [Sección de libro]. - [s.l.] : John Wiley & sons, 1989.

HOEK E. & BROWN, E. T. Practical Estimates of Rock Mass Strength, Int. Jr. Rock Mech. and Min.Sci. [Libro]. - Pergamon : [s.n.], 1997.

INGEOMINAS www.ingeominas.gov.co [En línea]. - 01 de Diciembre de 2010. - http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato.aspx?CID=239464.

INGEOMINAS, Minercol, Sergein Ltda. Adecuación de areas de minería de carbon en las zonas de la Sorzana y san Pedro [Plano]. - 2002.

ISRM Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM Suggested methods. [Libro]. - [s.l.] : E.T Brown. Pergamon Press., 1981.

KAISER P.K, TANNANT, D.D. & MCCREATH, D.G Canadian Rock Burst Support Handbook [Publicación periódica] // Geomechanics Research Center. - 1996. LIDDLE, R.A. The geology of Venezuela and Trinidad. [Libro]. - Ithaca, N.Y.: 2° ed., Paleont. Res. Inst, 1946. - pág. 890 p..

MARTIN, C.D., READ, R.S. & MARTINO, J.B Observations of brittle failure around a circular test tunnel [Publicación periódica] // International Journal Rock Mechanics And Mining Science. - 1997.

MCGARR, A. Some applications of seismic source mechanism studies to assessing underground hazard. Rockbursts and Seismicity in Mines [Libro]. - Johannesburg: : [s.n.], 1984.

Mendecki AJ, van Aswegen, G. and Mountfort, P. A guide to routine seismic monitoring in mines. A Handbook on Rock Engineering Practice for Tabular Hard Rock Mines [Publicación periódica] // Creda Communications. - 1999. MORALES, Luis. Determinación de los patrones de fracturamiento de la formación Mirador en el anticlinal del Guavio, mediante el analisis de imagenes de pozo. [Libro]. - Bogota : Universidad Nacional, 2011.

MOROS Luciano Canal Plan de manejo ambiental mina las Peñas [Informe]. - Cúcuta : [s.n.], 1997.

NOTESTEIN F. B., HUBMAN, C. W. AND BOWLER, J. W Geology of the Barco concession, Republic of Colombia, South America.. [Libro]. - [s.l.] : Geol. Soc. Am., Bull., 1944.. - págs. 1165-1216..

OUVA, Obert. & Rock mechanics and the design of structures in rock [Sección de libro]. - [s.l.] : John Wiley and sons, 1967.

RAHN P. H. Engineering geology. An environmental approach [Sección de libro]. - [s.l.] : Elsevier, 1986.

Staff of Caribbean Petroleum Co Oil fields of Royal Dutch-Shell Group in western Venezuela [Sección de libro]. - western Venezuela : Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull. 1948.

UCV http://www.sistendca.com [En línea]. - 28 de Julio de 2012. - 28 de Julio de 2012. -

http://www.sistendca.com/DOCUMENTOS/Curso%20Ultrasonido%20Basico.pdf. Universidad Nacional de Cordoba, QUINTANA C. E. Descripcion de material rocoso. - 1991.

UPC upcommons.upc.edu [En línea]. - 24 de Agosto de 2012. - upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3324/8/55872-8.pdf.

VALLEJO Luis I. Ingenieria Geologia [Libro]. - Madrid : Prentice Hall, 2004.

WALTHAN Foundations of engineering geology [Sección de libro]. - [s.l.] : E & FN Spoon, 1999.

WEBER, S. Master's of Mining Geomechanics, course of Underground mine seismicity [Publicación periódica] // Western Australia School of MInes (WASM). - 2007.

ANEXOS

ANEXO A. Topografia de la zona de estudio

(Ver contenido digital)



ANEXO B. DATOS ESTRUCTURALES DE LOS ESTRATOS DE LA FORMACIÓN MIRADOR

Buzamiento	Dirección del Buzamiento
42	80
40	65
49	90
49	96
49	79
45	78
49	78
44	71
36	80
45	106
56	66
355	80

			Resistencia	
			a la	
			compresión	
			inconfinada	
		Dureza	Мра	
	Promedio	del	(Dincer	Clase (Gonzales de Vallejo
#Talud	Rebote	rebote	2004)	2002)
1	55	63	138	R6 Roca extremadamente dura
2	51	59	124	R6 Roca extremadamente dura
3	42	49	98	R6 Roca extremadamente dura
4	67	77	175	R6 Roca extremadamente dura
5	41	48	94	R6 Roca extremadamente dura
6	36	42	79	R6 Roca extremadamente dura
7	54	63	135	R6 Roca extremadamente dura
8	43	50	101	R6 Roca extremadamente dura
9	45	52	107	R6 Roca extremadamente dura
10	41	47	93	R6 Roca extremadamente dura
11	41	47	93	R6 Roca extremadamente dura

ANEXO C. Resultados del ensayo esclerómetro en la formación Mirador

ANEXO D . Resultados del ensayo de petrografia

- Muestra 1.

Tipo de Roca: Sedimentaria

Descripción general: Roca clástica, medianamente escogida, compuesta por granos de cuarzo en una matriz de óxido de hierro y arcilla. El cemento esta compuestos por minerales de hierro (óxido de hierro: hematita y carbonato de hierro: siderita). El tamaño de grano promedio está entre 0,01 mm y 0,03 mm, pero se observan granos de hasta 0,8 mm. Los granos son angulares a subangulares, salvo aquellos de mayor tamaño, que son redondeados.

Componentes Principales (%):

Muestra	Granos	Matriz	Cemento	Porosidad
M-1	70	28	2	<1

Granos: predominantemente de cuarzo de origen metamórfico. También se observan fragmentos de roca ricas en cuarzo (Chert y cuarcita). Como minerales accesorios se observaron turmalina, epidoto, apatito y moscovita.

Matriz: compuesta por minerales de arcilla (caolinita e illita) y óxidos de hierro (siderita y hematita)

Cemento: compuesto por óxidos de hierro y cuarzo.

Porosidad: del tipo intrapartícula.

Clasificación según PETTIJOHN (1987) Grauvaca Lítica (68,6 % cuarzo, 0% feldespato, 1,4% de fragmentos de roca, 30% matriz)

Efectos diagenéticos.

Compactación: Media

Contacto predominante: Grano -matriz, seguido por contacto longitudinal, tangencial y cóncavo – convexo.

Cementación: Se presenta rellenando poros y como sobrecrecimiento de granos.

Observaciones: La presencia de cuarzo de diferentes tipos indica dos posibles rocas fuertes, cuyos sedimentos presentan distintos grados de madurez. Esta muestra es muy similar a la muestra Santander M-3

Fotos



Vista general de la muestra. Se observa la matriz de minerales de arcilla y óxidos de hierro (nícoles paralelos/nícoles cruzados)



Izquierda: Vista general de la muestra. Grano redondeado de cuarzo (nícoles cruzados). Derecha: Fragmento de roca (Cuarita) (nícoles cruzados)

Siendo una roca sedimentaria, la muestra presenta bajos niveles de porosidad del orden del 1%, con lo cual se establecen pocas zonas de deformabilidad y un bajo nivel de debilidad en la matriz rocosa. Al no ser una roca porosa, la permeabilidad de la matriz rocosa es despreciable, el agua fluye a favor de las superficies de discontinuidad y no a través de la matriz.

Los altos contenidos de cuarzo indican una alta resistencia a la alteración química.

- Muestra 2.

Tipo de Roca: Sedimentaria

Descripción general: Roca clástica, bien escogida, compuesta por granos de cuarzo en una matriz de óxido de hierro y arcilla. El cemento principal es cuarzo.

El tamaño de grano promedio es de 0,04 mm y el tamaño máximo es 0,3 mm. La mayor parte de los granos son angulares a subangulares.

Componentes Principales (%):

Muestra	Granos	Matriz	Cemento	Porosidad
M-2	90	5	3	2

Granos: predominantemente de cuarzo de origen metamórfico e ígneo (hipoabisal a volcánico). También se observan fragmentos de roca ricas en cuarzo (chert y cuarcita). Como minerales accesorios se observaron turmalina, epidoto, moscovita, circón y apatito.

Matriz: compuesta por minerales de arcilla (caolinita e illita), cuarzo y óxidos de hierro (siderita y hematita)

Cemento: compuesto principalmente por óxido de hierro (siderita y hematita) y cuarzo.

Porosidad: del tipo intrapartícula.

Clasificación según PETTIJOHN (1987)

Cuarzoarenita (92,15 % cuarzo, 0% feldespato, 2,85 % de fragmentos de roca, 5% matriz)

Efectos diagenéticos

Compactación: Alta

Contacto predominante: Contacto cóncavo – convexo, suturado y grano-cemento.

Cementación: Se presenta rellenando poros y como sobrecrecimiento de granos. Observaciones: La presencia de los contactos observados en la muestra, así como el alto nivel de compactación indican efectos diagéneticos tardíos. La presencia de cuarzo de diferentes tipos indica dos posibles rocas fuertes, cuyos sedimentos presentan distintos grados de madurez. Esta muestra es muy similar a la muestra Santander M-4.

Fotos



Izquierda: Vista general de la muestra. Derecha: Fragmento de Chert (nícoles cruzados)

Siendo una roca sedimentaria, la muestra presenta bajos niveles de porosidad del orden del 2%, con lo cual se establecen pocas zonas de deformabilidad y un bajo nivel de debilidad en la matriz rocosa.

Los altos contenidos de cuarzo indican una alta resistencia a la alteración química.

- Muestra 3.

Tipo de Roca: Sedimentaria

Descripción general: Roca clástica, bien escogida, compuesta por granos de cuarzo de distintas fuentes en una matriz de óxido de hierro y arcilla. El cemento principal es óxido de hierro y cuarzo. El tamaño de grano promedio es de 0,01 a 0,03 cm, pero se observan granos de hasta 0,5 mm. Dependiendo de la redondez los granos de cuarzo de pueden agrupar en los que son medianamente angulosos, de origen metamórfico, y los que son subredondeados a redondeados, de origen ígneo.

Componentes Principales (%):

Muestra	Granos	Matriz	Cemento	Porosidad
M-3	70	8	20	2

Granos: predominantemente de cuarzo de origen metamórfico e ígneo (hipoabisal a volcánico). También se observan fragmentos de roca ricas en cuarzo (Chert y

cuarcita). Como minerales accesorios se observaron turmalina, circón, apatito, moscovita y pirita.

Matriz: compuesta por minerales de arcilla (caolinita e illita) y óxidos de hierro (siderita y hematita)

Cemento: compuesto por óxidos de hierro y cuarzo.

Porosidad: del tipo intrapartícula.

Clasificación según PETTIJOHN (1987)

Sublitarenita (86,4 % cuarzo, 0% feldespato, 13,5% de fragmentos de roca, 8% matriz)

Efectos diagenéticos

Compactación: Alta

Contacto predominante: Contacto cóncavo – convexo, suturado y grano-cemento. Se observan suturas estiliolíticas.

Cementación: Se presenta rellenando poros y como sobrecrecimiento de granos. Observaciones

La presencia de los contactos observados en la muestra, así como el alto nivel de compactación indican efectos diagéneticos tardíos.

La presencia de cuarzo de diferentes tipos indica dos posibles rocas fuertes, cuyos sedimentos presentan distintos grados de madurez.

Fotos





Vista general de la muestra. Se observa el cemento de óxidos de hierro (nícoles paralelos/nícoles cruzados)



Izquierda: Vista general de la muestra. Se observan los contactos cóncavoconvexos y suturados entre los granos de cuarzo (nícoles cruzados) Derecha: Pequeño fragmento de chert (nícoles cruzados)

Siendo una roca sedimentaria, la muestra presenta bajos niveles de porosidad del orden del 2%, con lo cual se establecen pocas zonas de deformabilidad y un bajo nivel de debilidad en la matriz rocosa.

Los altos contenidos de cuarzo indican una alta resistencia a la alteración química.

- Muestra 4.

Tipo de Roca: Sedimentaria

Descripción general: Roca clástica, medianamente escogida, compuesta por granos de cuarzo en una matriz de óxido de hierro y arcilla. El cemento principal es cuarzo. El tamaño de grano promedio es de 0,01 mm, pero se observan granos de hasta 1 mm. La mayor parte de los granos son angulares, pero los de mayor tamaño son muy redondeados.

Componentes Principales (%):

Muestra	Granos	Matriz	Cemento	Porosidad
M-4	65	30	5	< 1

Granos: predominantemente de cuarzo de origen metamórfico e ígneo (hipoabisal a volcánico). También se observan fragmentos de roca ricas en cuarzo (Chert y cuarcita). Como minerales accesorios se observaron turmalina, epidoto y apatito.

Matriz: compuesta por minerales de arcilla (caolinita e illita)

Cemento: compuesto principalmente por cuarzo.

Porosidad: del tipo intrapartícula.

Clasificación según PETTIJOHN (1987)

Grauvaca Lítica (69,3 % cuarzo, 0% feldespato, 0,7% de fragmentos de roca, 30% matriz)

Efectos diagenéticos

Compactación: Media

Contacto predominante: Grano -matriz, seguido por contacto longitudinal, tangencial y cóncavo – convexo.

Cementación: Se presenta como sobrecrecimiento de granos.

Observaciones: La presencia de cuarzo de diferentes tipos indica dos posibles rocas fuertes, cuyos sedimentos presentan distintos grados de madurez.

Fotos



Vista general de la muestra. (nícoles paralelos/nícoles cruzados)



Vista general de la muestra. Nótese la variedad en la forma de granos que existen en la muestra (nícoles cruzados)

Siendo una roca sedimentaria, la muestra presenta bajos niveles de porosidad del orden del 1%, con lo cual se establecen pocas zonas de deformabilidad y un bajo nivel de debilidad en la matriz rocosa. Los altos contenidos de cuarzo indican una alta resistencia a la alteración química.

ANEXO E. Resultados de los ensayos de compresion, tracción y ultrasonido

(Ver contenido digital)