

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TALUD ROCOSO UBICADO EN EL SECTOR LISBOA-QUEBRADA EL RAMO EN EL MUNICIPIO DE BETULIA-SANTANDER, POR MEDIO DE LOS MÉTODOS CINEMÁTICO, GEOTÉCNICO Y GEOFÍSICO.

JAVIER RICARDO MARTÍNEZ GALVIS

Proyecto de grado.

Director

Ing. MSc. JULIÁN ANDRÉ GALVIS.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2018

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. LOCALIZACIÓN	16
3. JUSTIFICACIÓN.....	18
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
4.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	19
5. METODOLOGÍA.....	23
5.1 DISEÑO.....	23
5.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	23
5.3 INSTRUMENTOS	24
5.4 PROCEDIMIENTO	24
5.4.1 Fase de Recopilación de información bibliográfica para el área de interés ..	24
5.4.2 Análisis de la información, y unificación de metodologías.....	24
5.4.3 Trabajo de campo.....	24
5.4.4 Integración de resultados.....	25
6. MARCO TEÓRICO	26
6.1 FUNDAMENTO TEÓRICO	26
6.1.1 Marco conceptual	26
6.1.2 Marco Geológico.....	28
7. RECONOCIMIENTO DE CAMPO DEL TALUD ROCOSO.....	31
7.1 DESCRIPCIÓN DEL MACIZO ROCOSO.....	35
8. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL MACIZO ROCOSO	40

8.1 MACIZO ROCOSO ZONA 1 Y ZONA 3	43
8.1.1 Conteo volumétrico de discontinuidades Jv	43
8.1.2 Valor de RQD	44
8.1.2 Valor de RMR básico (Bieniawski, 1976)	44
8.1.3 Valor de RMR (Bieniawski, 1989)	49
8.1.4 Valor RMR (Bieniawski-Geocontrol, 2014).....	51
8.1.5 Valor de Q (Barton, 1974)	53
8.1.6 Valor de GSI (Hoek et al, 2000).	57
8.1.7 Valor de R _{Mi} (Palmstrom, 1996).....	58
8.1.8 Valor de J _f (Ramamurthy, 2004).	61
8.1.9 Valor de RMS (Stille et al 1982).....	64
8.1.10 Valor de N y RCR (Goel et al 1996).	65
8.1.11 Valor SRI (Rocas Sedimentarias) (Salcedo, 1999).....	65
8.1.12 Estimación de la resistencia a la compresión uniaxial de la masa rocosa. .	68
8.1.13 Estimación del módulo de elasticidad de la masa rocosa.....	69
8.1.14 Estimación del ángulo de fricción y la cohesión de la masa rocosa (ϕ_m y c_m).	70
8.1.15 Construcción de la curva τ vs. σ para la discontinuidad a lo largo de la cual puede ocurrir una falla Planar (estratificación).....	75
8.2 MACIZO ROCOSO ZONA 2	79
8.2.1 Conteo volumétrico de discontinuidades Jv.	79
8.2.2 Valor de RQD.	80
8.2.3 Valor de RMRbásico (Bieniawski, 1976).	80
8.2.4 Valor de RMR (Bieniawski, 1989).	85
8.2.5 Valor de RMR (Bieniawski-Geocontrol, 2014).....	87
8.2.6 Valor de Q (Barton, 1974).	89
8.2.7 Valor de GSI (Hoek et al, 2000).	93
8.2.8 Valor de R _{Mi} (Palmstrom, 1996).....	94
8.2.9 Valor de J _f (Ramamurthy, 2004).	96
8.2.10 Valor de RMS (Stille et al 1982).....	97

8.2.11 Valor de N y RCR (Goel et al 1996).	98
8.2.12 Valor SRI (Rocas Sedimentarias) (Salcedo, 1999).....	99
8.2.13 Estimación de la resistencia a la compresión uniaxial de la masa rocosa. 101	
8.2.14 Estimación del módulo de elasticidad de la masa rocosa.....	102
8.2.15 Estimación del ángulo de fricción y la cohesión de la masa rocosa (ϕ_m y c_m).	103
8.3 RESUMEN DE LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL MACIZO ROCOSO EN LAS ZONAS 1, 2 Y 3.....	110
8.4 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL, MÓDULO DE ELASTICIDAD, ÁNGULO DE FRICCIÓN Y COHESIÓN DE LA MASA ROCOSA EN LAS ZONAS 1, 2 Y 3.....	111
9. CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR MEDIO DE PROYECCIONES HEMISFÉRICAS.	114
10. CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR MEDIO DEL SOFTWARE SWEDGE.....	119
11. ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA.	125
12. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	133
13. CONCLUSIONES	135
BIBLIOGRAFÍA.....	136

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del sitio de estudio, imagen en planta satelital.....	16
Figura 2. Localización del sitio de estudio, imagen frontal satelital.	17
Figura 3. Desprendimientos de rocas sobre el pie del talud.....	20
Figura 4. Desprendimientos de rocas sobre la vía que conduce a Betulia- Santander.....	20
Figura 5. Meteorización presente en el talud de estudio.	21
Figura 6. Diseño metodológico.	23
Figura 7. Tipos de discontinuidades.	27
Figura 8. Evolución de la cordillera oriental	30
Figura 9. Mapa Geológico regional y de Localización del sitio de estudio.....	31
Figura 10. Descripción de las muestras de campo.....	32
Figura 11. Detalle del cambio de tonos del macizo rocoso asociado a proceso de oxidación	33
Figura 12. Reacción al ácido clorhídrico de las rocas calcáreas presentes en el talud.....	34
Figura 13. Estratigrafía del macizo rocoso visto sobre la margen derecha de la vía San Vicente - Bucaramanga en el Puente el Ramo en el municipio de Betulia.	34
Figura 14. Descripción del macizo rocoso.....	35
Figura 15. Identificación de familias y estratificación en el macizo Rocosu.	36
Figura 16. Toma de datos estructurales sobre areniscas calcáreas.....	36
Figura 17. Toma de datos estructurales sobre areniscas calcáreas.....	37
Figura 18. Toma de datos con el martillo Schmidt.	38
Figura 19. Abertura, frecuencia y persistencia de las discontinuidades.	38

Figura 20. Medición de la abertura, frecuencia y persistencia de las discontinuidades utilizando el decámetro.....	39
Figura 21. Esquema general de las zonas de caracterización en el talud a estudiar.....	40
Figura 22. Abaco Dispersión media de valores de resistencia MPa.....	46
Figura 23. Estimación del valor de GSI.....	58
Figura 24. Parámetros aplicados para la obtención del RMI (PALMSTROM, 1996).	59
Figura 25. Abaco Correlación entre el número de rebotes del martillo Schmidt, el peso unitario y el módulo de deformación Zona 1 y Zona 3.	61
Figura 26. Estimación de Sigci.....	71
Figura 27. Estimación de GSI.	71
Figura 28. Estimación de parámetro “mi”	72
Figura 29. Estimación de parámetro D.....	72
Figura 30. Análisis de la información.	73
Figura 31. Detalle Angulo de Fricción y Cohesión de la masa rocosa.....	73
Figura 32. Teoría de Discontinuidades Abiertas JRC, según Barton & Choubey, 1971.	77
Figura 33. Grafica τ VS σ en MPa.	79
Figura 34. Abaco Dispersión media de valores de resistencia MPa.....	82
Figura 35. Estimación del valor de GSI.....	94
Figura 36. Abaco de correlación entre el número de rebotes del martillo Schmidt, el peso unitario y el módulo de deformación-Zona 2.	96
Figura 37. Estimación de sgici.	104
Figura 38. Estimación de GSI.	104
Figura 39. Estimación de parámetro “mi”	105
Figura 40. Estimación de parámetro D con Software RocLab.....	106
Figura 41. Análisis de la información.	106
Figura 42. Detalle parámetros geotécnicos del macizo rocoso zona 2 con Software RocLab.	107

Figura 43. Incorporación de los datos estructurales en el análisis cinemático.....	115
Figura 44. Procesamiento de los datos estructurales en el análisis cinemático. .	116
Figura 45. Cálculo del factor de seguridad por medio del análisis cinemático.....	117
Figura 46. Datos de las discontinuidades.	119
Figura 47. Coeficiente sísmico inactivo.....	120
Figura 48. Factor de seguridad del talud rocoso.	121
Figura 49. Análisis tridimensional del tipo de falla en el talud rocoso.	121
Figura 50. Vista superior de la falla en cuña del talud rocoso.	122
Figura 51. Vista lateral de la falla en cuña del talud rocoso.	122
Figura 52. Coeficiente sísmico activo.....	123
Figura 53. Factor de seguridad del talud rocoso en condición dinámica.	124
Figura 54. Análisis tridimensional del tipo de falla en el talud rocoso en condición dinámica.	124
Figura 55. Adquisición de datos para la refracción sísmica.....	125
Figura 56. Línea de tendido de la refracción sísmica.	126
Figura 57. Perfil geofísico del talud rocoso a partir de ondas compresionales. ...	130
Figura 58. Interpretación del perfil geofísico del talud.	131
Figura 59. Perfil sísmico ondas p y ondas s.....	132
Figura 60. Modelo geotécnico del talud rocoso.....	134

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen Datos de Campo.....	41
Tabla 2. Datos Resumen Zonas de Estudio.....	42
Tabla 3. Correlación del material de relleno de las discontinuidades con el ángulo de fricción.	43
Tabla 4. Valores obtenidos en campo del J_v calculado.....	44
Tabla 5. Puntaje según valor de RQD.....	45
Tabla 6. Datos de Resistencia Martillo Schmidt	45
Tabla 7. Puntaje por la resistencia a la compresión simple de la roca intacta.	47
Tabla 8. Puntaje para el espaciamiento de las discontinuidades.	47
Tabla 9. Valores específicos sobre la condición física de las fracturas para obtener el Factor D.	48
Tabla 10. Puntaje según las condiciones del agua subterránea.	48
Tabla 11. Corrección en base a la orientación de las discontinuidades	49
Tabla 12. Categorías de la clasificación Geomecánicas RMR-76.	49
Tabla 13. Puntaje según las condiciones del agua subterránea RMR-89	50
Tabla 14. Clasificación geomecánica RMR 89.....	50
Tabla 15. Criterios para calcular RMRb utilizados por geocontrol.	51
Tabla 16. Criterios para la evaluación de la alterabilidad de la matriz rocosa.	53
Tabla 17. Clasificación de J_n	53
Tabla 18. Clasificación de J_r	54
Tabla 19. Clasificación de J_a	54
Tabla 20. Clasificación de J_w	55
Tabla 21. Clasificación de SRF.....	56
Tabla 22. Clasificación de Q de Barton 1974.	57
Tabla 23. Clasificación R M_i (PALMSTROM, 1996).	60

Tabla 24. Clasificación del macizo rocoso según el RMI (PALMSTROM, 1996). ..	61
Tabla 25. Clasificación No 1 Geoingenieril para Rocas y Masas Rocosas-Zona 1 y 3.	62
Tabla 26. Clasificación No 2 Geoingenieril para Rocas y Masas Rocosas-Zona 1 y 3.	62
Tabla 27. Valores de n.....	63
Tabla 28. Valores de ajuste del RMS.....	64
Tabla 29. Correlación del RMS con los parámetros geotécnicos del macizo rocoso.	64
Tabla 30. Clasificación σ_c Macizo Rcoso D. Salcedo	66
Tabla 31. Clasificación f_s , f_p Macizo Rcoso D. Salcedo.....	66
Tabla 32. Clasificación f_c Macizo Rcoso D. Salcedo.....	66
Tabla 33. Clasificación f_1 , f_2 Macizo Rcoso D. Salcedo	67
Tabla 34. Clasificación D. Salcedo	67
Tabla 35. Resumen parámetros clasificación según D. Salcedo.....	68
Tabla 36. Tabla resumen de las relaciones empíricas para la estimación de la resistencia a compresión uniaxial σ_{cm} de las masas rocosas-Zona 1 y 3.	69
Tabla 37. Resumen de resultados del módulo de elasticidad de la masa rocosa – Zona 1 y 3.....	70
Tabla 38. Clasificación de BIENIAWSKI.	74
Tabla 39. Ángulos de Fricción Básicos Típica para diferentes Rocas.	78
Tabla 40. Datos para Grafica τ VS σ	78
Tabla 41. Valores obtenidos en campo del J_v calculado.....	79
Tabla 42. Puntaje según valor de RQD.....	80
Tabla 43. Datos de Resistencia Martillo Schmidt	81
Tabla 44. Puntaje por la resistencia a la compresión simple de la roca intacta.	83
Tabla 45. Puntaje para el espaciamento de las discontinuidades del juego más importante.....	83
Tabla 46. Valores específicos sobre la condición física de las fracturas para obtener el Factor D	84

Tabla 47. Puntaje según las condiciones del agua subterránea.	84
Tabla 48. Corrección en base a la orientación de las discontinuidades.	85
Tabla 49. Categorías de la clasificación Geomecánicas RMR-76.	85
Tabla 50. Puntaje según las condiciones del agua subterránea RMR-89.	86
Tabla 51. Clasificación geomecánica RMR 89.....	87
Tabla 52. Criterios para calcular RMRb utilizados por geocontrol.....	87
Tabla 53. Criterios para la evaluación de la alterabilidad de la matriz rocosa.	89
Tabla 54. Clasificación de Jn según el número de discontinuidades.....	90
Tabla 55. Clasificación de Jr.....	90
Tabla 56. Clasificación de Ja.....	91
Tabla 57. Clasificación de Jw.....	91
Tabla 58. Clasificación de SRF.....	92
Tabla 59. Clasificación de Q de Barton 1974.....	93
Tabla 60. Clasificación R _{Mi} (PALMSTROM, 1996).....	95
Tabla 61. Clasificación No 1 Geoingenieril para Rocas y Masas Rocosas-Zona 2.	97
Tabla 62. Clasificación No 2 Geoingenieril para Rocas y Masas Rocosas-Zona 2.	97
Tabla 63. Clasificación σ_c Macizo Rocoso D. Salcedo-Zona 2.	99
Tabla 64. Clasificación f_s , f_p Macizo Rocoso D. Salcedo.....	99
Tabla 65. Clasificación f_c Macizo Rocoso D. Salcedo.....	100
Tabla 66. Clasificación f_1 , f_2 Macizo Rocoso D. Salcedo.	100
Tabla 67. Clasificación D. Salcedo.	101
Tabla 68. Resumen parámetros clasificación según D. Salcedo.....	101
Tabla 69. Tabla resumen de las relaciones empíricas para la estimación de la resistencia a compresión uniaxial σ_{cm} de las masas rocosas-Zona 2.	102
Tabla 70. Resumen de resultados del módulo de elasticidad de la masa rocosa – Zona 2.	103
Tabla 71. Clasificación de BIENIAWSKI.	108

Tabla 72. Resumen resistencia a la compresión uniaxial y módulo de elasticidad zona 1 y 3.....	111
Tabla 73. Resumen ángulo de fricción y cohesión zona 1 y 3.....	112
Tabla 74. Resumen resistencia a la compresión uniaxial y módulo de elasticidad zona 2.....	112
Tabla 75. Resumen ángulo de fricción y cohesión zona 2.	113
Tabla 76. Resumen datos de adquisición del ensayo de refracción sísmica del talud rocoso.	127
Tabla 77. Ensayo de ondas superficiales MASW 1D y correlación con parámetros geotécnicos.	129

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Análisis de estabilidad del talud rocoso ubicado en el sector Lisboa-quebrada El Ramo en el municipio de Betulia-Santander, por medio de los métodos cinemático, geotécnico y geofísico.

AUTOR(ES): Javier Ricardo Martínez Galvis

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Julian André Galvis

RESUMEN

Se analizó el talud rocoso ubicado en el sector Lisboa-quebrada El Ramo en el municipio de Betulia -Santander, por medio del conocimiento geotécnico con el objetivo de establecer la estabilidad de este utilizando los métodos de análisis de las discontinuidades, la caracterización geotécnica del macizo rocoso y el modelo geofísico a partir del ensayo de refracción sísmica, para identificar las zonas de inestabilidad y obtener el factor de seguridad de forma manual y por medio de herramientas computacionales, para posteriormente compararlo con los requisitos mínimos establecidos por la norma sismo resistente colombiana del 2010, y por medio de las recomendaciones generadas a partir de estos resultados contribuir al conocimiento de la zona de estudio la cual está afectada por procesos geológicos.

PALABRAS CLAVE:

Análisis de estabilidad, geofísica, geotecnia, talud rocoso, Betulia-Santander.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Stability analysis of the rocky slope located in the Lisboa sector-EI Ramo valley in the municipality of Betulia-Santander, by means of kinematic, geotechnical and geophysical methods.

AUTHOR(S): Javier Ricardo Martinez Galvis

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Julian André Galvis

ABSTRACT

Analyze the rocky slope located in the sector of Lisboa-ravine El Ramo in the municipality of Betulia-Santander, by means of geotechnical knowledge with the aim of establishing the stability of this using the methods of analysis of discontinuities, the geotechnical characterization of the rock mass and the geophysical model from the seismic refraction test, to identify areas of instability and obtain the safety factor manually and by means of computational tools, to later compare it with the minimum requirements established by the Colombian earthquake resistant norm of 2010 , and through the recommendations generated from these results contribute to the knowledge of the study area which is affected by geological processes.

KEYWORDS:

Stability analysis, geophysics, geotechnics, rocky slope, Betulia-Santander.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

El aporte geotécnico enfocado en el estudio de amenazas naturales permite darles a los municipios del territorio colombiano conocimientos para que estos puedan administrar, prevenir y/o minimizar los riesgos naturales, que pueden llegar a ser nocivos para las sociedades, en materia económica, obras civiles, el manejo de los recursos naturales, y para la misma población.

Por tal motivo se hace necesario realizar estudios de estabilidad de taludes, para comprender el comportamiento de los macizos rocosos, teniendo en cuenta factores como la litología, discontinuidades, pendiente y la meteorización en cada uno de estos.

Este trabajo está enfocado en el estudio del talud rocoso ubicado en el sector Lisboa-Quebrada El Ramo, del lugar se obtuvieron los insumos necesarios como mapas geológicos, clasificaciones geotécnicas, valores de resistencia a la compresión confinada de forma directa e indirecta de los materiales, descripción de la orientación de las discontinuidades, para identificar sectores críticos e inestables, o altamente susceptible a procesos naturales y a partir de esto se cuantificó el factor de seguridad y se generaron los modelos geotécnico y geofísico, los cuales se observan a lo largo del documento.

En general es un área que presenta afectaciones por procesos geológicos debido a la complejidad estructural a la cual se encuentra sometida la zona de estudio, aledaña al embalse de Hidrosogamoso teniendo como principal exponente el sistema de fallas de San Vicente y localmente la falla el Ramo, lo cual se ve reflejado en los procesos de inestabilidad de los taludes que generan caídos de rocas y en el alto fracturamiento de los macizos rocosos aflorando en los cortes realizados para las vías del sector.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la estabilidad del talud rocoso ubicado en el sector Lisboa-quebrada El Ramo en el municipio de Betulia-Santander por medio de los métodos cinemático, geotécnico y geofísico.

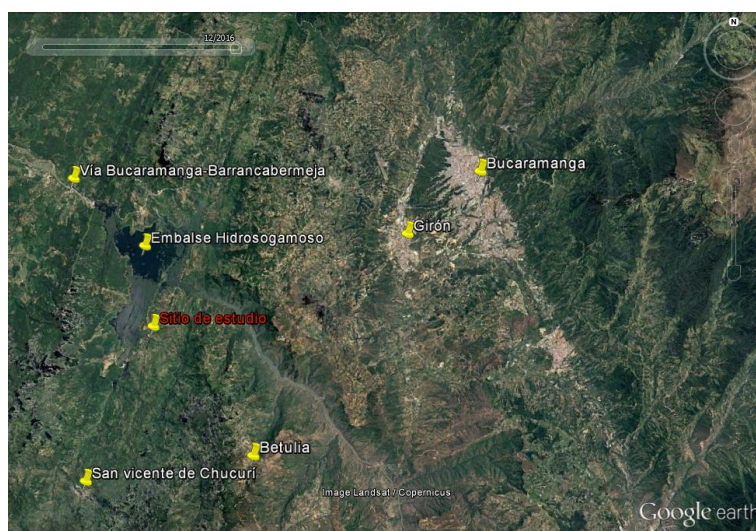
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las condiciones geológicas para definir las unidades litoestratigráficas aflorantes y el ambiente tectónico al cual está expuesto el sector de estudio.
- Plantear un modelo geotécnico a partir de las propiedades geomecánicas de los materiales presentes en el talud.
- Identificar los diferentes mecanismos de activación en la zona y su influencia en la estabilidad del talud.
- Establecer el factor de seguridad por medio de herramientas computacionales y el análisis cinemático.
- Generar recomendaciones para la estabilidad del talud a partir de los modelos obtenidos.

2. LOCALIZACIÓN

El talud rocoso se encuentra ubicado en el PR 50+000 vía Bucaramanga – San Vicente, sector de Lisboa, quebrada el ramo, en el municipio de Betulia, en el departamento de Santander.

Figura 1. Localización del sitio de estudio, imagen en planta satelital.



Fuente: Google earth

Coordenadas planas magna-sirgas origen Bogotá: NORTE (X) = 1.265.747, ESTE (Y) = 1.078.978

Figura 2. Localización del sitio de estudio, imagen frontal satelital.



Fuente: Google earth

3. JUSTIFICACIÓN

Para la economía del país es de vital importancia mantener en buen estado de transitabilidad y seguridad vial a las carreteras Nacionales, por lo tanto por medio del análisis de estabilidad de este talud permitirá un mayor conocimiento de un área en particular para que se ofrezcan mejores condiciones para los habitantes de la zona y una mejor conectividad para realizar una fácil comercialización de los productos, con facilidad para el transporte y menores tiempos de viaje, debido a que los taludes que se encuentran en el municipio de Betulia-Santander, se ven afectados principalmente en las épocas de altas precipitaciones afectando directamente aspectos socioeconómicos importantes para la región.

Por lo tanto, este trabajo se enfocó en la zona que corresponde al talud generado por efecto de las excavaciones para la vía de acceso al sector Lisboa-quebrada El Ramo, el cual en general, predominan rocas fracturadas y moderadamente meteorizadas que generan bloques de diversos tamaños y se presentan susceptibles de caídas durante fuertes precipitaciones.

Por consiguiente, en este lugar se realizó un diagnóstico para evaluar las condiciones de estabilidad a las que está expuesto el talud, por medio de los conocimientos geológicos y geotécnicos, lo que nos permitió obtener mayor información sobre este, para contribuir al conocimiento de esta zona y posteriormente se pueda dar una buena funcionalidad a esta vía.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

4.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los taludes formados producto de las excavaciones para las vías terciarias presentes en el departamento de Santander, se observan en su mayoría problemas de caídas de rocas, erosión superficial y deslizamientos, principalmente en las épocas de temporadas de lluvias lo que dificulta la transitabilidad de personas, vehículos, cargas, etc., sobre las vías existentes, lo que genera retrocesos operativos afectando la economía de la región.

Para este caso en particular se trabajó en la estabilidad del talud rocoso ubicado en el sector Lisboa-quebrada El Ramo en el municipio de Betulia-Santander, por medio de los conocimientos geotécnicos adquiridos durante la carrera de ingeniería civil.

En general, en el talud predominan rocas altamente fracturadas debido al control estructural presente en la zona de estudio, y estas a su vez se observan moderadamente meteorizadas generando bloques de diversos tamaños y presentándose susceptibles a desprendimientos.

Figura 3. Desprendimientos de rocas sobre el pie del talud.



Fuente: Propia.

Figura 4. Desprendimientos de rocas sobre la vía que conduce a Betulia-Santander.



Fuente: Propia.

Adicionalmente se observó un macizo rocoso con estratigrafías muy marcadas, y un basculamiento considerable. En este se identifican rocas sedimentarias compuestas por materiales como lutitas, calizas y areniscas, presentando superficies rugosas.

Se evidenció un proceso de erosión en los estratos más débiles (Lutitas) por la exposición al medio ambiente, como son el aire y el agua, observando sectores de oxidación en sus materiales claramente reflejado por el cambio de color vertical en el macizo rocoso.

Figura 5. Meteorización presente en el talud de estudio.



Fuente: Propia.

Se identificaron dos variables importantes que gobiernan la estabilidad del talud como es la pendiente (por esta razón es posible la presencia de fallas), y la altura, ya que es visible el cambio que el macizo rocoso sufrió debido a esfuerzos de compresión que se presentaron en la zona, dando una estratigrafía casi vertical desde la parte superior del talud hasta la parte inferior, no se observa la presencia de humedad a lo largo de este.

5. METODOLOGÍA

5.1 DISEÑO

Figura 6. Diseño metodológico.



Fuente: Propia.

5.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este estudio está dirigido a todas las vías que se encuentran afectadas por procesos de inestabilidad geotécnica que comprometen macizos rocosos, tomando como muestra el talud ubicado en el municipio de Betulia- Santander, en el sector Lisboa-Quebrada El Ramo.

5.3 INSTRUMENTOS

Para la realización de este estudio se utilizaron instrumentos como: mapas, brújula, flexometro, martillo geológico, gps, martillo Smith, equipo de refracción sísmica, Stereonet y junto a esto el software Swedge para el análisis de los mecanismos de falla del talud.

5.4 PROCEDIMIENTO

5.4.1 Fase de Recopilación de información bibliográfica para el área de interés

En esta fase se recolectó la información existente con respecto a los Municipios de Betulia y San Vicente de Chucuri los cuales influyen en el área de estudio, la cual consta de mapas, memorias explicativas y estudios previos realizados en esta zona.

5.4.2 Análisis de la información, y unificación de metodologías

En esta fase se realizó la revisión sobre la información recopilada, para enfocarla al área de estudio, de lo cual se obtuvo un mayor entendimiento de la zona, e identificamos los parámetros necesarios que se recolectaron del trabajo de campo para las clasificaciones geotécnicas que utilizamos para los macizos rocosos y el análisis cinemático, para la interpretación del talud.

5.4.3 Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en la adquisición de datos, los cuales fueron utilizados para la generación de los modelos geofísico, geotécnico y cinemático. Se utilizaron formatos establecidos para la recolección de estos, donde incluyen: abertura, espaciamiento, condiciones hidrostáticas, persistencia, rugosidad y orientación de las discontinuidades.

Además, se realizó la adquisición de datos para la refracción sísmica y su posterior procesamiento en oficina.

5.4.4 Integración de resultados Se procedió a unificar toda la información recolectada durante la fase de campo para su utilización en la generación de los modelos sugeridos en este documento y su posterior interpretación.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 FUNDAMENTO TEÓRICO

6.1.1 Marco conceptual Un macizo rocoso se define como medio discontinuo, anisotrópico y heterogéneo, el cual consta de bloques de matriz rocosa y de una serie de discontinuidades que definen el comportamiento mecánico de este.

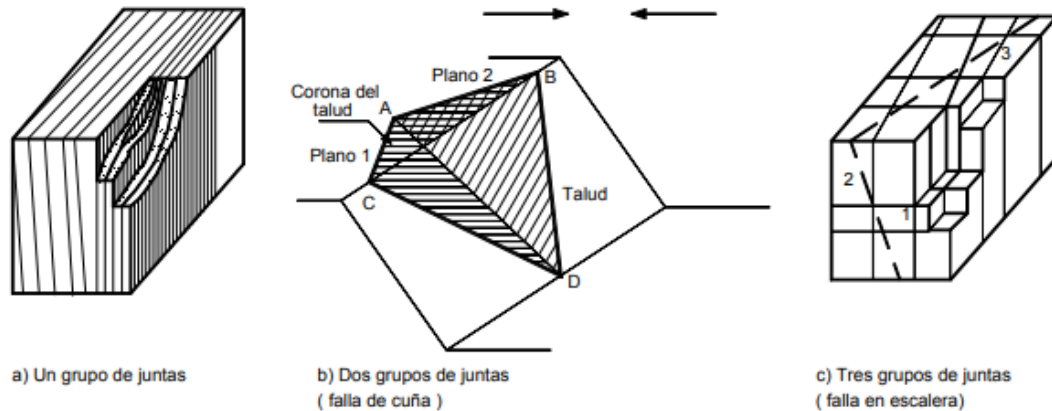
Uno de los problemas más comunes de los macizos rocosos está relacionado con el desprendimiento de bloques de roca que representan una de las amenazas con mayor riesgo para las vidas humanas, principalmente en vías de comunicación. El control de los taludes rocosos está enfocado a minimizar los niveles de riesgo, por medio de un análisis racional.

El mecanismo de falla de los taludes en roca está controlado por la orientación de su sistema de discontinuidades. Dependiendo de la magnitud de las discontinuidades del macizo rocoso, pueden ocurrir fallas sectorizadas las cuales involucran pequeños bloques de material o fallas que afecten taludes completos [1].

Por medio de una Stereonet donde se pueden incluir todos los datos estructurales se puede generar un diagrama de concentraciones de polos, para identificar bloques inestables relacionados a diferentes modos de ruptura. En este proceso se ignoran las cargas estáticas y dinámicas externas y la presencia del agua.

Existen diferentes tipos de fallas para los taludes en roca como son la falla planar, en cuña e inclinación o volteo y estas están relacionadas con lo anteriormente mencionado.

Figura 7. Tipos de discontinuidades [1].



En ingeniería se evalúa la estabilidad de un talud en relación a un factor de seguridad (FS), el cual se obtiene a través de un análisis de estabilidad. La composición del material que forma un talud está relacionado con el proceso de inestabilidad que puede afectarlo, el grado de susceptibilidad ante la ocurrencia de deslizamientos o roturas está relacionado con la litología del material además de la competencia y grado de meteorización [2].

El Uso de “Software” es una herramienta esencial para el análisis de los taludes, para este caso utilizaremos el Software Swedge que nos permitirá analizar el modo potencial de falla y el factor de seguridad teniendo en cuenta las orientaciones de las discontinuidades en el talud en estudio.

En los estudios geotécnicos para taludes en roca se menciona principalmente el método (RMR) el cual permite clasificar los macizos rocosos de acuerdo a lo descrito por Bieniawski (1972).

Este autor estima la calidad del macizo rocoso utilizando los parámetros de resistencia a la compresión confinada de los materiales, índice de calidad de la roca (RQD), características de los planos de anisotropía, y las condiciones del agua

subterránea. Con la estimación del valor del RMR es posible conocer algunas propiedades geomecánicas del macizo rocoso, para analizar la estabilidad del talud.

Junto a este se utiliza el sistema Q de Barton, el cual incluye parámetros como él (RQD), número de sistemas de discontinuidades, rugosidad, alteración y factor de reducción por agua en estas, y el factor de reducción por esfuerzos. El cual es usado principalmente para túneles, adicionalmente se tomarán las clasificaciones de Hoek, Palmstrom, Ramamurthy y Salcedo como complemento de las clasificaciones de Bieniawski y Barton para generar un análisis detallado del macizo rocoso.

En este documento se evaluaron las condiciones de estabilidad de un talud en particular tomando en cuenta no solo las diferentes clasificaciones geomecánicas existentes que caracterizan los macizos rocosos sino incluyendo además un estudio detallado de la cinemática de las discontinuidades y su respuesta ante la transmisión de ondas longitudinales a partir de ensayos de refracción sísmica en la cual se midieron los tiempos de viaje de las ondas elásticas, que recorren entre la generación de las ondas sísmicas y la llegada a diferentes puntos de recepción. Para lo cual se contó con una serie de receptores de señal (geófonos) que se dispusieron en línea recta, generando un tendido sísmico o línea de refracción, para determinar las condiciones de meteorización, fracturamiento y en algunos casos para la detección de fallas geológicas.

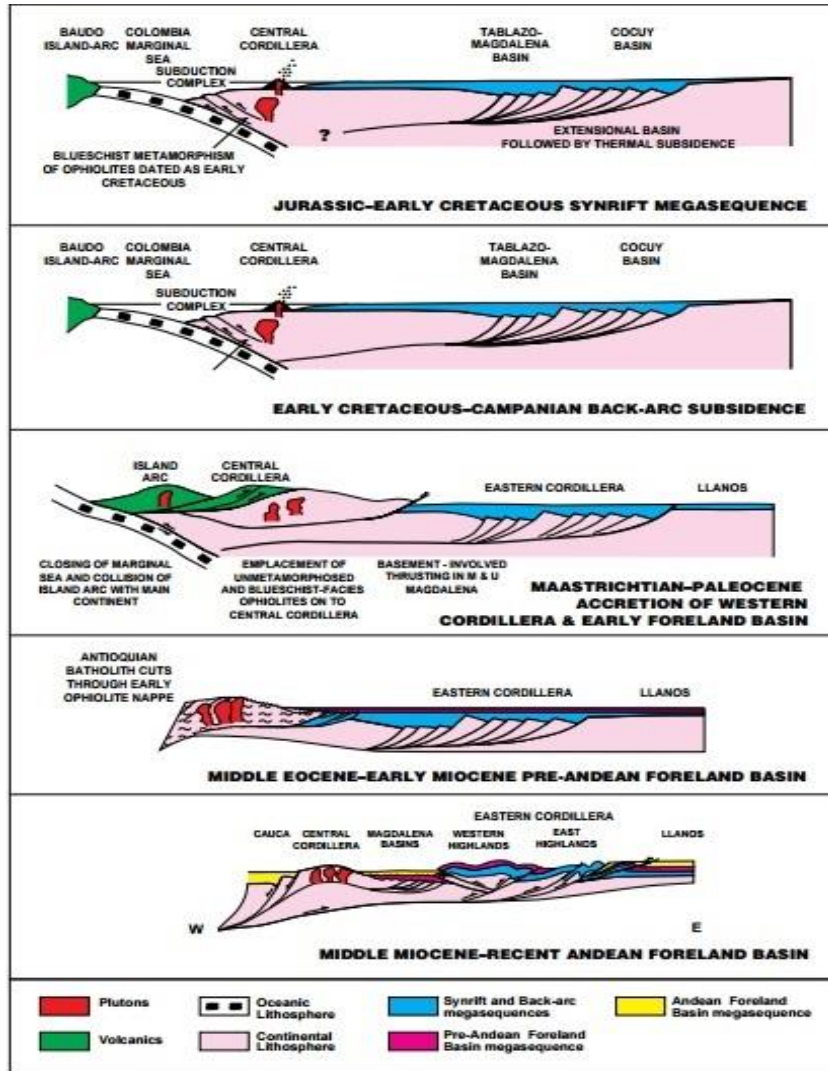
6.1.2 Marco Geológico La geología colombiana está representada por el Sistema Montañoso Andino y por el Cratón Amazónico. Eventos tectónicos que influyeron en la evolución geológica de las cuencas generadas a lo largo del país y se encuentran estrechamente ligadas a la evolución del margen activa del oeste de Sur América [3], reflejando la interacción de varios campos de esfuerzos que han acrecionado terrenos oceánicos y continentales a lo largo de esta margen, levantando los Andes del Norte a lo largo del tiempo geológico [4]

La cordillera oriental, la cuenca de los llanos y el valle medio del Magdalena, constituyen regionalmente una importante cuenca sedimentaria que va desde el Triásico-Jurásico al Mioceno medio [3].

Para la zona de estudio durante el Triásico y Jurásico, fueron depositadas facies continentales, y volcánicas en cuencas extensionales durante el Triásico, estas cuencas están relacionadas con las separaciones de Pangea y a partir del Jurásico, se desarrollan detrás de un arco magmático relacionadas a la subducción que se genera en el borde oeste de Sur América [5]. Durante el Cretácico Inferior, facies marinas fueron acumuladas dentro de un sistema de cuencas extensionales, la sedimentación de plataforma marina terminó al final del Cretácico, debido al amalgamamiento de terrenos oceánicos de la cordillera Occidental [5].

Con la unión de la cordillera Occidental se dio paso a un episodio deposicional que consistió de llanuras aluviales ricas en carbón, de planicies costeras y depósitos estuarinos a lo largo del valle medio, la cordillera oriental y la cuenca de los llanos, desde el Maastrichtiano hasta principios del Eoceno. Esta misma secuencia se mantuvo hasta principios del Mioceno, luego de la deformación del Eoceno medio en la cuenca del valle medio del Magdalena. El Mioceno medio comienza con la deformación Andina en la cordillera Oriental aislando el Valle Medio de la cuenca de los llanos, la deformación estuvo controlada por una inversión tectónica, lo cual dio inicio a la acumulación de facies fluviales, producto de la orogenia de la cordillera Oriental [3].

Figura 8. Evolución de la cordillera oriental [3]

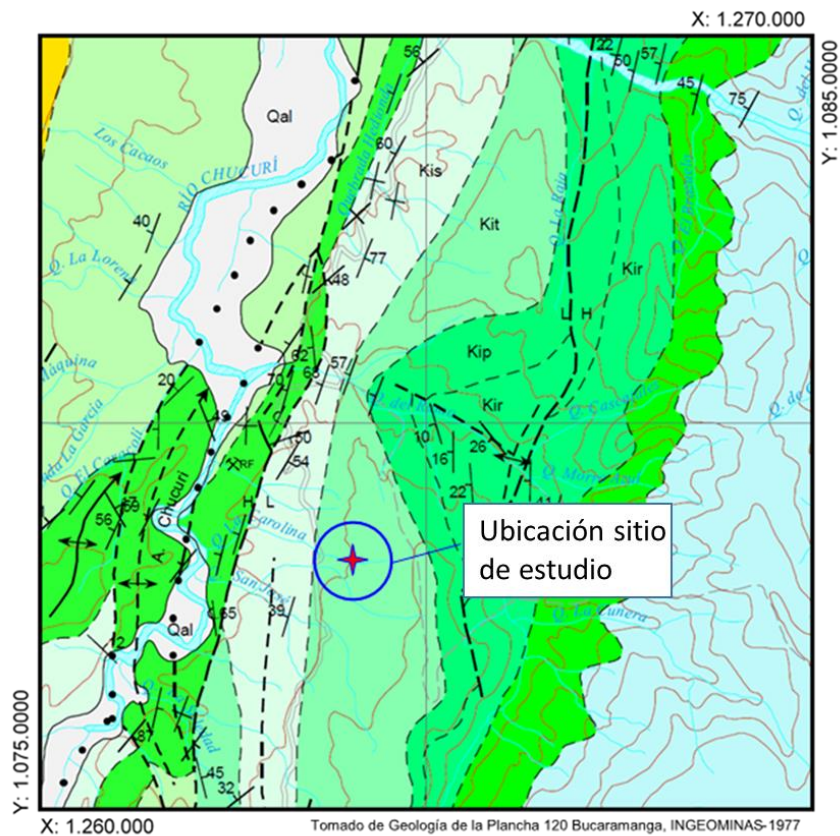


Esta tectónica es parte importante para el estudio del talud ya que el replegamiento y fracturamiento de las rocas generan fenómenos de inestabilidad en las laderas.

7. RECONOCIMIENTO DE CAMPO DEL TALUD ROCOSO

El trabajo de campo consistió en la descripción litológica y la medición de datos estructurales, donde se identificó la naturaleza y el tipo de roca aflorantes; presencia de fallas geológicas, y fracturas tectónicas; meteorización química y física, grados de alteración, y humedad presente en el talud, entre otros.

Figura 9. Mapa Geológico regional y de Localización del sitio de estudio. [6]



LEYENDA

Kita	Formación Tambor	Kit	Formación Tablazo
Kir	Formación Rosa Blanca	Kis	Formación Simiti
Kip	Formación Paja	Qal	Aluvi6n

En la zona de estudio se observó un macizo rocoso con estratigrafías muy marcadas, y estructuras de plegamientos muy pronunciados. En este se identificó

un sistema estratificado de rocas sedimentarias caracterizado principalmente por materiales como lutitas, calizas, y areniscas, presentando diaclasamiento y superficies rugosas.

Figura 10. Descripción de las muestras de campo.



Fuente: Propia

En este macizo rocoso, se evidenció un proceso de erosión en los estratos más débiles (Lutitas) por la exposición al medio ambiente, como lo son el aire, el agua y viento, observando sectores de oxidación en sus materiales claramente reflejado por el cambio de color vertical en este.

Figura 11. Detalle del cambio de tonos del macizo rocoso asociado a proceso de oxidación



Fuente: Propia.

El talud rocoso se caracteriza principalmente por capas tabulares compuestas por una intercalación de calizas esparíticas, calizas arenosas y shales con laminación plano paralela, este afloramiento es correlacionable con la formación Tablazo [7] como se observa en la figura 9.

Figura 12. Reacción al ácido clorhídrico de las rocas calcáreas presentes en el talud.



Fuente: Propia.

Figura 13. Estratigrafía del macizo rocoso visto sobre la margen derecha de la vía San Vicente - Bucaramanga en el Puente el Ramo en el municipio de Betulia.



Fuente: Propia.

7.1 DESCRIPCIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Durante la fase de campo se planteó la realización de algunos ensayos para la descripción del macizo rocoso y su calidad.

Primeramente, se realizó la descripción física del macizo rocoso para la observación de los posibles mecanismos de falla, posteriormente se realizaron las mediciones de los datos estructurales de la estratigrafía y de las diaclasas.

Adicionalmente se realizó el ensayo a la compresión simple de la roca por medio del martillo Schmidt.

Figura 14. Descripción del macizo rocoso.

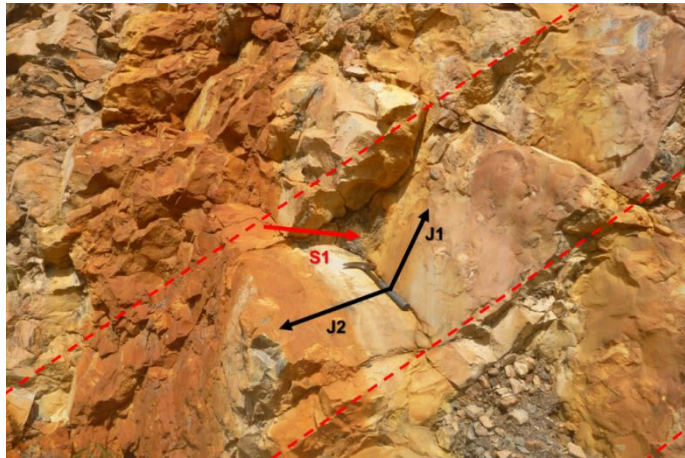


Fuente: Propia.

Los planos de estratificación son diagonales, casi verticales y las familias de diaclasas, los cuales son discontinuidades; los planos de estratificación y las diaclasas forman bloques.

Se pudo identificar que el macizo rocoso adquiere una tendencia de deslizamiento en cuña, ya que es visible el comportamiento de los bloques de roca y sus ángulos de falla.

Figura 15. Identificación de familias y estratificación en el macizo Rocoso.



Fuente: Propia.

Figura 16. Toma de datos estructurales sobre areniscas calcáreas.



Fuente: Propia.

Figura 17. Toma de datos estructurales sobre areniscas calcáreas.



Fuente: Propia.

El ensayo con **Martillo de Schmidt** se realizó por medio del siguiente proceso:

1. Se realizó sobre una superficie lisa de roca expuesta, por lo que se tuvieron que retirar cualquier deformación que la roca pudiera tener, para así tener preparada la superficie con una piedra abrasiva normalizada (viene incluida con el martillo).
2. Se realizó en el ensayo un total de 20 repeticiones uniformemente repartidas sobre la superficie de ensayo y anotamos el resultado de cada rebote. La idea es que los valores fueran representativos de la visión general del elemento e intentamos conseguir a priori valores relativamente cercanos entre sí.
3. Descartamos las lecturas más altas tomadas en campo para determinar el promedio de las lecturas restantes.

Figura 18. Toma de datos con el martillo Schmidt.



Fuente: Propia.

Para la toma de los datos de espaciado, persistencia o continuidad, y abertura de las discontinuidades se realizó utilizando la metodología que se muestra en la figura 19.

Figura 19. Abertura, frecuencia y persistencia de las discontinuidades [2].

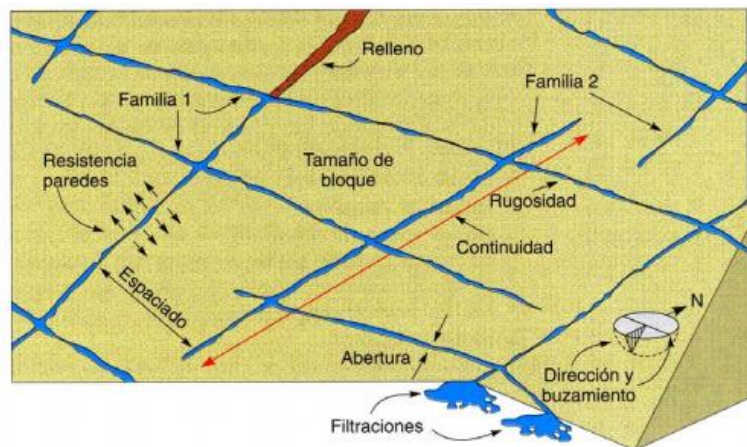


Figura 20. Medición de la abertura, frecuencia y persistencia de las discontinuidades utilizando el decámetro.

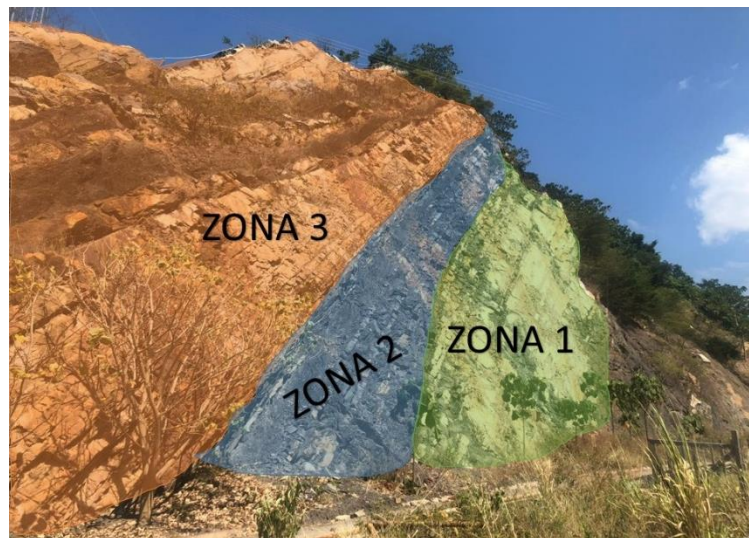


Fuente: Propia.

8. MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL MACIZO ROCOSO

Para el análisis y distribución del trabajo en campo, se planteó dividir el talud rocoso en tres zonas con diferentes características y condiciones según lo observado en campo; la zona 1 está compuesta por calizas y areniscas calcáreas, son rocas competentes, la zona 2 está compuesta por Shales calcáreos, es una roca dúctil y la zona 3 presenta las mismas condiciones que la zona 1 con un leve cambio de color en la meteorización.

Figura 21. Esquema general de las zonas de caracterización en el talud a estudiar.



Fuente: Propia.

Tabla 1. Resumen Datos de Campo

RESUMEN - DATOS DE CAMPO	
RUMBO DEL TALUD	E-W
ALTURA	50 METROS
PENDIENTE	70°
FRENTE	POSICION NORTE
CORONA	HORIZONTAL CRESTA
ZONA 1	CALIZAS
ZONA 2	LUTITA DESCOMPUESTA
ZONA 3	Z1=Z3 SON SIMILARES

Fuente: Propia.

A continuación, se presentan los datos necesarios de las discontinuidades para el análisis del macizo rocoso los cuales fueron recolectados durante la fase de campo.

Tabla 2. Datos Resumen Zonas de Estudio.

RESUMEN - DATOS DE LAS ZONAS 1, 2 y 3											
	Rumbo	Buzamiento	Textura	Dureza	Relleno	Espaciamiento (CM)	Frecuencia	Abertura (MM)	Persistencia		Fricción
Estratificación	N20E	49N			Arcilla <25%	12, 1.10, 39, 1.30, 5	1.58	NO HAY	100%		20.00
	N25E	64N									
	N30E	61N									
Diaclasa 1	N65W	84S	Semilisa	Dura	Arcilla <25%	53, 12, 20, 10, 47, 20, 20, 39, 51	0.30	2.00	25 M	Plana meteorizada	24.00
	N75W	79S									
Diaclasa 2	N15E	31S	Semilisa	Dura	Con vetas de cuarzo<2MM , Arcilla 25%	54, 25, 80, 50	0.52	4.00	15 M	Plana meteorizada	26.00

Fuente: Propia.

Tabla 3. Correlación del material de relleno de las discontinuidades con el ángulo de fricción [8].

Material de Relleno	Ángulo de Fricción Φ_j°	Resistencia de discontinuidad $r = \tan \Phi_j^\circ$
Arena gravosa	45	1.00
Arena gruesa	40	0.84
Arena fina	35	0.70
Arena limosa	32	0.62
Arena arcillosa	30	0.58
Limo arcilloso		
Arcilla-25%	25	0.47
Arcilla-50%	15	0.27
Arcilla-75%	10	0.18

Con los datos obtenidos en campo, se procedió a estimar la clasificación del macizo rocoso mediante diferentes autores como son: Bieniawski, Geocontrol, Barton, Hoek, Palmstrom, Ramamurthy, Goel, Salcedo, y Yudhbir, con la finalidad de obtener los parámetros geotécnicos del mismo.

8.1 MACIZO ROCOSO ZONA 1 Y ZONA 3

Se realizó la clasificación de la zona 1 y zona 3 de la misma manera, ya que los parámetros y propiedades del macizo rocoso son semejantes.

8.1.1 Conteo volumétrico de discontinuidades J_v

$$J_v = 1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3 \dots + 1/S_N$$

donde N = Número de discontinuidades aleatorias.

S= Longitud en metros/ # de discontinuidades.

Tabla 4. Valores obtenidos en campo del Jv calculado

Inclinación	Distancia (m)	# de Discontinuidades	1/s
Horizontal	10	28	2,8
Diagonal 55NE	10	18	1,8
Diagonal 65NW	10	20	2
Horizontal	10	12	1,2
		Jv	7,8

Fuente: Propia.

8.1.2 Valor de RQD Con base en las siguientes expresiones:

a) **RQD = 110 – 2.5 Jv** (Palmstrom 2005)

$$RQD = 110 - 2,5 \cdot 7,8 = 90,5\%$$

b) **RQD = 100 * e^(-0,1λ) * (0,1 λ +1)**. (Priest & Hudson, 1976)

$$RQD = 100 \cdot e^{(-0,1 \cdot 5)} [0,1 \cdot 5 + 1] = 90,98\%$$

Donde λ es la frecuencia total de discontinuidades dividido en una longitud dada, para esta zona se realizaron 3 mediciones de un metro cada una dando como resultado 5 discontinuidades por metro en promedio.

8.1.2 Valor de RMR básico (Bieniawski, 1976) Parámetros iniciales: De acuerdo a los valores obtenidos en el punto anterior de RQD: 90,5% se clasifico el Factor A entre 75-90 con un puntaje de 20.

Tabla 5. Puntaje según valor de RQD [8]

RQD	Puntaje
90-100	20
75-90	17
50-75	13
25-50	8
<25	3

El valor de resistencia a la compresión simple fue el dado mediante datos tomados en campo del número de rebotes martillo Schmidt en Zona1 y Zona3.

Tabla 6. Datos de Resistencia Martillo Schmidt

44	59	57	56	64	61	56	55	57	58
49	62	56	57	53	60	62	51	59	55

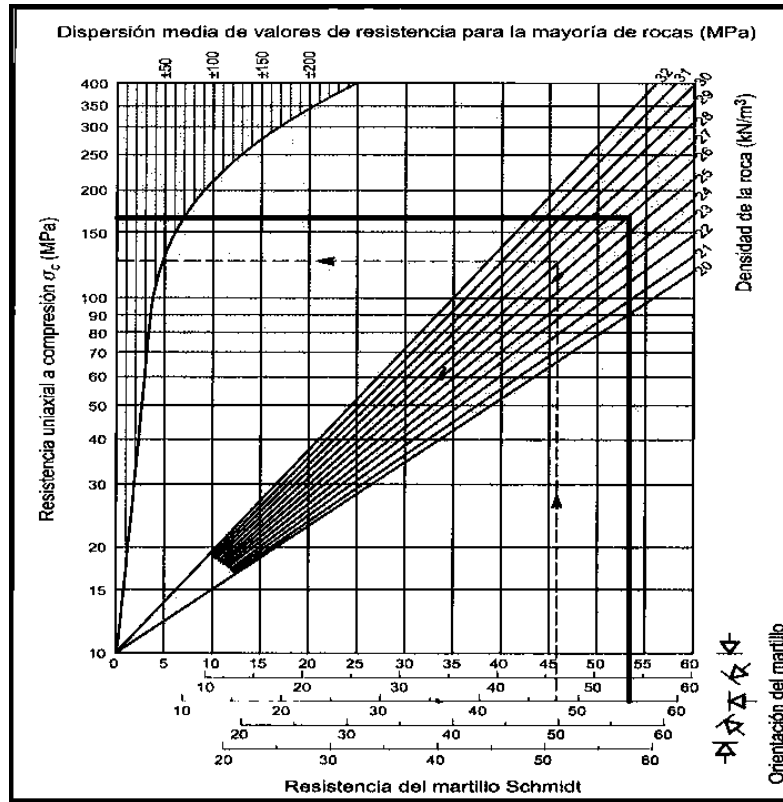
Fuente: Propia.

$$(44+49+56+57+56+57+53+56+55+57)/10=54$$

Para la Zona 1 y Zona 3 el número promedio de rebotes es 54.

La densidad promedio en este tipo de rocas calizas y areniscas calcáreas es de 26KN/M3.

Figura 22. Abaco Dispersión media de valores de resistencia MPa [8].



De la tabla anterior se obtuvo un valor aproximado de 160 Mpa, y se clasifica el Factor B con la tabla 7 con el que se obtuvo un puntaje de 12.

Tabla 7. Puntaje por la resistencia a la compresión simple de la roca intacta [8].

Índice ensayo de carga puntual (Mpa)	Resistencia a Compresión Simple RCB (Mpa)	Puntaje
>10	>250	15
4 - 10	100 - 250	12
2 - 4	50 - 100	7
1 - 2	25 - 50	4
N/A	10 - 25 (9-25)	2
N/A	3 - 10 (1-5)	1
N/A	<3 (<1)	0

Para el factor C observamos el valor de separación de las discontinuidades el cual se encuentra en el rango de 200 a 600 mm, por lo cual se obtuvo un puntaje de 10.

Tabla 8. Puntaje para el espaciamiento de las discontinuidades [8].

Espaciamiento , (m)	Puntaje
>2	20
0.6 - 2	15
0.2 - 0.6	10
0.06 - 0.2	8
< 0.06	5

Para obtener el Factor D sumamos las condiciones físicas de las discontinuidades, persistencia, abertura, grado de aspereza, tipo de relleno y grado de alteración de los planos de contacto, entonces $D=E1+E2+E3+E4+E5$ respectivamente.

Teniendo en cuenta los datos de campo, se observó que en general las discontinuidades presentan una persistencia <1m, con abertura entre 0.25 y 0.5 mm, ásperas, con relleno principalmente duro con un espesor <5mm y moderadamente alterados los planos de contacto.

Teniendo en cuenta estas consideraciones entramos a la tabla 9 para la obtención del puntaje para este factor.

Tabla 9. Valores específicos sobre la condición física de las fracturas para obtener el Factor D [8].

Persistencia o longitud (E1)	Abertura (E2)	Grado de aspersion (E3)	Tipo de relleno (E4)	Grado de alteración planos de contacto (E5)
< 1 m (6)	Ninguna (6)	Muy ásperas (6)	Ninguno (6)	Inalteradas (6)
1-3 m (4)	< 0.1 mm (5)	Ásperas (5)	Relleno duro <5 mm (4)	Ligeramente alteradas (5)
3-10 m (2)	0.1-1.0 mm (4)	Ligeramente ásperas (3)	Relleno duro <5 mm (2)	Moderadamente alteradas (3)
10-20 m (1)	1-5 mm (1)	Suaves (1)	Relleno suave <5 mm (2)	Altamente alteradas (1)
> 20 m (0)	> 5 mm (0)	Pulidas (0)	Relleno suave >5 mm (0)	Descompuestas (0)

En este caso realizando la sumatoria de todas las propiedades resultó un puntaje para el factor D de 22.

Para el Factor E se necesitan las condiciones de agua subterránea, para nuestro macizo rocoso no se observó presencia de agua, los planos de discontinuidad se encontraban en condiciones secas, por lo cual tomamos un puntaje de 10.

Tabla 10. Puntaje según las condiciones del agua subterránea [8].

Ground Water	General Conditions	Completely Dry	Moist only	Water under moderate pressure
Rating		10	7	4

Para el Factor F tuvimos en cuenta la orientación de las discontinuidades que para el caso del talud de estudio lo consideramos como regular debido al fracturamiento y que se podría presentar fallas en cuñas.

Tabla 11. Corrección en base a la orientación de las discontinuidades [8]

ORIENTACION DEL RUMBO Y BUZAMIENTO		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	REGULAR	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
VALORES	TUNELES Y MINAS	0	-2	-5	-10	-12
	CIMENTACIONES	0	-2	-7	-15	-25
	TALUDES	0	-5	-25	-50	-60

De acuerdo a lo anterior se obtuvieron los siguientes puntajes:

Factor A: 20 puntos

Factor B: 12 puntos

Factor C: 10 puntos

Factor D: 22 puntos

Factor E: 10 puntos

Factor F: -25 puntos

TOTAL: 49 PUNTOS

Con este valor entramos a las categorías de clasificación geomecánicas para obtener la calidad del macizo rocoso según el RMR 76.

Tabla 12. Categorías de la clasificación Geomecánicas RMR-76 [8].

VALOR TOTAL DEL R.M.R	81-100	61-80	11-60	21-30	<20
CLASE NUMERO	I	II	III	IV	V
DESCRIPCION	MUY BUENO	BUENO	MEDIO	MALO	MUY MALO

8.1.3 Valor de RMR (Bieniawski, 1989) Para este método de Bieniawski la puntuación varía para las condiciones del agua subterránea por lo cual se tomaron los mismos valores del Factor A, Factor B, Factor C, Factor D calculados para la clasificación de (RMR 1976) en el anterior punto.

Factor A: 20 puntos

Factor B: 12 puntos

Factor C: 10 puntos

Factor D: 22 puntos

Factor F: -25 puntos

Para el Factor E Bieniawski modificó los puntajes dándole mayor peso cuando se encuentra completamente seco y además añadió una descripción a las condiciones generales de acuerdo al estado de humedad presente en el macizo. Para nuestro macizo de estudio el cual el día de estudio se encontraba completamente seco el puntaje dado según la tabla 13 es de 15.

Tabla 13. Puntaje según las condiciones del agua subterránea RMR-89 [8]

Filtración por cada 10 m de longitud del túnel (L/min)	Presión del agua en la discontinuidad dividido la tensión Principal Mayor	Descripción de las condiciones generales	Puntaje
Nada	0	Completamente seco	15
<10	0.0 - 0.1	Apenas húmedo	12
10-25	0.1 - 0.2	Húmedo	7
25-125	0.2 - 0.5	Goteo	4
>125	> 0.5	Flujo continuo	0

Para el RMR 89 el puntaje total obtenido fue de 54 y se clasifica como clase III Medio (regular).

Tabla 14. Clasificación geomecánica RMR 89 [8]

R.M.R. (Suma de los puntajes obtenidos de las tablas anteriores)	Descripción del macizo rocoso	Clase
81-100	Muy bueno	I
61-80	Bueno	II
41-60	Medio (Regular)	III
21-40	Malo	IV
0-20	Muy malo	V

8.1.4 Valor RMR (Bieniawski-Geocontrol, 2014).

Tabla 15. Criterios para calcular RMRb utilizados por geocontrol [8].

I.- CLASSIFICATION PARAMETERS																
RMR (1) UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF INTACT ROCK																
Oci (kg/cm2)	>2.500	1.000-2.500	500-1.000	250-500	500-250	10-50	<10									
RATING	15	12	7	4	2	1	0									
RMR (2+3) RQD AND SPACING OF JOINTS																
JOINTS PER METER	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RATING	40	34	31	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
JOINTS PER METER	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
RATING	17	16	15	14	14	13	13	12	12	11	11	10	10	9	9	
JOINTS PER METER	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
RATING	9	8	8	7	7	7	6	6	6	5	4	3	3	2	2	
JOINTS PER METER	46	47	48	49	50											
RATING	1.5	1	1	0.5	0											
RMR(4) JOINT'S CONDITION																
PERSISTENCE	<1 m	1-2 m	3-10 m	10 - 20 m	20m											
	6	4	2	1	0											
APERTURE	0	<0.1 mm	0.1-1 mm	1-5 mm	> 5 mm											
	6	5	4	1	0											
ROUGHNESS	Very rough	Rough	Slightly	Smooth	Stickenside											
	6	5	3	2	0											
INFILLING	NONE	HARD FILLING <5mm	HARD FILLING >5mm	SOFT FILLING	NONE											
	6	4	2	2	0											
WEATHERING	UNWEATHERED	SLIGHTLY	UNWEATHERED	SLIGHTLY	UNWEATHERED											
	6	5	3	1	0											
RMR(5) GROUNDWATER CONDITIONS																
STATE	DRY	DAMP	WET	DRIPPING	FLOWING											
RATING	15	10	7	4	0											

En este método a diferencia de los anteriores, los parámetros cambian de orden de estudio y su clasificación se basa en:

Criterio 1

La resistencia a la compresión simple de la roca intacta la cual de acuerdo a los datos anteriores es de 160 MPa entra en el rango entre (1000-2500) Kg/cm2 por lo cual se obtuvo un puntaje de 12.

Criterio 2 y 3

El segundo parámetro se basa en el número de discontinuidades por metro que para este caso es de 5, obteniendo un puntaje de 27.

Criterio 4

La persistencia la cual es <1 metro; puntaje de 6.

Las aberturas las cuales están entre 0,25 – 0,5 mm; puntaje de 4.

La rugosidad la cual se considera como áspera; puntaje de 5.

El tipo de relleno de las discontinuidades las cuales se describieron como un relleno duro <5 mm; puntaje de 4.

La alteración por agentes atmosféricos o meteorización la cual se consideró en una clasificación media; puntaje de 3.

Las condiciones del agua subterránea la cual según el día en que se realizó la visita de campo se encontraba en estado seco; puntaje de 15.

Criterio 5

La alterabilidad de la matriz rocosa está basada en la determinación de la durabilidad al desmoronamiento de las rocas blancas, el cual es el índice de durabilidad de los diferentes ciclos se obtiene a partir de las masas secas determinadas antes y después de cada ciclo. Como nuestro macizo cuenta con una caliza la cual es una roca bien cementada tomó un puntaje de 4.

Tabla 16. Criterios para la evaluación de la alterabilidad de la matriz rocosa [8].

Alterabilidad Id2(%)			
<85	60-85	30-60	<30
10	8	4	0

Con la sumatoria de cada uno de los cinco criterios se obtuvo un puntaje de 80. Posteriormente nos dirigimos a la tabla 13 donde se encuentra la clasificación geomecánica del macizo rocoso según RMR 89, debido a que el criterio de geocontrol es una actualización de los parámetros únicamente, según este criterio el macizo rocoso es de clase II.

8.1.5 Valor de Q (Barton, 1974) Para la obtención del Q de Barton se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

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

Donde Jn depende del número de discontinuidades presentes en la zona 1 y 3.

Tabla 17. Clasificación de Jn [8].

Joint set number J	Condition	Jn
A	Massive, none or few joints	0.5-1.0
B	One joint set	2
C	one joint set plus random	3
D	Two joint sets	4
E	Two joint sets plus random	6
F	Three joint sets	9
G	Three joint sets plus random	12
H	Four or more joint sets, random, heavily jointed, "sugar cubes", ets	15
J	Crushed rock, earthh like	20

Para el índice de rugosidad de las discontinuidades Jr, se tomó el tipo A debido a que se observaron diaclasas discontinuas.

Tabla 18. Clasificación de Jr [8]

Joint roughness number J	Condition a) Rock wall contact and b) Rock wall contact before 10 cm shear	Jn
A	Discontinuous joints	4
B	Rough or irregular, undulating	3
C	Smooth, undulating	2.0
D	Slickensided, undulating	1.5
E	Rough or irregular, planar	1.5
F	Smooth, planar	1.0
G	Slickensided, planar	0.5
	c) No rock wall contact when sheared	
H	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0
J	Sandy, gravelly, or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	1.0

Índice de alteración de las discontinuidades Ja; Las discontinuidades presentan recubrimiento de arcillas limosas y en algunos casos arenosas.

Tabla 19. Clasificación de Ja [8]

Joint alteration number J	a) Rock wall contact (no mineral fillings, only coatings)	Jn	Jn
A	Tightly healed hard, non-softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote		0.75
B	Unaltered joint walls, surface staining only	25-35	1.0
C	Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30	2.0
D	Silty or sandy clay coatings, small clay fraction (non-softening)	20-25	3.0
E	Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite, mica. Also chlorite, talc, gypsum, and graphite, etc., and small quantities of swelling clays	8-16	4.0

Factor de reducción por la presencia de agua J_w ; El talud presenta condiciones secas, no se observó humedad en las discontinuidades ni en la parte externa del talud.

Tabla 20. Clasificación de J_w [8]

Joint water reduction factor J_w		Approx. Water pres (Kg/cm ²)	J_w
A	Dry excavations or minor inflow, i.e., 5 lt./ min locally	<1	1.0
B	Medium inflow or pressure occasional out-wash of joint fillings	1-2.5	0.66
C	Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	2.5-10	0.5
D	Large inflow or high pressure, considerable out-wash of joint fillings	2.5-10	0.33
E	Exceptionally high inflow or water pressure at blasting. Decaying with time.	>10	0.2-0.1
F	Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay	>10	0.1-0.05

Condiciones tensionales de la roca, el macizo rocoso presenta zonas de fracturas aisladas en roca competente por lo cual tomamos el parámetro SRF de tipo F.

Tabla 21. Clasificación de SRF [8]

SRF	Condition	SRF		
	a) Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated.			
A	Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)	10.0		
B	Single-weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation <=50m)	5.0		
C	Single-weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation >50m)	2.5		
D	Multiple-shear zones in competent rock (clay-free). Loose surrounding rock (any depth)	7.5		
E	Single-shear zones in competent rock (clay-free) (depth of excavation <=50m)	5.0		
F	Single-shear zones in competent rock (clay-free) (depth of excavation >50m)	2.5		
G	Loose open joints, heavily jointed or "sugar cubes", etc. (any depth)	5.0		
	b) competent rock, rock stress problems	σ/σ_1	σ/σ_1	SRF
H	Low stress, near surface open joints	>200	<0.01	2.5
J	Medium stress, favourable stress condition	200-10	0.01-0.3	1.0
K	High stress, very right structure (usually favourable to stability, may be unfavourable to wall stability)	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L	Moderate slabbing after > 1hr in massive rock	5-3	0.5-0.65	5-50
M	Slabbing and rock burse after a few minutes in massive rock	3-2	0.65-1.0	50-200
N	Heavy rock burse (strain-burse) and immediate deformations in massive rock	<2	>1	200-400
	c) Squeezing rock; plastic flow of incompetent rock under the influence of high rock pressure			
			σ/σ_1	SRF
O	Mild squeezing rock pressure		1-5	5-10
P	Heavy squeezing rock pressure		>5	10-20
	d) Swelling rock; chemical swelling activity depending on presence of water			
			SRF	
Q	Mild swelling rock pressure		5-10	

RQD 90.5 % hallado por (Palmstrom 2005).

Por lo tanto obtenemos

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

$$Q = \frac{90.5}{9} * \frac{4}{3} * \frac{1}{2.5}$$

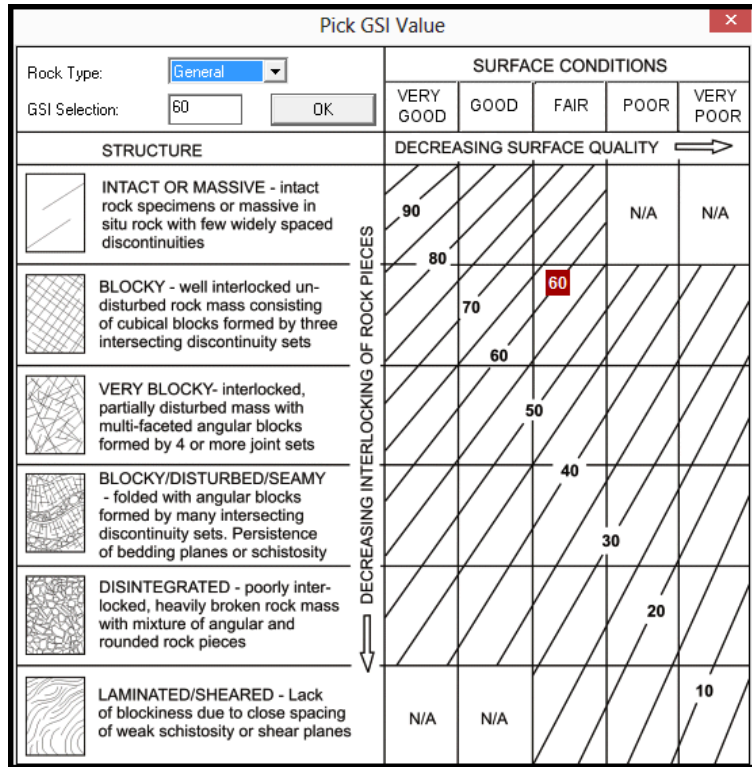
$Q = 5.36$ Clasificado como **Macizo Medio** (según tabla 22)

Tabla 22. Clasificación de Q de Barton 1974 [8].

TIPO DE MACIZO	VALOR DE Q
Excepcionalmente malo	$10^{-3} - 10^{-2}$
Extremadamente malo	$10^{-2} - 10^{-1}$
Muy malo	$10^{-1} - 1$
Malo	1 - 4
Medio	4 - 10
Bueno	10 - 40
Muy Bueno	40 - 100
Extremadamente bueno	100 - 400
Excepcionalmente bueno	400 - 1000

8.1.6 Valor de GSI (Hoek et al, 2000). Las condiciones de superficie del macizo rocoso se consideran intermedias debido a que el grado de meteorización no es muy alto y en las zonas de debilidad no hay presencia de humedad, a su vez con lo corroborado en campo, se observó que el macizo presenta principalmente tres (3) intersecciones de discontinuidades, formando bloques en cubos y con condiciones de superficie regulares, con lo cual se obtuvo un valor de GSI de 60, como se observa en la figura 23.

Figura 23. Estimación del valor de GSI.



Fuente: RocLab

8.1.7 Valor de RMI (Palmstrom, 1996). Para la obtención del parámetro RMI se tuvo en cuenta el proceso que se muestra en la figura 24 para la caracterización de las discontinuidades, donde;

$$RMI = JP * \sigma_c$$

$$JP = 0.2\sqrt{JC} * V_B^D$$

$$D = 0.37JC^{-0.2}$$

Para un volumen de bloque de 0.5 m³

$$\sigma_c = 160 \text{ MPa (Martillo Smith)}$$

Ahora:

$$Jc = Jl * \frac{JR}{JA}$$

$$JR = \text{altamente ondulado + rugoso} = 4.5$$

$$JA = \text{Material friccional + relleno de calcita} < 5\text{mm} = 4$$

$$JL = \text{Longitu } 0.1 - 1 \text{ m} + \text{corto} + \text{juntas discontinuas} = 4.5$$

$$Jc = 4 * \frac{4.5}{4}$$

$$Jc = 4.5$$

Estos valores se obtuvieron a partir de la tabla 23.

Figura 24. Parámetros aplicados para la obtención del RMI (PALMSTROM,1996) [8].

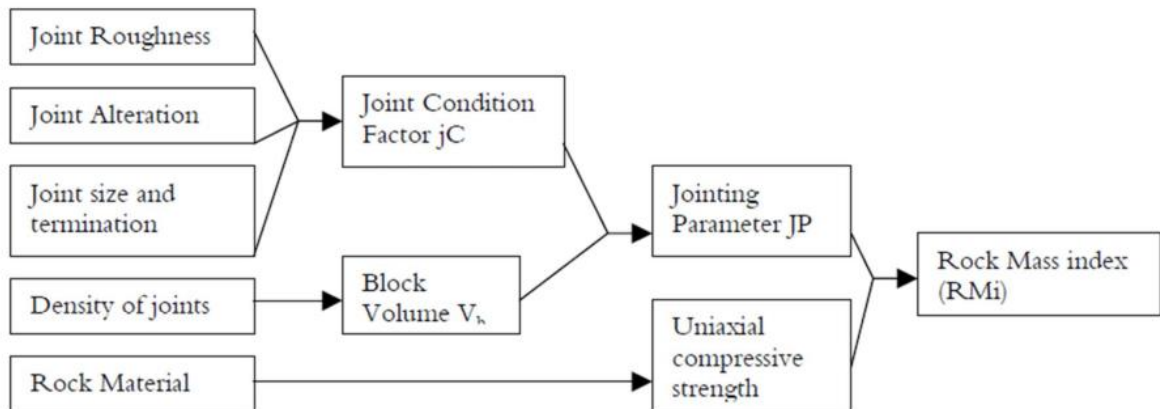


Tabla 23. Clasificación RMI (PALMSTROM, 1996) [8].

FACTOR DE RUGOSIDAD DE LAS JUNTAS (jR) (las valoraciones de jR están basadas en Jr del sistema Q)						
(Las valoraciones resaltadas en itálico son similares a Jr)		Ondulación del plano diaclasado a gran escala				
		Planar	Ligeramente ondulado	Ondulado	Altamente ondulado	Escalonado o entrelazado
Suavidad del plano de junta a pequeña escala	Muy rugoso	2	3	4	6	6
	Rugoso	1,5	2	3	4,5	6
	Suave	1	1,5	2	3	4
	Pulido o espejo de falla*	0,5	1	1,5	2	3
Para diaclasas (Juntas) rellenas jR=1 Para diaclasas irregulares se sugiere una valoración jR=5						
*Aplicar estas valoraciones a espejos de falla con posibles movimientos a través de estrías.						

FACTOR DE ALTERACIÓN DE JUNTAS (jA)				
Paredes de la junta con contacto parcial o sin contacto	RELLENOS DE:	TIPO	Relleno fino (<5mm)	Relleno grueso
	Material friccional	arena, limo, calcita, etc. (Sin reblandecimiento)	4	8
	Materiales duros y cohesivos	relleno compactado de arcilla, clorita, talco, etc	6	6-10
	Materiales blandos y cohesivos	arcillas de media a bajas sobre consolidación, dorita, talco, etc	8	12
	Materiales expansivos y arcillosos	materiales de relleno que exhiben propiedades expansivas	8 - 12	13-20

FACTOR DE TAMAÑO Y CONTINUIDAD DE LAS DIACLASAS (JUNTAS) (jL)				
TIPO	Longitud	Tamaño	Juntas continuas	Juntas discontinuas*
División de la estratificación o foliación	< 0.5 m	muy corto	3	6
Diaclasas o juntas	0.1 - 1 m	corto o pequeño	2	4
	1 - 10 m	mediano	1	2
	10- 30 m	grande o largo	0,75	1,5
Junta (sellada), dique o cizalla**	> 30 m	muy grande o largo	0,5	1

*Las juntas discontinuas acaban en roca masiva **frecuentemente son una singularidad y deben eneste caso ser tratadas por separado.

Por lo tanto;

$$D = 0.37(4.5)^{-0.2} = 0.27$$

$$JP = 0.2\sqrt{4.5} * 0.5^{0.27} = 0.35$$

$$RMI = 160 * 0.35 = 56$$

Por lo tanto el **RMI** es

> 10 y se Clasifica como un macizo de resistencia **MUY ALTA**

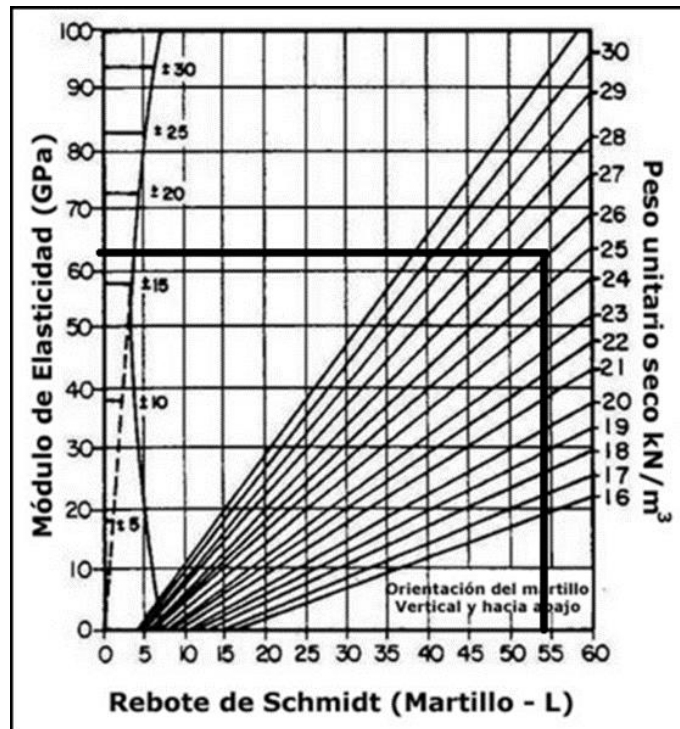
Tabla 24. Clasificación del macizo rocoso según el R_{Mi} (PALMSTROM, 1996) [8].

Muy bajo	R _{Mi} < 0.01
Bajo	R _{Mi} = 0.01 - 0.1
Moderado	R _{Mi} = 0.1 - 1
Alto	R _{Mi} = 1 - 10
Muy alto	R _{Mi} > 10

8.1.8 Valor de J_f (Ramamurthy, 2004). Para la clasificación según (Ramamurthy, 2004) procedimos a calcular el Modulo E de deformación de la roca intacta según la figura 25 obteniendo un valor de 64000 Mp.

Para la utilización de esta tabla entramos con 54 rebotes del martillo Schmidt y un peso unitario de 26 KN/m³.

Figura 25. Abaco Correlación entre el número de rebotes del martillo Schmidt, el peso unitario y el módulo de deformación Zona 1 y Zona 3 [8].



Resistencia a la compresión inconfiada= 160 Mp; Por lo tanto $M_r = E/R_{ci} = 64000/160 = 400$.

El macizo rocoso se encuentra moderadamente meteorizado, para nuestro caso la clasificación del macizo rocoso en las zonas 1 y 3 es BBW2 ARENISCAS CALCAREAS según las tablas 25 y 26.

Tabla 25. Clasificación No 1 Geingenieril para Rocas y Masas Rocosas-Zona 1 y 3 [8].

CLASIFICACION GEOINGENIERIL PARA ROCAS Y MASAS ROCOSAS				
SIMBOLO	GRADO DE METEORIZACION	TERMINO	R %	DESCRIPCION
W0	0	Fresca	100 - 80	Sin signos de meteorización
W1	25	Ligeramente	30 - 50	
W2	25 - 50	Moderadamente	50 - 25	
W3	50 - 75	Muy	25 - 10	
W4	> 75	Completamente	10 - 1	
W5	100	Suelo residual	< 1	Todo el material descompuesto, sin trazas de la estructura de la roca

$$\% R = \left(\frac{\sigma(\text{meteorizada})}{\sigma(\text{fresca})} \right) \times 100$$

Tabla 26. Clasificación No 2 Geingenieril para Rocas y Masas Rocosas-Zona 1 y 3 [8].

(Ramamurthy, 2004)		
CLASE	DESCRIPCIÓN	σ_{cij} (Mpa)
A	Resistencia muy alta	> 250
B	Resistencia alta	100 - 250
C	Resistencia moderada	50 - 100
D	Resistencia media	25 - 50
E	Resistencia baja	5 - 25
F	Resistencia muy baja	< 5

CLASE	DESCRIPCIÓN DE LA RELACION MODULAR	Relación Modular $M_{rij} = E_{ij} / \sigma_{cij}$
A	Muy alta	> 500
B	Alta	200 - 500
C	Media	100 - 200
D	Baja	50 - 100
E	Muy baja	< 50

Posteriormente hallamos el J_f para conocer cual discontinuidad será más crítica donde podría presentarse el deslizamiento.

$$Jf = Jn/n*r$$

Jn= números de discontinuidades por metro

n= parámetro de inclinación

r= parámetro de resistencia de la discontinuidad

Tabla 27. Valores de n [8]

β (°) (inclinación)	Valores de n	
	Tipo de anisotropía	
	En forma de U*	En forma de hombro**
0	0.82	0.85
10	0.46	0.60
20	0.11	0.20
30	0.05	0.06
40	0.09	0.12
50	0.30	0.45
60	0.46	0.80
70	0.64	0.90
80	0.82	0.95
90	0.95	0.98

* Rocas débiles con un set de discontinuidades paralelas

** Rocas competentes con discontinuidades bien definidas.

Estratificación: Frecuencia= 1.58; Angulo de fricción= 20°; Inclinación=50; Rocas competentes con discontinuidades bien definidas.

$$Jf = \frac{Jn}{n * r} = \frac{Jn}{n * \tan(\varphi)} = \frac{1.58}{0.45 * \tan(20)} = 9.65$$

Diaclasa 1: Frecuencia= 0.30; Angulo de fricción= 24; Inclinación= 80; Rocas competentes con discontinuidades bien definidas.

$$Jf = \frac{Jn}{n * r} = \frac{Jn}{n * \tan(\varphi)} = \frac{0.3}{0.95 * \tan(24)} = 0.7$$

Diaclasa 2: Frecuencia= 0.52; Angulo de fricción= 26; Inclinación= 31; Rocas competentes con discontinuidades bien definidas.

$$Jf = \frac{Jn}{n * r} = \frac{Jn}{n * \tan(\varphi)} = \frac{0.52}{0.06 * \tan(26)} = 17.8$$

En conclusión, la diaclasa 2 tiene el valor de Jf más alto, presentando mayor probabilidad de falla que las otras dos discontinuidades.

8.1.9 Valor de RMS (Stille et al 1982). El RMS es un valor de ajuste que se le aplica al RMRbasico hallado anteriormente, teniendo en cuenta el número de discontinuidades y la continuidad de las mismas como se muestra en la tabla 28.

Tabla 28. Valores de ajuste del RMS [8].

Type of joint set	One prominent joint	1 or 2 joint sets		More than 2 joint sets
Type of joint		Strength in joint direction	Remaining conditions	
Continuous	-15	-15	0	-15
Not continuous	-5	-5	0	-10

Teniendo un valor de RMRbasico de 49 Ahora obtenemos un RMS=39, con este valor entramos a la tabla 29, de la cual se obtuvieron correlaciones con el RMS con los parámetros geotécnicos del macizo rocoso.

$$\varphi = 25^\circ; C = 0.8 \text{ Mpa}$$

Tabla 29. Correlación del RMS con los parámetros geotécnicos del macizo rocoso [8].

RMS-value		100-81	80-61	60-41	41-20	<20
σ_3 MPa		30	12	5	2.5	0.5
Parameters in the Mohr-Coulomb	Φ	55°	45°	35°	25°	15°
	C MPa	4.7	2.5	1.3	0.8	0.2

8.1.10 Valor de N y RCR (Goel et al 1996). Este método de clasificación geotécnica solo se utiliza con fines de correlación. Asumimos que el valor de RMR es el calculado y luego estimamos Q con la expresión de Goel et al. 1976, para luego compararla con el Q realmente obtenido en la clasificación de Barton. Cuando se usa el Sistema N, se debe utilizar la versión del Sistema Q de Barton (1974).

$$N = RQD * \frac{Jr * Jw}{Jn * Ja}$$

$$N = \frac{90.14 * 4 * 1}{9 * 3}$$

$$N = 13.35$$

$$RCR = 8 * Ln N + 30$$

$$RCR = 8 * Ln (13.35) + 30$$

$$RCR = 50.73$$

$$Q = \frac{N}{SRF} = \frac{13.35}{2.5} = 5.74$$

*La determinación el Valor de Q apartir de RMR por GOEL (1196), es similar al Q de Barton(1974), se mantiene en la misma clasificacion de **MEDIA***

8.1.11 Valor SRI (Rocas Sedimentarias) (Salcedo, 1999). Para el cálculo del SRI para rocas sedimentarias se debe tener en cuenta la siguiente expresión:

$$SRI = 100 - f1 - f2 - f\sigma - [\sum(fs + fp + fc)]$$

Por consiguiente, utilizamos las tablas 30, 31, 32,33, donde tomamos los valores de los parámetros f, a partir de los datos obtenidos anteriormente.

Tabla 30. Clasificación σ_c Macizo Rocoso D. Salcedo [8]

PROPORCIÓN DE ROCAS NO FOLIADAS Y ROCAS FOLIADAS	No foliada (100%-0)	Poco foliada (75%-25%)	Moderadamente foliada (50%-50%)	Foliada (25%-75%)	Muy Foliada (0-100%)	Cizallada/ Perturbada
f1	0	4	8	12	16	MRI < 20°
PENETRATIVIDAD DE FOLIACIÓN	No penetrativa	Poco penetrativa	Moderadamente penetrativa	Penetrativa	Muy penetrativa	
f2	0	3	8	16	20	
COMPRESION SIN CONFINAR DE ROCA INTACTA	>200 Mpa	100-200 Mpa	50-100 Mpa	20-50 Mpa	10-20 Mpa	1-10 Mpa
f σ	0	1	3	4	6	8

Tabla 31. Clasificación fs, fp Macizo Rocoso D. Salcedo [8]

INFLUENCIA DE LAS DIACLASAS					
ESPACIAMIENTO O FRECUENCIA DE DIACLASA No.1	S > 100 cm FD: < 1:1	S = 20 - 100 cm FD: 1:1 a 5:1	S = 10 - 20 cm FD: 5:1 a 10:1	S = 5 - 10 cm FD: 10:1 a 20:1	S < 5 cm FD: > 20:1
fs	0.5	1.5	2	3	3.5
PERSISTENCIA DE LA DIACLASA No.1	Muy baja persistencia (< 1 m)	Baja persistencia (1 a 3 m)	Persistencia media (3 - 10 m)	Alta persistencia (10 - 20 m)	Muy alta persistencia (> 20 m)
fp	0.5	1.5	3	4	5

Tabla 32. Clasificación fc Macizo Rocoso D. Salcedo [8]

INFLUENCIA DE LAS DIACLASAS					
CONTACTO Y RELLENO ENTRE LA LONGITUD PERSISTENTE DE LAS PAREDES DE DIACLASA No.1 (fc)	ABIERTA (Más del 80% de las paredes de la diaclasa no tiene contacto)		INTERMEDIA Promediar en forma ponderada los valores correspondientes a las características de las longitudes de las paredes sin contacto y en contacto, indicados en las columnas adyacentes.	CERRADA (Más del 80% de la diaclasa tiene las paredes en contacto)	
	CON RELLENO DURO Y PAREDES RUGOSAS	0.5		MUY RUGOSA	0.5
	CON RELLENO BLANDO Y PAREDES RUGOSAS	1.5		RUGOSA	1.0
	CON RELLENO DURO Y PAREDES LISAS	2.0		RUGOSIDAD MEDIA	1.5
	CON RELLENO BLANCO Y PAREDES LISAS	2.5		LISA	2.5
	SIN RELLENO	3.5		MUY LISA A PULIDA CON ESTRÍAS Y ESPEJOS DE CIZALLAMIENTO	3.0

Tabla 33. Clasificación f1, f2 Macizo Rocoso D. Salcedo [8]

CLASIFICACION DE MASAS ROCOSAS SEDIMENTARIAS DETERMINACION DEL INDICE DE MASAS ROCOSAS SEDIMENTARIAS (SRI)						
PROPORCION DE ROCAS COMPETENTES A NO COMPETENTES	Rocas competentes (100 % - 0)	Predominio de rocas competentes (75%-25%)	Igual proporción de rocas competentes e incompetentes (50%-50%)	Predominio de rocas incompetentes (25%-75%)	Rocas incompetentes (0-100%)	Cizallada / Perturbada
f1	0	4	8	12	16	SRI < 20°
PENETRATIVIDAD DE ESTRATIFICACION	No penetrativa	Poco penetrativa	Moderadamente penetrativa	penetrativa	Muy penetrativa	
f2	0	3	8	16	20	

Ahora

$$SRI = 100 - 4 - 16 - 1 - [\sum(1.5 + 0.5 + 0.5)] = 76.5$$

Tabla 34. Clasificación D. Salcedo [8]

DETERMINACION DE CLASES DE ROCA CON BASE EN LOS VALORES DEL INDICE MRI O SRI (Salcedo, 1999) TABLA PRELIMINAR PARA ESTIMAR PROPIEDADES (EN PROCESO DE REVISION). VERSION A SER EVALUADA EN LA PRACTICA									
PARAMETRO	DEFINICION DE CLASES CON BASE EN INDICES MRI O SRI								
	IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	IVA	IVB	V
MRI O SRI	91-100	81-90	71-80	61-70	51-60	41-50	31-40	21-30	<20
Φm (°)	> 45	40-45	35-40	30-35	25-30	20-25	15-20	10-15	5-10
Cm (KPa)	>1000	700-1000	400-700	100-400	70-100	50-70	25-50	5-25	<5
Em (Mpa). Bieniawski, 1978, serafim-Pereira, 1983	82000 - 100000	62000- 80000	42000- 60000	22000- 40000	10600- 20000	5960- 10000	3350- 5625	1880- 3160	Por definir
Em (Mpa) Khabbazi et al 2012	34030 - 49010	21690-32600	13030-20670	7240-12330	3620-6790	1560-3360	530-1.420	120-470	Por definir
σm (Mpa)	LA ESTIMACION DE σm REQUIERE, DE ACUERDO A LA MAYORIA DE LAS EXPRESIONES PROPUESTAS, CONOCER EL VALOR DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIN CONFINAR DE LA ROCA INTACTA σci								

Tabla 35. Resumen parámetros clasificación según D. Salcedo [8]

Clasificación D. Salcedo		
SRI-ROCAS SEDIMENTARIAS		
f1	4	
f2	16	
fσ	1	
fs	1.5	
fp	0.5	
fc	0.5	
CLASIFICACION DE CLASES CON BASE EN INDICE SRI		
SRI	76.5	IIA

Según la clasificación de Salcedo el macizo rocoso es **TIPO IIA** con características que se muestran en la tabla 34.

8.1.12 Estimación de la resistencia a la compresión uniaxial de la masa rocosa.

- a. Hoek-Brown-RMR76. (1988) $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \sqrt{e^{(RMR_{basic}-100)/9}}$
- b. Yudhbir-RMR76 (1983) $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} * e^{7.65 (RMR_{basic}-100)/100}$
- c. Q (Barton) (2002) $\sigma_{cm} = 5 \gamma (Q * \sigma_{ci}/100)^{1/3}$
- d. R_{Mi} (Palmstrom) (1995) $R_{Mi} = \sigma_c * J_P$
- e. Hoek-Brown-GSI (2002) $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} * EXP (GSI-100/9-3D) (1/2+1/6) (EXP -GSI/15 - EXP -20/3))$
- f. Ramamurthy 2004 $\sigma_j = \sigma_{ci} * e^{-0.008[5(100-RMR)]}$
- g. RMS (Stille et al) Ver Tabla 29.

Tabla 36. Tabla resumen de las relaciones empíricas para la estimación de la resistencia a compresión uniaxial σ_{cm} de las masas rocosas-Zona 1 y 3.

Datos	Valor	Autores	σ_{cm} (MPA)
σ_{ci}	160	Hoek-Brown-RMR76 (1988)	9.41063546
RMRbasico	49	Yudhbir -RMR76(1983)	3.23385141
γ	2.6	Q (Barton)(2002)	30.3717246
Q	7.97	RMI(Palmstrom)(1995)	56
GSI	60	Hoek-Brown-GSI (2002)	44.5787878
JP	0.35	Ramamurthy 2004	25.4107882
RMR	54	RMS (Stille et al 1982)	2.5

Fuente: Propia.

8.1.13 Estimación del módulo de elasticidad de la masa rocosa. De acuerdo a las expresiones propuestas en la literatura especializada, se realizó una tabla resumen para la determinación por diferentes autores del módulo de elasticidad de la masa rocosa teniendo en cuenta los datos mencionados anteriormente.

Tabla 37. Resumen de resultados del módulo de elasticidad de la masa rocosa – Zona 1 y 3.

AUTORES	UNIDADES	RELACIÓN	OBSERVACIONES
Bieniawski (1978):	$E_m(\text{Gpa})=$	No valido para RMR menores a 50	
Serafim & Pereira (1983)	$E_m(\text{Gpa})=$	9,44	
Nicholson & Bieniswki (1990)	$E_m/E=$	0,08	
Mitri et al (1994)	$E_m(\text{Gpa})=$	30,99	
Read et al (1994)	$E_m=$	11,76	
Barton (1983)	$E=$	22,54	
Barton (2002)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	23,36	
Hoek et al (2002)	$E_m(\text{Gpa})=$	11,56	
Gokceoglu et al (2003)	$E_m=$	2,98	
Sonmez et al (2004)	$E_m=$	201,92	
Hoek & Diederichs (2006)	$E_{mass}(\text{Mpa})=$	3218,94	
Hoek & Diederichs (2006)	$E_m=$	12,84	
Sonmez et al (2006)	$E_m=$	25,58	
Chun et al (2006)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	3,48	
Ramamurthy (2001)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	3,41	
Ramamurthy (2001)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	117,78	
Ramamurthy (2004)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	26,22	
Ramamurthy (2004)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	33,80	
Palmstrom & Singh (2001)	$E_m=$	11,55	
Galera et al (2005)	$E_m(\text{Gpa})=$	4,29	
Stacey & Page (1986)	$E_m=$	8,24	
		13,30	
Gardner (1987)	$E_m=$	9,25	
Zhang & Einstein (2004, 2016)	$E_m/E=$	0,12	Límite inferior
		1,07	Límite superior
		0,59	Media
Khabbazi et al (2012)	$E_m=$	3,10	
Mohammadi & Rahmannedjad (2010)	$E_m(\text{Gpa})=$	7,83	
Gholamnejad et al (2013)	$E_m=$	3,46	
Ramamurthy & Arora (1994) Ramamurthy (2001 y 2004)	$E_q=$	66,25	

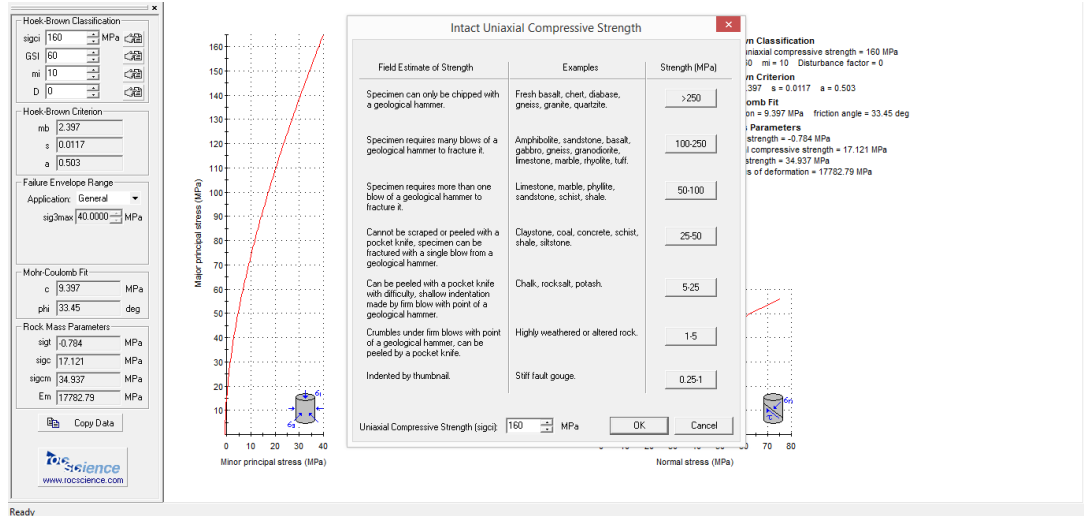
Fuente: Propia.

8.1.14 Estimación del ángulo de fricción y la cohesión de la masa rocosa (ϕ_m y cm).

a. Utilizando el Software RocLab basado en GSI.

De acuerdo al trabajo en campo realizado con el martillo Smith tomamos el valor de σ_{ci} de 160 MPa.

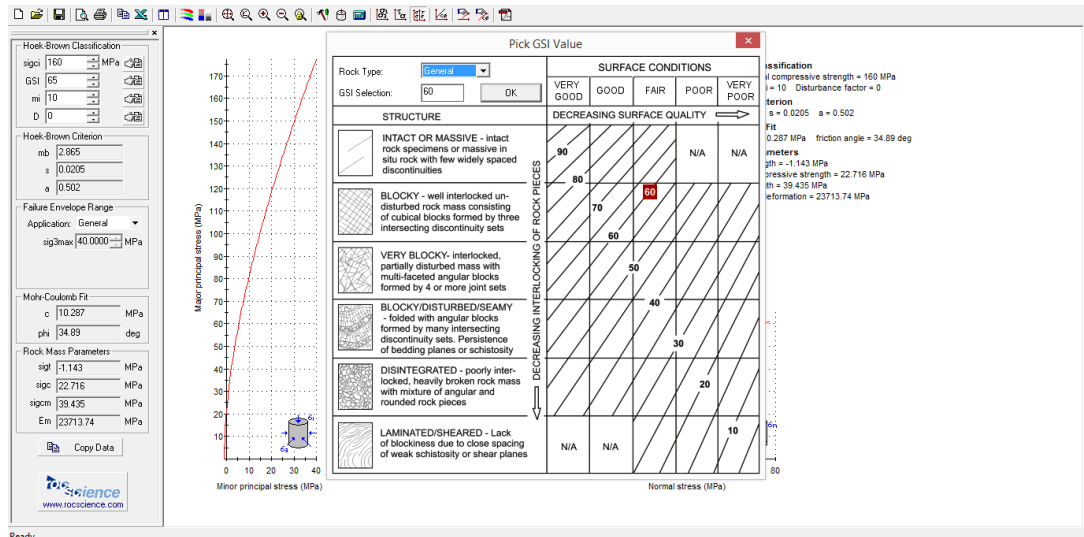
Figura 26. Estimación de σ_{ci} .



Fuente: RocLab.

Posteriormente definimos el GSI=60.

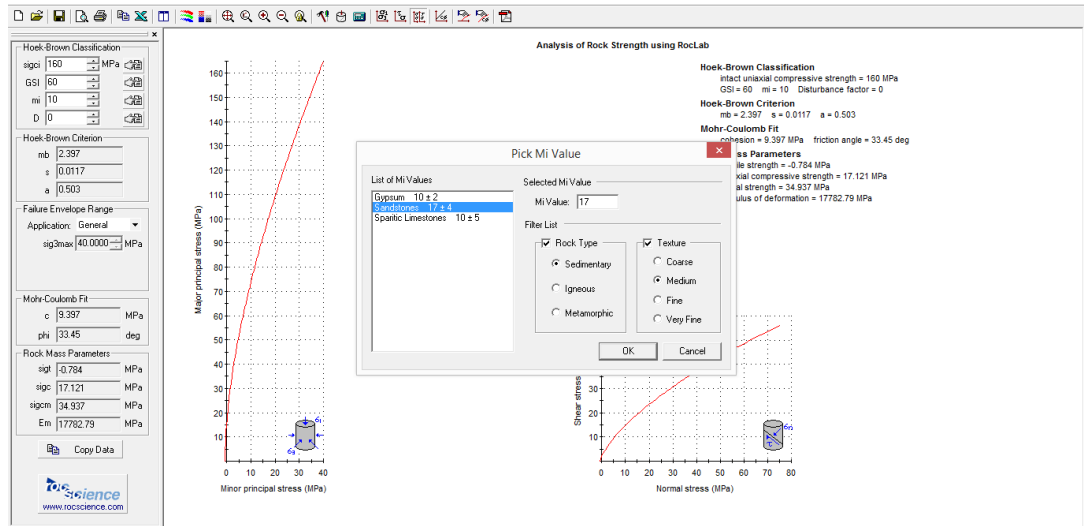
Figura 27. Estimación de GSI.



Fuente: RocLab.

De acuerdo a las condiciones del talud rocoso tomamos el “mi” con un valor de 17 por el tipo de roca.

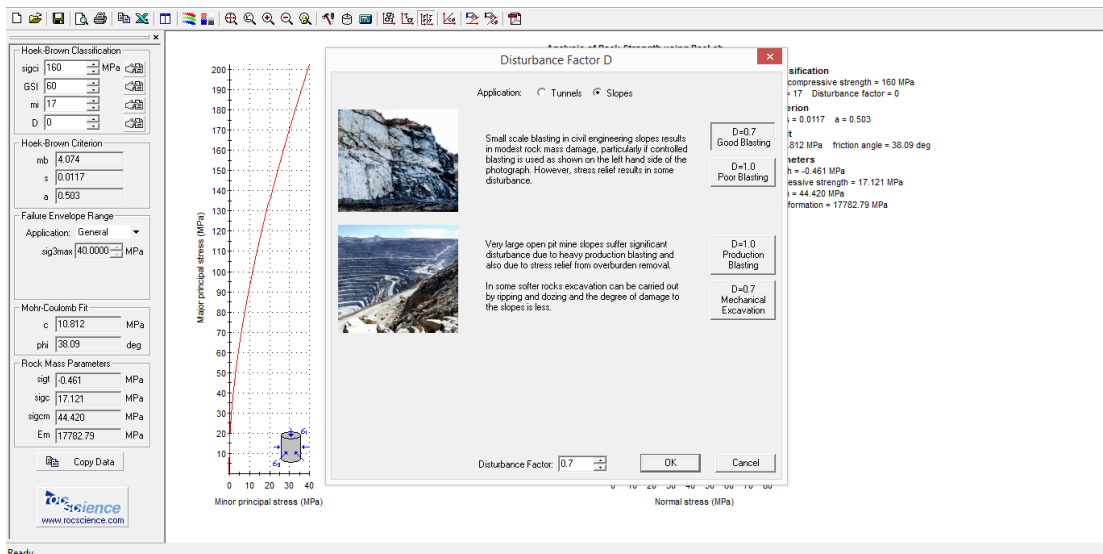
Figura 28. Estimación de parámetro “mi”.



Fuente: RocLab.

De acuerdo a las condiciones del macizo se definió el parámetro $D=0.7$ para taludes.

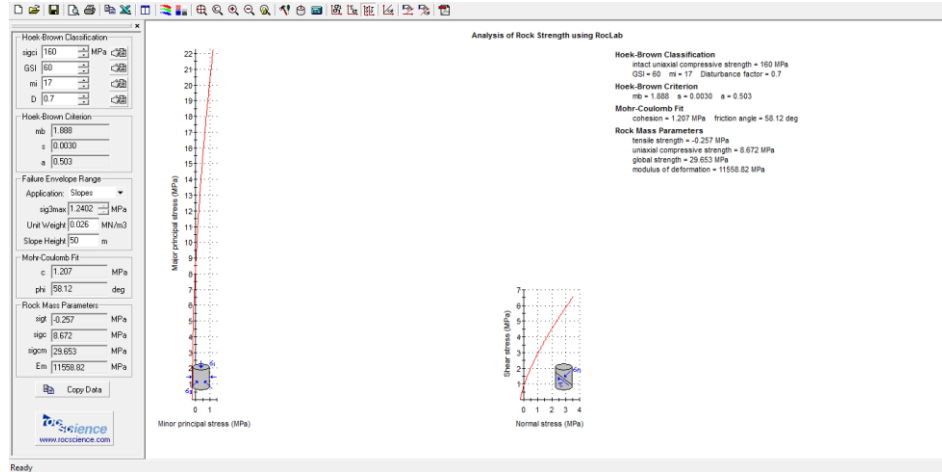
Figura 29. Estimación de parámetro D.



Fuente: RocLab.

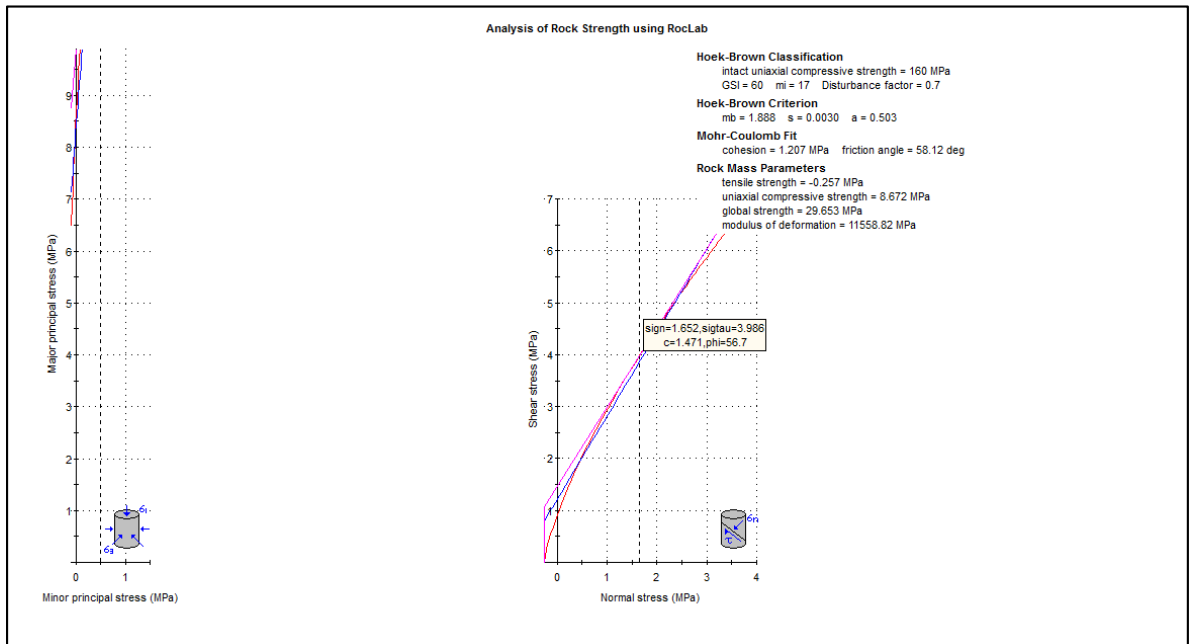
Por último, se ajustó el análisis incluyendo el peso unitario, la altura y el tipo de análisis en Taludes.

Figura 30. Análisis de la información.



Fuente: RocLab.

Figura 31. Detalle Angulo de Fricción y Cohesión de la masa rocosa.



Fuente: RocLab.

De acuerdo al Software de RocLab donde se incluyeron los parámetros obtenidos de los ensayos de campo y sus características generales, obtuvimos los valores de Cohesión de 1.207 Mpa y un Angulo de Fricción 58.12°.

b. Según la tabla de Clasificación de BIENIAWSKI.

Tabla 38. Clasificación de BIENIAWSKI.

Pámetros de clasificación	Clasificación	Puntuación
1 Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)		
Ensayo de carga puntual	No aplica	0
Compresión simple	250-100	12
2 Índice RQD de la roca		
RQD (%)	90-100	20
3 Separación entre diaclasas		
Separación entre diaclasas (m)	0,2-0,6	10
4 Estado de las discontinuidades		
Longitud de la discontinuidad (m)	< 1	6
Abertura (mm)	0,1- 1,0	3
Rugosidad	Rugosa	5
Relleno	Relleno duro, < 5 mm	4
Alteraciones	Moderada. Alteradamente	3
5 Agua freática		
Caudal por 10 m de tunel	No aplica	0
Presión agua/Tensión principal mayor	No aplica	0
Estado general	Seco	15
Corrección por discontinuidades		
Túneles	No aplica	0
Cimentaciones	No aplica	0
Taludes	Medias	-25
Puntuación		53

CLASIFICACIÓN RMR				
Calidad	Clase	Tiempo/Longitud de sostenimiento	Cohesión [Kg/cm ²]	Angulo de rozamiento [°]
Media	III	1 semana con 5 m de vano	2-3	25-35

Fuente: Hoja de cálculo internet.

c. Según propuesta de AYDAN ET AL (1997) (φ_m)

$$\varphi_m = 5 + \frac{RMR}{2} (^\circ) = 5 + \left(\frac{54}{2}\right) = 32^\circ$$

$$C_m = 5 * RMR (KPa) = 5 * 54 = 270 KPa$$

$$\varphi_m = 20 * (\sigma_{cm}^{0.25})$$

$$32 = 20 * (\sigma_{cm}^{0.25})$$

$$\sigma_{cm} = \sqrt[0.25]{\frac{32}{20}}$$

$$\sigma_{cm} = 6.55 \text{ MPa}$$

d. Según AYDAN & KAMAMOTO (2001).

$$C_m = \left(\frac{\sigma_{cm}}{2}\right) * \left(\frac{1 - \text{sen}(\varphi_m)}{\text{cos}(\varphi_m)}\right)$$

$$C_m = \left(\frac{6.55}{2}\right) * \left(\frac{1 - \text{sen} 32}{\text{cos} 32}\right)$$

$$C_m = 1.82 \text{ MPa}$$

8.1.15 Construcción de la curva τ vs. σ para la discontinuidad a lo largo de la cual puede ocurrir una falla Planar (estratificación). Utilizamos el ángulo de fricción básico, el valor de JRC estimado de los perfiles de Barton, y la resistencia

a la compresión sin confinar de la roca intacta. Para ello utilizamos la teoría de las discontinuidades abiertas de Barton la cual se explicada a continuación.

Teoría de las discontinuidades abiertas:

$$\tau = \sigma'_n \tan[(JRC) \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \varphi_b]$$

Dónde:

JRC = Coeficiente de rugosidad

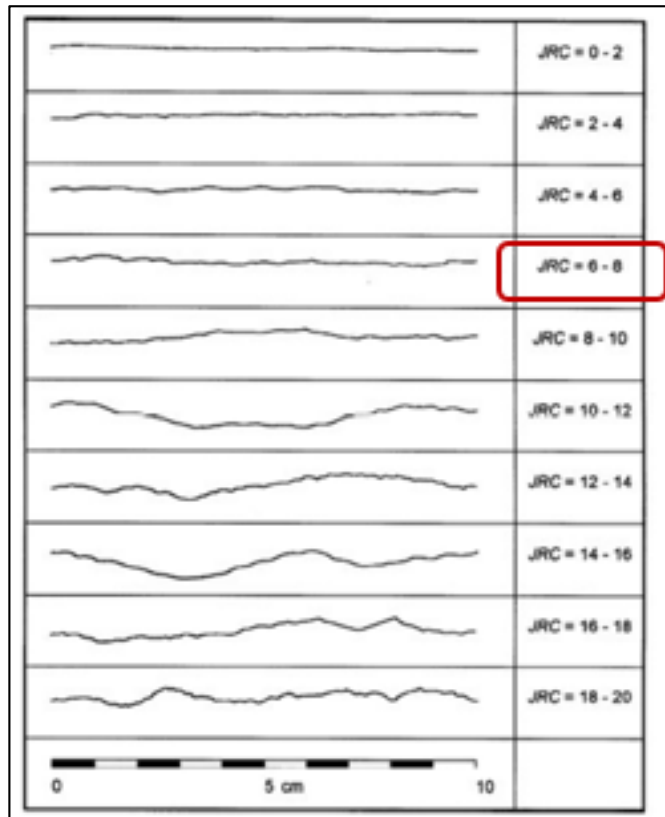
JCS = Resistencia a compresión sin confinar σ_c

φ_b = Angulo de fricción básico

σ'_n = Esfuerzo normal efectivo

Para el trabajo de campo estimamos un JRC equivalente a 6, como se muestra en la figura 32.

Figura 32. Teoría de Discontinuidades Abiertas JRC, según Barton & Choubey, 1971 [8].



De la tabla 39 se tomó el ángulo de fricción básico de 32 típico para este tipo de rocas.

Tabla 39. Ángulos de Fricción Básicos Típica para diferentes Rocas [8].

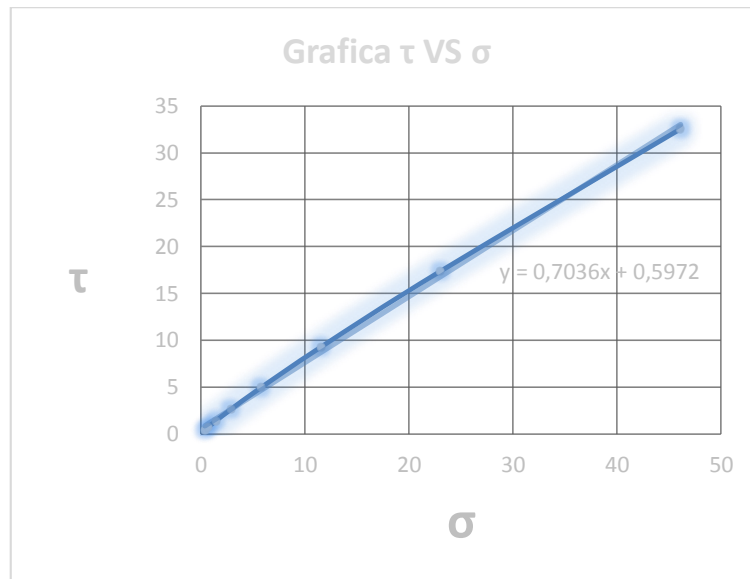
Basic friction angles Φ_b for different rocks (after Barton & Choubey, 1977).		
Rock	Φ_b dry (degrees)	Φ_b wet (degrees)
Sandstone	26-35	25-34
Siltstone	31-33	27-31
Limestone	31-37	27-35
Basalt	35-38	31-36
Fine-grained granite	31-35	29-31
Coarse- grained granite	31-35	31-33
Gneiss	26-29	23-26
Slate	25-30	21
Dolerite	36	32
Porphyry	31	31
Shale		27
Chalk		30
Amphibolite	32	

Tabla 40. Datos para Grafica τ VS σ

Grafica τ vs σ		DATOS	
σ_n	τ	Θ_{basico}	32
0.36	0.398236884	JRC	6
0.72	0.747687103	σ_c	160
1.44	1.403988687		
2.88	2.63610992		
5.76	4.947771238		
11.52	9.280872195		
23.04	17.39331899		
46.08	32.55846117		

Fuente: Propia.

Figura 33. Grafica τ VS σ en MPa.



Fuente: Propia.

8.2 MACIZO ROCOSO ZONA 2

8.2.1 Conteo volumétrico de discontinuidades J_v .

$$J_v = 1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3 \dots + 1/S_N$$

Donde N = Número de discontinuidades aleatorias.

S= Longitud en metros/ # de discontinuidades.

Tabla 41. Valores obtenidos en campo del J_v calculado.

Inclinación	Distancia	# de Discontinuidades	1/s1
Horizontal	10	41	4,1
Diagonal 55NE	10	28	2,8
Diagonal 65NW	10	28	2,8
Horizontal	10	34	3,4
		Jv	13,1

Fuente: Propia.

8.2.2 Valor de RQD.

$$RQD = 110 - 2.5 J_v \text{ (Palmstrom 2005)}$$

$$RQD = 110 - 2,5 \cdot 13,1 = 77,25\%$$

$$RQD = 100 \cdot e^{(-0,1\lambda)} \cdot (0,1\lambda + 1). \text{ (Priest \& Hudson, 1976)}$$

$$RQD = 100 \cdot e^{(-0,1 \cdot 9,3)} [0,1 \cdot 9,3 + 1] = 76,14\%$$

Donde λ es la frecuencia total de discontinuidades dividido en una longitud dada, para esta zona se realizaron 3 mediciones de un metro cada una dando como resultado 9.3 discontinuidades por metro en promedio.

8.2.3 Valor de RMRbásico (Bieniawski, 1976).

Parámetros iniciales:

De acuerdo a los valores obtenidos en el punto anterior de RQD: 76,14% se clasificó el factor A entre 75-90 con un puntaje de 17.

Tabla 42. Puntaje según valor de RQD [8]

RQD	Puntaje
90-100	20
75-90	17
50-75	13
25-50	8
<25	3

Valor de la resistencia a la compresión simple mediante el número de rebotes del martillo Smith.

ZONA 2

Tabla 43. Datos de Resistencia Martillo Schmidt

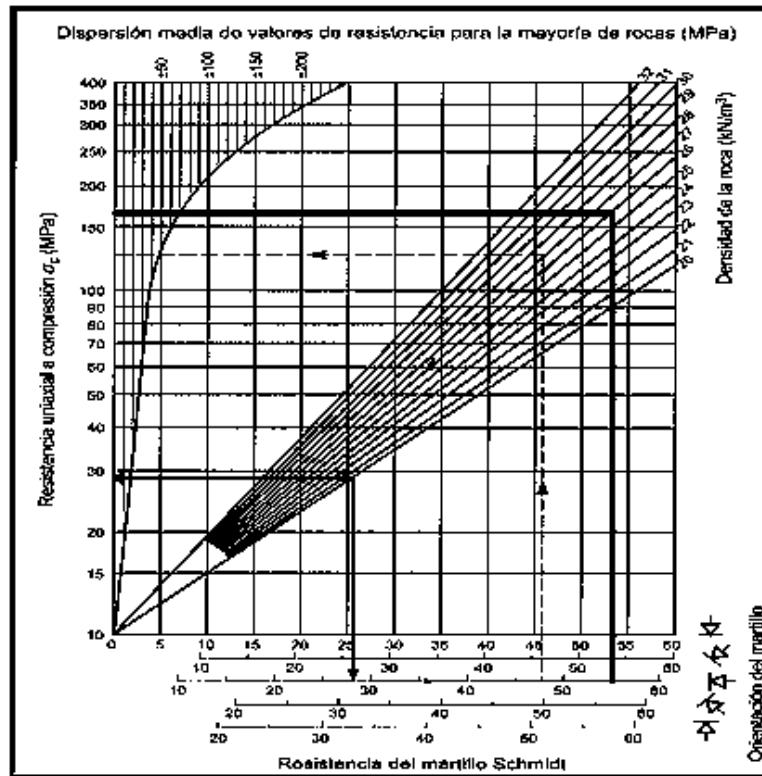
35	30	39	25	29	31	34	38	28	30
26	35	29	31	37	39	36	25	35	22

Fuente: Propia.

$$(22+25+25+26+28+29+29+30+30+31)/10=27$$

Adicionalmente nos basamos en la densidad de los shales calcáreos que es aproximadamente de 21KN/m³.

Figura 34. Abaco Dispersión media de valores de resistencia MPa. [8]



En la figura 34 se observa sobre la línea continua izquierda los datos mencionados anteriormente, con lo cual se obtuvo un valor aproximado de 29 Mpa a la resistencia a la compresión uniaxial, por lo tanto el Factor B se clasificó con la tabla 44 con un puntaje de 4.

Tabla 44. Puntaje por la resistencia a la compresión simple de la roca intacta [8].

Índice ensayo de carga puntual (Mpa)	Resistencia a Compresión Simple RCB (Mpa)	Puntaje
>10	>250	15
4 - 10	100 - 250	12
2 - 4	50 - 100	7
1 - 2	25 - 50	4
N/A	10 - 25 (9-25)	2
N/A	3 - 10 (1-5)	1
N/A	<3 (<1)	0

La zona 2 tiene una separación entre discontinuidades que varía en el rango de 60 a 200 mm, por lo cual se obtuvo un puntaje de 8 para el factor c.

Tabla 45. Puntaje para el espaciamiento de las discontinuidades del juego más importante [8].

Espaciamiento , (m)	Puntaje
>2	20
0.6 - 2	15
0.2 - 0.6	10
0.06 - 0.2	8
< 0.06	5

Para obtener el Factor D es necesario la suma de las condiciones físicas de las discontinuidades, persistencia, abertura, grado de aspereidad, tipo de relleno y grado de alteración de los planos de contacto, si entonces $D=E1+E2+E3+E4+E5$ respectivamente.

Teniendo en cuenta los datos de campo, se observó que en general las discontinuidades presentan una persistencia <1m, con abertura entre 0.1 y 0.25

mm, ligeramente ásperas, con relleno principalmente suave con un espesor <5mm y moderadamente alterados los planos de contacto.

Tabla 46. Valores específicos sobre la condición física de las fracturas para obtener el Factor D [8]

Persistencia o longitud (E1)	Abertura (E2)	Grado de aspersion (E3)	Tipo de relleno (E4)	Grado de alteración planos de contacto (E5)
< 1 m (6)	Ninguna (6)	Muy ásperas (6)	Ninguno (6)	Inalteradas (6)
1-3 m (4)	< 0.1 mm (5)	Ásperas (5)	Relleno duro <5 mm (4)	Ligeramente alteradas (5)
3-10 m (2)	0.1-1.0 mm (4)	Ligeramente ásperas (3)	Relleno duro <5 mm (2)	Moderadamente alteradas (3)
10-20 m (1)	1-5 mm (1)	Suaves (1)	Relleno suave <5 mm (2)	Altamente alteradas (1)
> 20 m (0)	> 5 mm (0)	Pulidas (0)	Relleno suave >5 mm (0)	Descompuestas (0)

Por lo tanto, sumando las propiedades nos arrojaron un puntaje para el factor D de 18 según la tabla 46.

Para el Factor E no se observó presencia de agua, los planos de discontinuidad se encontraban en condiciones secas, por lo cual la tabla 47 nos indicó un puntaje de 10.

Tabla 47. Puntaje según las condiciones del agua subterránea [8].

Ground Water	General Conditions	Completely Dry	Moist only	Water under moderate pressure
Rating		10	7	4

El Factor F está basado en la orientación de las discontinuidades que para el caso del macizo rocoso en estudio fue considerado como regular debido al fracturamiento y a la posibilidad de presentarse fallas en cuñas.

Tabla 48. Corrección en base a la orientación de las discontinuidades [8].

ORIENTACION DEL RUMBO Y BUZAMIENTO		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	REGULAR	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
VALORES	TUNELES Y MINAS	0	-2	-5	-10	-12
	CIMENTACIONES	0	-2	-7	-15	-25
	TALUDES	0	-5	-25	-50	-60

De acuerdo a lo anterior se obtuvieron los siguientes puntajes:

Factor A: 17 puntos

Factor B: 4 puntos

Factor C: 8 puntos

Factor D: 18 puntos

Factor E: 10 puntos

Factor F: -25 puntos

TOTAL: 32 PUNTOS

Con este valor entramos a la tabla 49 para obtener la calidad del macizo rocoso según el RMR 76.

Tabla 49. Categorías de la clasificación Geomecánicas RMR-76 [8].

VALOR TOTAL DEL R.M.R	81-100	61-80	11-60	21-30	<20
CLASE NUMERO	I	II	III	IV	V
DESCRIPCION	MUY BUENO	BUENO	MEDIO	MALO	MUY MALO

Según la clasificación RMR 76, la zona 2 se clasifica geomecánicamente como un macizo malo con un puntaje de 32.

8.2.4 Valor de RMR (Bieniawski, 1989). Para este método Bieniawski varió la puntuación para las condiciones del agua subterránea, por lo cual se tomaron los mismos valores del Factor A, Factor B, Factor C, Factor D del punto anterior y se modificó el factor E.

Factor A: 17 puntos

Factor B: 4 puntos

Factor C: 8 puntos

Factor D: 18 puntos

Factor F: -25 puntos

Por lo cual para el factor E el puntaje dado según la tabla 50 es de 15.

Tabla 50. Puntaje según las condiciones del agua subterránea RMR-89 [8].

Filtración por cada 10 m de longitud del túnel (L/min)	Presión del agua en la discontinuidad dividido la tensión Principal Mayor	Descripción de las condiciones generales	Puntaje
Nada	0	Completamente seco	15
<10	0.0 - 0.1	Apenas húmedo	12
10-25	0.1 - 0.2	Húmedo	7
25-125	0.2 - 0.5	Goteo	4
>125	> 0.5	Flujo continuo	0

Según la clasificación del RMR 89 el puntaje total que se obtuvo fue de 37 y se clasifica como clase IV como un macizo rocoso malo.

Tabla 51. Clasificación geomecánica RMR 89 [8]

R.M.R. (Suma de los puntajes obtenidos de las tablas anteriores)	Descripción del macizo rocoso	Clase
81-100	Muy bueno	I
61-80	Bueno	II
41-60	Medio (Regular)	III
21-40	Malo	IV
0-20	Muy malo	V

8.2.5 Valor de RMR (Bieniawski-Geocontrol, 2014). En este método a diferencia de los anteriores, los parámetros cambian de orden de estudio y su clasificación se basa en la tabla 52.

Tabla 52. Criterios para calcular RMRb utilizados por geocontrol [8]

I.- CLASSIFICATION PARAMETERS																
RMR (1) UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF INTACT ROCK																
Oci (kg/cm2)	>2.500	1.000-2.500	500-1.000	250-500	500-250	10-50	<10									
RATING	15	12	7	4	2	1	0									
RMR (2+3) RQD AND SPACING OF JOINTS																
JOINTS PER METER	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RATING	40	34	31	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
JOINTS PER METER	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
RATING	17	16	15	14	14	13	13	12	12	11	11	10	10	9	9	
JOINTS PER METER	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
RATING	9	8	8	7	7	7	6	6	6	5	4	3	3	2	2	
JOINTS PER METER	46	47	48	49	50											
RATING	1.5	1	1	0.5	0											
RMR(4) JOINT'S CONDITION																
PERSISTENCE	<1 m	1-2 m	3-10 m	10 - 20 m	20m											
	6	4	2	1	0											
APERTURE	0	<0.1 mm	0.1-1 mm	1-5 mm	> 5 mm											
	6	5	4	1	0											
ROUGHNESS	Very rough	Rough	Slightly	Smooth	Stickenside											
	6	5	3	2	0											
INFILLING	NONE	HARD FILLING <5mm	HARD FILLING >5mm	SOFT FILLING	NONE											
	6	4	2	2	0											
WEATHERING	UNWEATHERED	SLIGHTLY	UNWEATHERED	SLIGHTLY	UNWEATHERED											
	6	5	3	1	0											
RMR(5) GROUNDWATER CONDITIONS																
STATE	DRY	DAMP	WET	DRIPPING	FLOWING											
RATING	15	10	7	4	0											

Criterio 1

La resistencia a la compresión simple de la roca intacta es de 29 MPa por lo cual está en el rango entre (250-500) Kg/cm² y se obtuvo un puntaje de 4.

Criterio 2 y 3

El segundo parámetro se basa en las juntas por metro que se encuentran en el macizo, que para este caso es de aproximadamente 9 discontinuidades por metro con un puntaje de 23.

Criterio 4

La persistencia la cual es <1 metro, puntaje = 6.

Las aberturas están entre 0,1 – 0,25 mm, puntaje = 4.

La rugosidad la cual se considera como áspera, puntaje = 5.

El tipo de relleno de las juntas el cual se describió como un relleno suave, puntaje = 2.

La alteración por agentes atmosféricos o meteorización es ligera, puntaje = 1.

Las condiciones del agua subterránea se encontraron en estado seco, puntaje = 15

Criterio 5

La alterabilidad de la matriz rocosa está basada en la determinación de la durabilidad al desmoronamiento de rocas blancas, el cual es el Índice de durabilidad

de los diferentes ciclos se obtiene a partir de las masas secas determinadas antes y después de cada ciclo. Como el macizo cuenta con lutitas la cual es una roca blanda y meteorizada a la cual se le asignó un puntaje de 0.

Tabla 53. Criterios para la evaluación de la alterabilidad de la matriz rocosa [8].

Alterabilidad Id2(%)			
<85	60-85	30-60	<30
10	8	4	0

La sumatoria de los criterios dio un total de 60, no se tuvieron en cuenta parámetros de corrección pues los datos por el manual de Geocontrol están basados en la dirección de los túneles de acuerdo a la orientación de las familias principales de discontinuidades, lo que significa que el macizo rocoso en la zona 2 se clasifica como un macizo con condiciones geotécnicas medio (regular) según la tabla 51, puesto que esta clasificación solo se basa en el cambio de las ponderaciones de los parámetros.

8.2.6 Valor de Q (Barton, 1974).

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

La zona 2 del macizo rocoso al igual que la zona 1 y 3, se ve afectado por 3 principales discontinuidades, (estratificación, diaclasa 1, diaclasa 2).

Tabla 54. Clasificación de Jn según el número de discontinuidades [8].

Joint set number J	Condition	Jn
A	Massive, none or few joints	0.5-1.0
B	One joint set	2
C	one joint set plus random	3
D	Two joint sets	4
E	Two joint sets plus random	6
F	Three joint sets	9
G	Three joint sets plus random	12
H	Four or more joint sets, random, heavily jointed, "sugar cubes", ets	15
J	Crushed rock, earthh like	20

Las discontinuidades se encuentran cortadas entre ellas a lo largo del macizo rocoso.

Tabla 55. Clasificación de Jr [8].

Joint roughness number J	Condition a) Rock wall contact and b) Rock wall contact before 10 cm shear	Jn
A	Discontinuous joints	4
B	Rough or irregular, undulating	3
C	Smooth, undulating	2.0
D	Slickensided, undulating	1.5
E	Rough or irregular, planar	1.5
F	Smooth, planar	1.0
G	Slickensided, planar	0.5
	c) No rock wall contact when sheared	
H	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0
J	Sandy, gravelly, or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	1.0

La alteración de las discontinuidades presenta recubrimiento de arcillas limosas y en algunos casos arenosas.

Tabla 56. Clasificación de Ja. [8]

Joint alteration number J	a) Rock wall contact (no mineral fillings, only coatings)	Jn	Jn
A	Tightly healed hard, non-softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote		0.75
B	Unaltered joint walls, surface staining only	25-35	1.0
C	Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30	2.0
D	Silty or sandy clay coatings, small clay fraction (non-softening)	20-25	3.0
E	Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite, mica. Also chlorite, talc, gypsum, and graphite, etc., and small quantities of swelling clays	8-16	4.0

Factor de reducción por la presencia de agua J_w , el talud presenta condiciones secas, no se observó humedad en las discontinuidades ni en la parte externa del macizo rocoso.

Tabla 57. Clasificación de J_w . [8]

Joint water reduction factor J_w		Approx. Water pres (Kg/cm ²)	J_w
A	Dry excavations or minor inflow, i.e., 5 lt./ min locally	<1	1.0
B	Medium inflow or pressure occasional out-wash of joint fillings	1-2.5	0.66
C	Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	2.5-10	0.5
D	Large inflow or high pressure, considerable out-wash of joint fillings	2.5-10	0.33
E	Exceptionally high inflow or water pressure at blasting. Decaying with time.	>10	0.2-0.1
F	Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay	>10	0.1-0.05

Condiciones tensionales de la roca, el macizo rocoso presenta zonas de fracturas en roca competente y algunas partes sueltas, parámetro SRF de tipo D.

Tabla 58. Clasificación de SRF [8].

SRF	Condition	SRF		
	a) Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated.			
A	Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)	10.0		
B	Single-weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation <=50m)	5.0		
C	Single-weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock (depth of excavation >50m)	2.5		
D	Multiple-shear zones in competent rock (clay-free). Loose surrounding rock (any depth)	7.5		
E	Single-shear zones in competent rock (clay-free) (depth of excavation <=50m)	5.0		
F	Single-shear zones in competent rock (clay-free) (depth of excavation >50m)	2.5		
G	Loose open joints, heavily jointed or "sugar cubes", etc. (any depth)	5.0		
	b) competent rock, rock stress problems	σ/σ_1	σ/σ_1	SRF
H	Low stress, near surface open joints	>200	<0.01	2.5
J	Medium stress, favourable stress condition	200-10	0.01-0.3	1.0
K	High stress, very right structure (usually favourable to stability, may be unfavourable to wall stability)	10-5	0.3-0.4	0.5-2
L	Moderate slabbing after > 1hr in massive rock	5-3	0.5-0.65	5-50
M	Slabbing and rock burse after a few minutes in massive rock	3-2	0.65-1.0	50-200
N	Heavy rock burse (strain-burse) and immediate deformations in massive rock	<2	>1	200-400
	c) Squeezing rock; plastic flow of incompetent rock under the influence of high rock pressure			
			σ/σ_1	SRF
O	Mild squeezing rock pressure		1-5	5-10
P	Heavy squeezing rock pressure		>5	10-20
	d) Swelling rock; chemical swelling activity depending on presence of water			
			SRF	
Q	Mild swelling rock pressure		5-10	

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

$$Q = \frac{76.14}{9} * \frac{4}{3} * \frac{1}{7.5} = 1.5$$

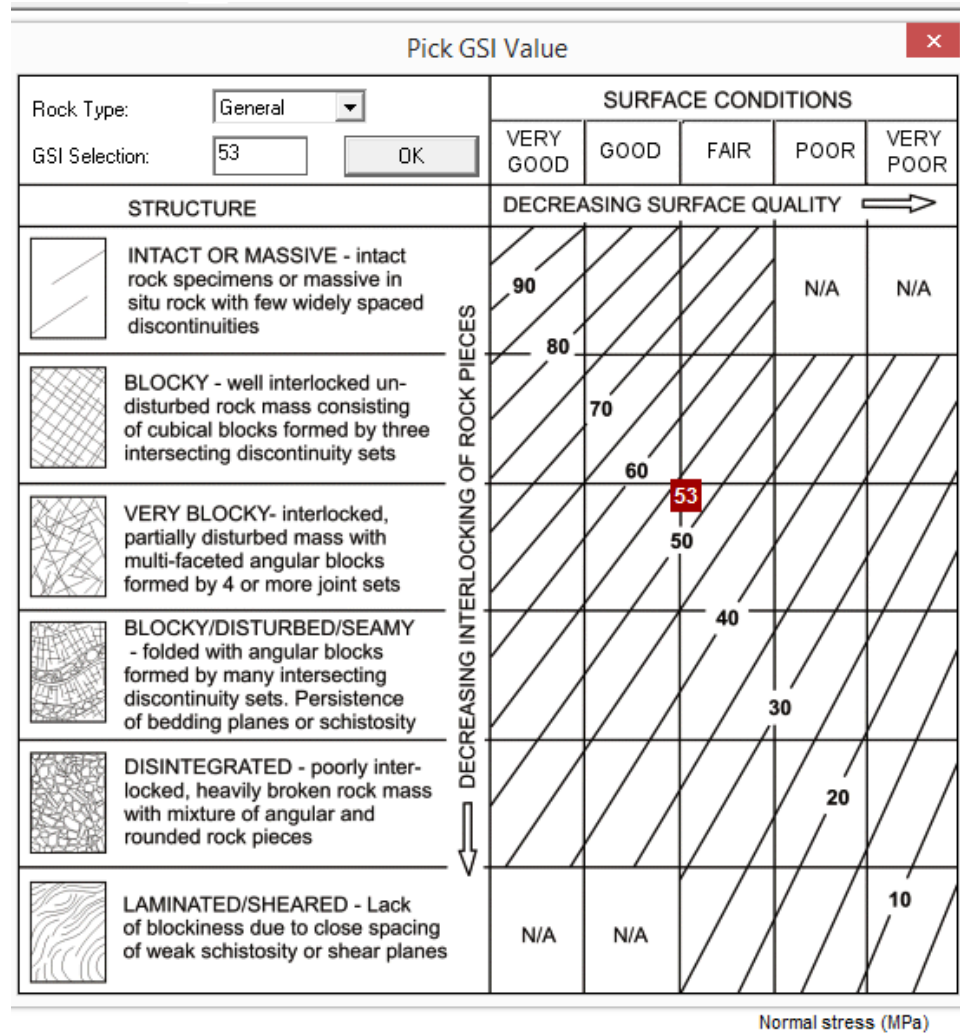
Tabla 59. Clasificación de Q de Barton 1974 [8].

TIPO DE MACIZO	VALOR DE Q
Excepcionalmente malo	$10^{-3} - 10^{-2}$
Extremadamente malo	$10^{-2} - 10^{-1}$
Muy malo	$10^{-1} - 1$
Malo	1 - 4
Medio	4 - 10
Bueno	10 - 40
Muy Bueno	40 - 100
Extremadamente bueno	100 - 400
Excepcionalmente bueno	400 - 1000

La zona 2 se clasifica geotécnicamente como un **Macizo Malo** según Barton 1974.

8.2.7 Valor de GSI (Hoek et al, 2000). Las condiciones de superficie del macizo rocoso en la zona 2 se consideraron intermedias debido a que el grado de meteorización no es muy alto y en las zonas de debilidad no hay presencia de humedad, a diferencia de la zona 1 y 3, esta se encuentra más diaclasada presentando más planos de intersección y con condiciones de superficie regulares, con lo cual se obtuvo un valor de GSI de 53, como se observa en la figura 35.

Figura 35. Estimación del valor de GSI.



Fuente: RocLab.

8.2.8 Valor de RMI (Palmstrom, 1996). Para la obtención del parámetro RMI se tuvo en cuenta el proceso que se muestra en la figura 24 para la caracterización de las discontinuidades, donde;

$$RMI = JP * \sigma_c$$

$$JP = 0.2\sqrt{JC} * V_B^D$$

$$D = 0.37JC^{-0.2}$$

Para un volumen de bloque de 0.1 m³

$\sigma_c = 29 \text{ MPa}$ (Martillo Smith)

Ahora:

$$Jc = Jl * \frac{JR}{JA}$$

$$JR = \text{altamente ondulado} + \text{rugoso} = 3$$

$$JA = \text{Material friccional} + \text{relleno de calcita} < 5\text{mm} = 8$$

$$JL = \text{Longitu } 0.1 - 1 \text{ m} + \text{corto} + \text{juntas discontinuas} = 4$$

$$Jc = 4 * \frac{3}{8}$$

$$Jc = 1.5$$

Estos valores se obtuvieron a partir de la tabla 60.

Tabla 60. Clasificación RMI (PALMSTROM, 1996) [8].

FACTOR DE RUGOSIDAD DE LAS JUNTAS (JR) (las valoraciones de JR están basadas en Jr del sistema Q)						
(Las valoraciones resaltadas en <i>italico</i> son similares a Jr)		Ondulación del plano diaclasado a gran escala				
		Planar	Ligeramente ondulado	Ondulado	Altamente ondulado	Escalonado o entrelazado
Suavidad del plano de junta a pequeña escala	Muy rugoso	2	3	4	6	6
	Rugoso	1,5	2	3	4,5	6
	Suave	1	1,5	2	3	4
	Pulido o espejo de falla*	0,5	1	1,5	2	3
	Para diaclasas (Juntas) rellenas JR=1 Para diaclasas irregulares se sugiere una valoración JR=5					
*Aplicar estas valoraciones a espejos de falla con posibles movimientos a través de estrías.						

FACTOR DE ALTERACIÓN DE JUNTAS (JA)				
Paredes de la junta con contacto parcial o sin contacto	RELLENOS DE:	TIPO	Relleno fino (<5mm)	Relleno grueso
	Material friccional	arena, limo, calcita, etc. (Sin reblandecimiento)	4	8
	Materiales duros y cohesivos	relleno compactado de arcilla, clorita, talco, etc	6	6-10
	Materiales blandos y cohesivos	arcillas de media a bajas sobre consolidación, dorita, talco, etc	8	12
	Materiales expansivos y arcillosos	materiales de relleno que exhiben propiedades expansivas	8 - 12	13-20

FACTOR DE TAMAÑO Y CONTINUIDAD DE LAS DIACLASAS (JUNTAS) (JL)				
TIPO	Longitud	Tamaño	Juntas continuas	Juntas discontinuas*
División de la estratificación o foliación	< 0.5 m	muy corto	3	6
	0.1 - 1 m	corto o pequeño	2	4
Diaclasas o juntas	1 - 10 m	mediano	1	2
	10- 30 m	grande o largo	0,75	1,5
	> 30 m	muy grande o largo	0,5	1
Junta (sellada), dique o cizalla**	> 30 m	muy grande o largo	0,5	1

*Las juntas discontinuas acaban en roca masiva

**frecuentemente son una singularidad y deben eneste caso ser tratadas por separado.

Por lo tanto:

$$D = 0.37(1.5)^{-0.2} = 0.34$$

$$JP = 0.2\sqrt{1.5} * 0.1^{0.34} = 0.11$$

$$RMI = 29 * 0.11 = 3.19$$

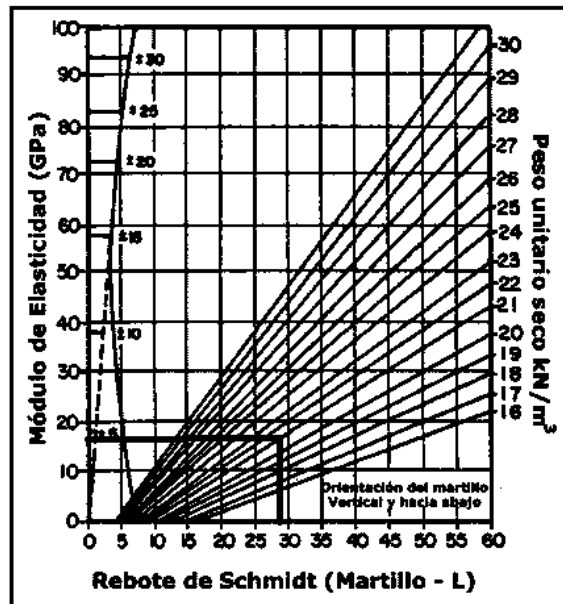
Por lo tanto el **RMI** es <

10 y se Clasificó como un macizo de resistencia **ALTA** según la tabla 23.

8.2.9 Valor de Jf (Ramamurthy, 2004). Para la clasificación según (Ramamurthy, 2004) procedimos a calcular el Modulo E de deformación de la roca intacta según la figura 36 de la cual obtuvimos un valor de 18000 Mp.

Para la utilización de esta tabla entramos con 27 rebotes del martillo Schmidt y un peso unitario de 21 KN/m³.

Figura 36. Abaco de correlación entre el número de rebotes del martillo Schmidt, el peso unitario y el módulo de deformación-Zona 2 [8].



Resistencia a la compresión inconfiada= 29Mp; Por lo tanto, $M_r = E/R_{ci} = 18000/29 = 621$.

El macizo rocoso se encuentra moderadamente meteorizado, para nuestro caso la clasificación de este es DAW2 shales según las tablas 61 y 62.

Tabla 61. Clasificación No 1 Geingenieril para Rocas y Masas Rocosas-Zona 2 [8].

CLASIFICACION GEOINGENIERIL PARA ROCAS Y MASAS ROCOSAS				
SIMBOLO	GRADO DE METEORIZACION	TERMINO	R %	DESCRIPCION
W0	0	Fresca	100 - 80	Sin signos de meteorización
W1	25	Ligeramente	30 - 50	
W2	25 - 50	Moderadamente	50 - 25	
W3	50 - 75	Muy	25 - 10	
W4	> 75	Completamente	10 - 1	
W5	100	Suelo residual	< 1	Todo el material descompuesto, sin trazas de la estructura de la roca

$$\% R = \left(\frac{\sigma c(\text{meteorizada})}{\sigma c(\text{fresca})} \right) \times 100$$

Tabla 62. Clasificación No 2 Geingenieril para Rocas y Masas Rocosas-Zona 2 [8].

(Ramamurthy, 2004)		
CLASE	DESCRIPCIÓN	σ_{cij} (Mpa)
A	Resistencia muy alta	> 250
B	Resistencia alta	100 - 250
C	Resistencia moderada	50 - 100
D	Resistencia media	25 - 50
E	Resistencia baja	5 - 25
F	Resistencia muy baja	< 5

CLASE	DESCRIPCIÓN DE LA RELACION MODULAR	Relación Modular $M_{rij} = E_{ij} / \sigma_{cij}$
A	Muy alta	> 500
B	Alta	200 - 500
C	Media	100 - 200
D	Baja	50 - 100
E	Muy baja	< 50

8.2.10 Valor de RMS (Stille et al 1982). El valor de ajuste RMS se calculó teniendo en cuenta el número de discontinuidades y la continuidad de las mismas en el

macizo rocoso, de lo cual obtuvimos un puntaje de -10 como se observa en la tabla 28.

Con base en el valor de RMRbasico de 32 obtuvimos posteriormente un RMS=22, con este valor entramos a la tabla 29, de la cual se obtuvieron las correlaciones con el RMS con los parámetros geotécnicos del macizo rocoso.

$$\varphi = 25^\circ; C = 0.8 \text{ Mpa}$$

8.2.11 Valor de N y RCR (Goel et al 1996).

$$N = 76.14 * \frac{Jr * Jw}{Jn * Ja}$$

$$N = \frac{76.74 * 4 * 1}{9 * 3}$$

$$N = 11.37$$

$$RCR = 8 * \ln N + 30$$

$$RCR = 8 * \ln (11.37) + 30$$

$$RCR = 49.45$$

$$Q = \frac{N}{SRF} = \frac{11.37}{5.0} = 2.27$$

La determinacion del Valor de Q apartir de RMR por GOEL (1196), es similar al Q de Barton(1974), por lo tanto se mantiene en la misma clasificacion de Macizo Malo.

8.2.12 Valor SRI (Rocas Sedimentarias) (Salcedo, 1999).

$$SRI = 100 - f1 - f2 - f\sigma - [\sum(fs + fp + fc)]$$

Por consiguiente, utilizamos las tablas 63, 64, 65, 66, donde tomamos los valores de los parámetros f, a partir de los datos obtenidos anteriormente.

Tabla 63. Clasificación σ Macizo Rocoso D. Salcedo-Zona 2 [8].

PROPORCIÓN DE ROCAS NO FOLIADAS Y ROCAS FOLIADAS	No foliada (100% \rightarrow 0)	Poco foliada (75% \rightarrow 25%)	Moderadamente foliada (50% \rightarrow 50%)	Foliada (25% \rightarrow 75%)	Muy Foliada (0-100%)	Cizallada/ Perturbada
f1	0	4	8	12	16	MRI < 20°
PENETRATIVIDAD DE FOLIACIÓN	No penetrativa	Poco penetrativa	Moderadamente penetrativa	Penetrativa	Muy penetrativa	
f2	0	3	8	16	20	
COMPRESION SIN CONFINAR DE ROCA INTACTA	>200 Mpa	100-200 Mpa	50-100 Mpa	20-50 Mpa	10-20 Mpa	1-10 Mpa
f σ	0	1	3	4	6	8

Tabla 64. Clasificación fs, fp Macizo Rocoso D. Salcedo [8]

INFLUENCIA DE LAS DIACLASAS					
ESPACIAMIENTO O FRECUENCIA DE DIACLASA No.1	S > 100 cm FD: < 1:1	S = 20 - 100 cm FD: 1:1 a 5:1	S = 10 - 20 cm FD: 5:1 a 10:1	S = 5 -10 cm FD: 10:1 a 20:1	S < 5 cm FD: > 20:1
fs	0.5	1.5	2	3	3.5
PERSISTENCIA DE LA DIACLASA No.1	Muy baja persistencia (< 1 m)	Baja persistencia (1 a 3 m)	Persistencia media (3 - 10 m)	Alta persistencia (10 - 20 m)	Muy alta persistencia (> 20 m)
fp	0.5	1.5	3	4	5

Tabla 65. Clasificación fc Macizo Rocosó D. Salcedo [8].

INFLUENCIA DE LAS DIACLASAS					
CONTACTO Y RELLENO ENTRE LA LONGITUD PERSISTENTE DE LAS PAREDES DE DIACLASA No.1 (fc)	ABIERTA (Más del 80% de las paredes de la diaclasa no tiene contacto)		INTERMEDIA Promediar en forma ponderada los valores correspondientes a las características de las longitudes de las paredes sin contacto y en contacto, indicados en las columnas adyacentes.	CERRADA (Más del 80% de la diaclasa tiene las paredes en contacto)	
	CON RELLENO DURO Y PAREDES RUGOSAS	0.5		MUY RUGOSA	0.5
	CON RELLENO BLANDO Y PAREDES RUGOSAS	1.5		RUGOSA	1.0
	CON RELLENO DURO Y PAREDES LISAS	2.0		RUGOSIDAD MEDIA	1.5
	CON RELLENO BLANCO Y PAREDES LISAS	2.5		LISA	2.5
	SIN RELLENO	3.5		MUY LISA A PULIDA CON ESTRIAS Y ESPEJOS DE CIZALLAMIENTO	3.0

Tabla 66. Clasificación f1, f2 Macizo Rocosó D. Salcedo [8].

CLASIFICACION DE MASAS ROCOSAS SEDIMENTARIAS DETERMINACION DEL INDICE DE MASAS ROCOSAS SEDIMENTARIAS (SRI)						
PROPORCION DE ROCAS COMPETENTES A NO COMPETENTES	Rocas competentes (100% - 0)	Predominio de rocas competentes (75%-25%)	Igual proporción de rocas competentes e incompetentes (50%-50%)	Predominio de rocas incompetentes (25%-75%)	Rocas incompetentes (0-100%)	Cizallada / Perturbada
f1	0	4	8	12	16	SRI < 20°
PENETRATIVIDAD DE ESTRATIFICACION	No penetrativa	Poco penetrativa	Moderadamente penetrativa	penetrativa	Muy penetrativa	
f2	0	3	8	16	20	

Ahora

$$SRI = 100 - 8 - 8 - 4 - [\sum(2 + 0.5 + 1.5)] = 76$$

Tabla 67. Clasificación D. Salcedo [8].

DETERMINACION DE CLASES DE ROCA CON BASE EN LOS VALORES DEL INDICE MRI O SRI (Salcedo, 1999) TABLA PRELIMINAR PARA ESTIMAR PROPIEDADES (EN PROCESO DE REVISION). VERSION A SER EVALUADA EN LA PRACTICA									
PARAMETRO	DEFINICION DE CLASES CON BASE EN INDICES MRI O SRI								
	IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	IVA	IVB	V
MRI O SRI	91-100	81-90	71-80	61-70	51-60	41-50	31-40	21-30	<20
Φm (°)	> 45	40-45	35-40	30-35	25-30	20-25	15-20	10-15	5-10
Cm (KPa)	>1000	700-1000	400-700	100-400	70-100	50-70	25-50	5-25	<5
Em (Mpa). Bieniawski, 1978, serafim-Pereira, 1983	82000 - 100000	62000- 80000	42000- 60000	22000- 40000	10600- 20000	5960- 10000	3350- 5625	1880- 3160	Por definir
Em (Mpa) Khabbazi et al 2012	34030 - 49010	21690-32600	13030-20670	7240-12330	3620-6790	1560-3360	530-1.420	120-470	Por definir
σm (Mpa)	LA ESTIMACION DE σm REQUIERE, DE ACUERDO A LA MAYORIA DE LAS EXPRESIONES PROPUESTAS, CONOCER EL VALOR DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIN CONFINAR DE LA ROCA INTACTA σci								

Tabla 68. Resumen parámetros clasificación según D. Salcedo.

Clasificación D. Salcedo	
SRI-ROCAS SEDIMENTARIAS	
f1	8
f2	8
f σ	4
f s	2
f p	0.5
f c	1.5
CLASIFICACION DE CLASES CON BASE EN INDICE SRI	
SRI	76
	IIA

Fuente: Propia.

Según la clasificación de Salcedo tuvimos como resultado para el macizo rocoso en la zona 2 como **Tipo IIA** con características que se observan en la tabla 67.

8.2.13 Estimación de la resistencia a la compresión uniaxial de la masa rocosa.

- Hoek-Brown-RMR76. (1988) $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \sqrt{e} (RMR_{basic}-100)/9$
- Yudhbir-RMR76 (1983) $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} * e^{7.65 (RMR_{basic}-100)/100}$
- Q (Barton) (2002) $\sigma_{cm} = 5 \gamma (Q * \sigma_{ci}/100)^{1/3}$

- d. R_{Mi} (Palmstrom) (1995) $R_{Mi} = \sigma_c * J_P$
- e. Hoek-Brown-GSI (2002) $\sigma_{cm} = \sigma_{ci} * EXP (GSI-100/9-3D) (1/2+1/6) (EXP -GSI/15 - EXP -20/3)$
- f. Ramamurthy 2004 $\sigma_j = \sigma_{ci} * e^{-0.008[5(100-RMR)]}$
- g. RMS (Stille et al) Ver Tabla 29.

Tabla 69. Tabla resumen de las relaciones empíricas para la estimación de la resistencia a compresión uniaxial σ_{cm} de las masas rocosas-Zona 2.

Datos	Valor	Autores	σ_{cm} (MPA)
σ_{ci}	29	Hoek-Brown-RMR76 (1988)	0.66333048
RMRbasico	32	Yudhbir -RMR76(1983)	0.15966073
τ	2	Q (Barton)(2002)	8,673482
Q	2.25	R _{Mi} (Palmstrom)(1995)	3.48
GSI	53	Hoek-Brown-GSI (2002)	4,167905
J _P	0.12	Ramamurthy 2004	2,333329
RMR	37	RMS (Stille et al 1982)	2,5

Fuente: Propia.

8.2.14 Estimación del módulo de elasticidad de la masa rocosa. De acuerdo a las expresiones propuestas en la literatura especializada, se realizó una tabla resumen para la determinación por diferentes autores del módulo de elasticidad de la masa rocosa teniendo en cuenta los datos mencionados anteriormente.

Tabla 70. Resumen de resultados del módulo de elasticidad de la masa rocosa – Zona 2.

AUTORES	UNIDADES	RELACIÓN	OBSERVACIONES
Bieniawski (1978):	$E_m(\text{Gpa})=$	No valido para RMR menores a 50	
Serafim & Pereira (1983)	$E_m(\text{Gpa})=$	3,55	
Nicholson & Bieniswki (1990)	$E_m/E=$	0,04	
Mitri et al (1994)	$E_m(\text{Gpa})=$	4,18	
Read et al (1994)	$E_m=$	3,28	
Barton (1983)	$E=$	8,80	
Barton (2002)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	8,67	
Hoek et al (2002)	$E_m(\text{Gpa})=$	6,22	
Gokceoglu et al (2003)	$E_m=$	0,82	
Sonmez et al (2004)	$E_m=$	56,79	
Hoek & Diederichs (2006)	$E_{mass}(\text{Mpa})=$	3218,94	
Hoek & Diederichs (2006)	$E_m=$	3,61	
Sonmez et al (2006)	$E_m=$	2,61	
Chun et al (2006)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	1,52	
Ramamurthy (2001)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	0,36	
Ramamurthy (2004)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	5,48	
Ramamurthy (2004)	$E_{mass}(\text{Gpa})=$	8,23	
Palmstrom & Singh (2001)	$E_m=$	11,55	
Galera et al (2005)	$E_m(\text{Gpa})=$	2,80	
Stacey & Page (1986)	$E_m=$	2,75	
		10,02	
Gardner (1987)	$E_m=$	5,27	
Zhang & Einstein (2004, 2016)	$E_m/E=$	0,06	Límite inferior
		0,58	Límite superior
		0,32	Media
Khabbazi et al (2012)	$E_m=$	0,60	
Mohammadi & Rahmannedjad (2010)	$E_m(\text{Gpa})=$	3,58	
Gholamnejad et al (2013)	$E_m=$	1,74	
Ramamurthy & Arora (1994) Ramamurthy (2001 y 2004)	$E_{ij}=$	18,63	

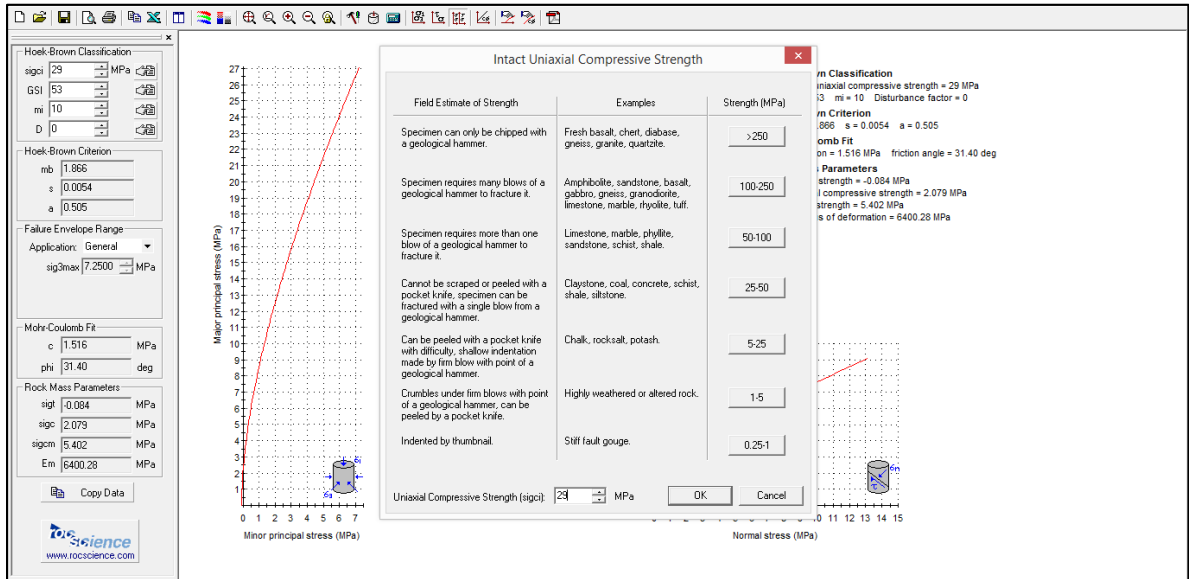
Fuente: Propia.

8.2.15 Estimación del ángulo de fricción y la cohesión de la masa rocosa (ϕ_m y cm).

a. Utilizando el Software RocLab basado en GSI.

De acuerdo al trabajo en campo realizado con el martillo Smith tomamos el valor de sigci de 29 Mpa.

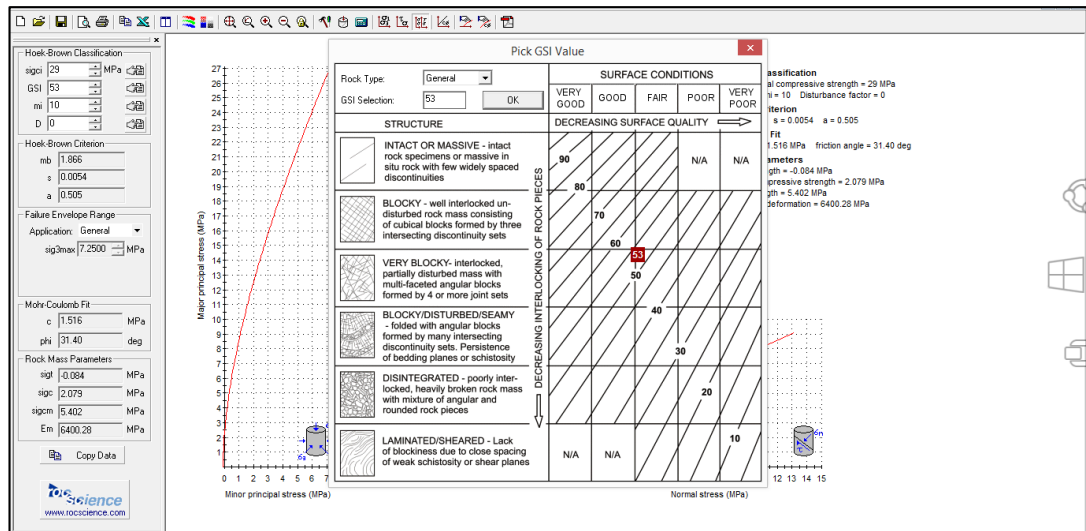
Figura 37. Estimación de sgici.



Fuente: RocLab.

Posteriormente definimos el GSI=53.

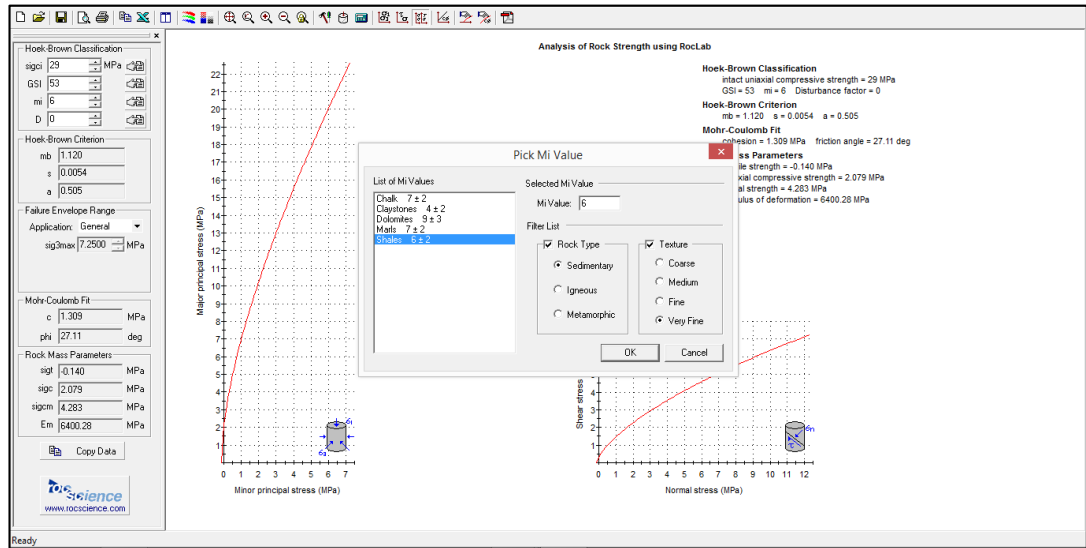
Figura 38. Estimación de GSI.



Fuente: RocLab.

De acuerdo a las condiciones del talud rocoso tomamos el “mi” con un valor de 6 por su composición principalmente de shales.

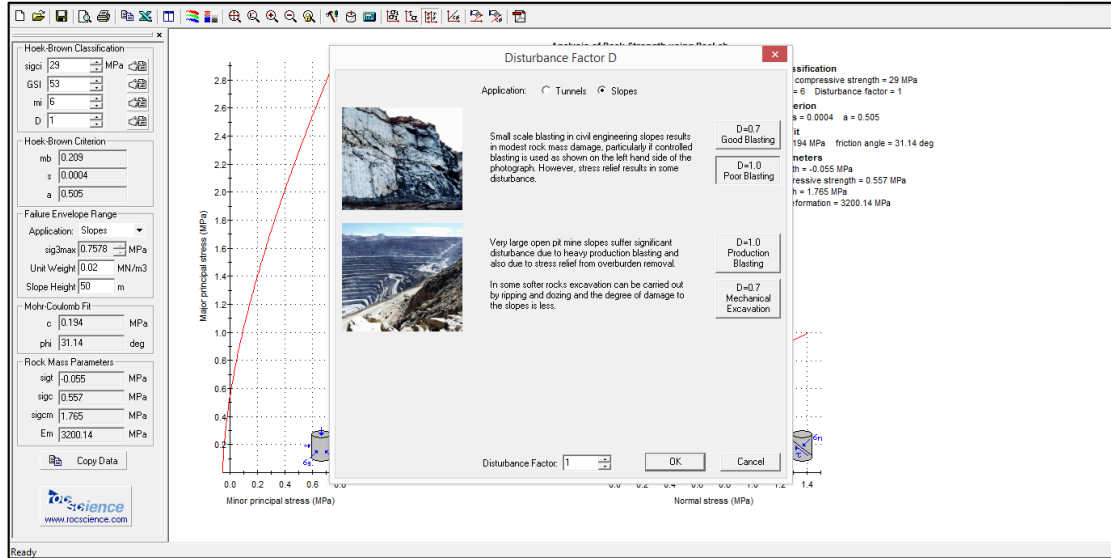
Figura 39. Estimación de parámetro “mi”.



Fuente: RocLab.

De acuerdo a las condiciones del macizo se definió el parámetro $D=1$ para taludes y además de ser un material que puede ser retirado de forma manual y no necesita voladura.

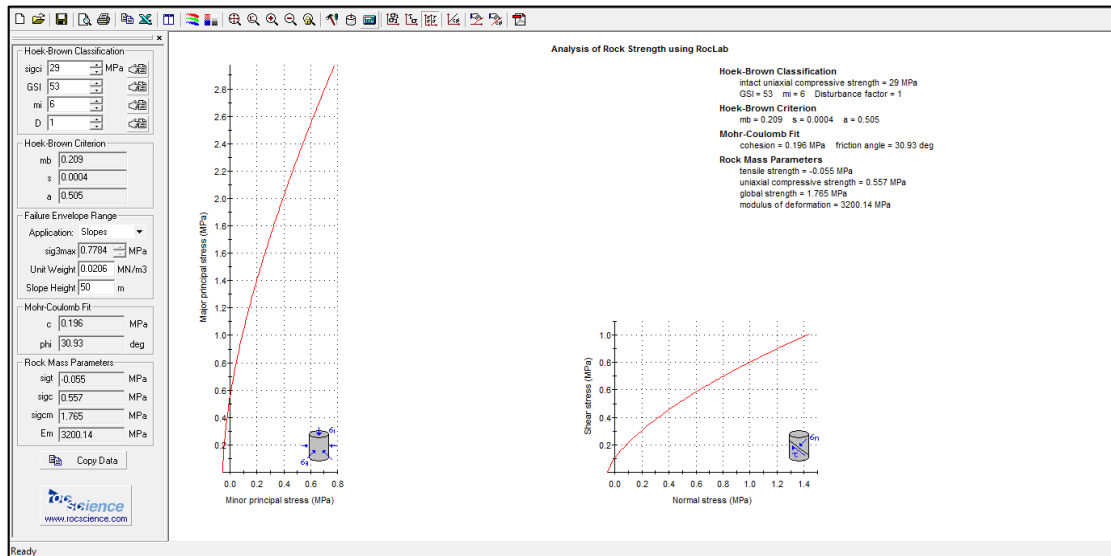
Figura 40. Estimación de parámetro D con Software RocLab.



Fuente: RocLab.

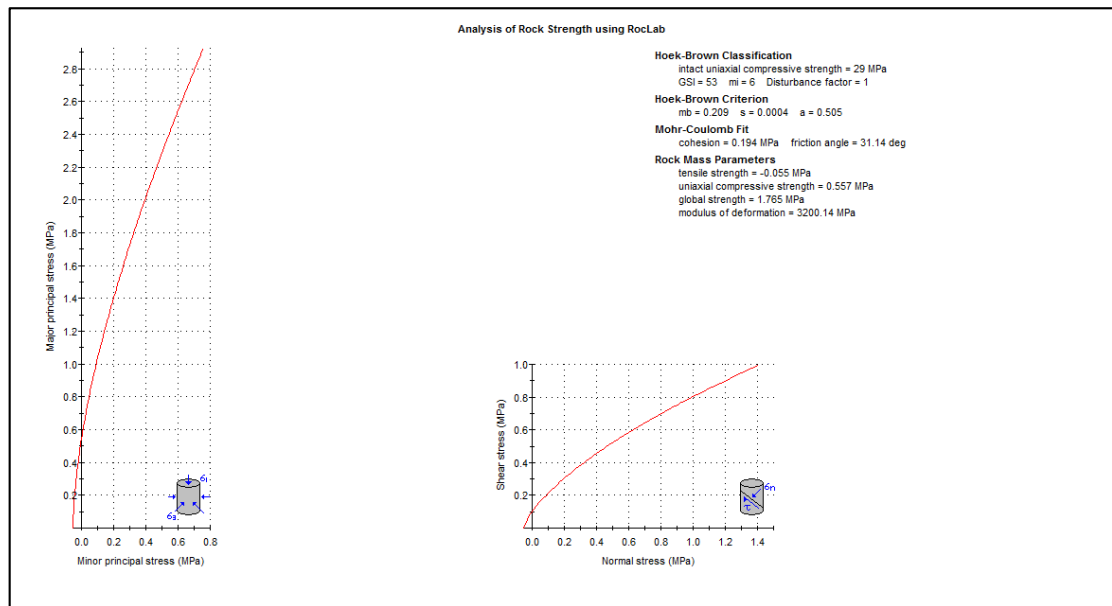
Por último, se ajustó el análisis incluyendo el peso unitario, la altura y el tipo de análisis en Taludes.

Figura 41. Análisis de la información.



Fuente: RocLab.

Figura 42. Detalle parámetros geotécnicos del macizo rocoso zona 2 con Software RocLab.



Fuente: RocLab.

De acuerdo al Software de RocLab y la inclusión de los parámetros obtenidos de los ensayos de campo y sus características generales, obtuvimos los valores de Cohesión de 0.194 Mpa y un Angulo de Fricción 31.14°.

b. Según la tabla de Clasificación de BIENIAWSKI.

Tabla 71. Clasificación de BIENIAWSKI.

Pámetros de clasificación	Clasificación	Puntuación
1 Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)		
Ensayo de carga puntual	No aplica	0
Compresión simple	50-25	4
2 Índice RQD de la roca		
RQD (%)	75-90	17
3 Separación entre diaclasas		
Separación entre diaclasas (m)	0,06-0,2	8
4 Estado de las discontinuidades		
Longitud de la discontinuidad (m)	< 1	6
Abertura (mm)	0,1- 1,0	3
Rugosidad	Ondulada	1
Relleno	Relleno blando, < 5 mm	2
Alteraciones	Muy alterada	1
5 Agua freática		
Caudal por 10 m de tunel	No aplica	0
Presión agua/Tensión principal mayor	No aplica	0
Estado general	Seco	15
Corrección por discontinuidades		
Túneles	No aplica	0
Cimentaciones	No aplica	0
Taludes	Medias	-25
Puntuación		32

CLASIFICACIÓN RMR				
Calidad	Clase	Tiempo/Longitud de sostenimiento	Cohesión [Kg/cm ²]	Angulo de rozamiento [°]
Mala	IV	10 horas con 2,5 m de vano	1-2	15-25

Fuente: Hoja de cálculo internet.

c. Según propuesta de AYDAN ET AL (1997) (φ_m)

$$\varphi = 5 + \frac{RMR}{2} (^{\circ}) = 5 + \left(\frac{32}{2}\right) = \varphi_m = 21^{\circ}$$

$$C_m = 5 * RMR (KPa) = 5 * 32 = 160 KPa$$

$$\varphi_m = 20 * (\sigma_{cm}^{0.25})$$

$$21 = 20 * (\sigma_{cm}^{0.25})$$

$$\sigma_{cm} = \sqrt[0.25]{\frac{21}{20}}$$

$$\sigma_{cm} = 1,21 \text{ MPa}$$

d. Según AYDAN & KAMAMOTO (2001).

$$C_m = \left(\frac{\sigma_{cm}}{2}\right) * \left(\frac{1 - \text{sen}(\varphi_m)}{\cos(\varphi_m)}\right)$$

$$C_m = \left(\frac{1.21}{2}\right) * \left(\frac{1 - \text{sen } 21}{\cos 21}\right)$$

$$C_m = 0,41 \text{ MPa}$$

8.3 RESUMEN DE LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL MACIZO ROCOSO EN LAS ZONAS 1, 2 Y 3.

De acuerdo al trabajo en campo y los resultados obtenidos por medio de los diferentes tipos de clasificaciones, obtuvimos los siguientes resultados según el comportamiento geomecánico de los macizos Rocosos.

Zona 1 y 3.

- 1. MÉTODO DE BIENIAWSKI 1976:** Macizo rocoso medio.
- 2. MÉTODO DE BIENIAWSKI 1989:** Macizo rocoso medio (regular).
- 3. MÉTODO DE BIENIAWSKI GEOCONTROL 2014:** Macizo rocoso bueno.
- 4. MÉTODO DE BARTON:** Macizo rocoso medio.
- 5. MÉTODO PALMSTROM 1996:** Macizo rocoso muy alto.
- 6. MÉTODO RAMAMURTHY 2004:** BBW2 areniscas calcáreas.
- 7. MÉTODO GOEL ET AL 1996:** Macizo rocoso medio.
- 8. D. SALCEDO:** IIA

Zona 2.

- 1. MÉTODO DE BIENIAWSKI 1976:** Macizo rocoso malo.
- 2. MÉTODO DE BIENIAWSKI 1989:** Macizo rocoso malo.

3. **MÉTODO DE BIENIAWSKI GEOCONTROL 2014:** Macizo rocoso medio.

4. **MÉTODO DE BARTON:** Macizo rocoso malo.

5. **MÉTODO PALMSTROM 1996:** Macizo rocoso alto.

6. **MÉTODO RAMAMURTHY 2004:** DAW2 shales.

7. **MÉTODO GOEL ET AL 1996:** Macizo rocoso malo.

8. **D. SALCEDO:** IIA.

8.4 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL, MÓDULO DE ELASTICIDAD, ÁNGULO DE FRICCIÓN Y COHESIÓN DE LA MASA ROCOSA EN LAS ZONAS 1, 2 Y 3.

Zona 1 y 3.

Tabla 72. Resumen resistencia a la compresión uniaxial y módulo de elasticidad zona 1 y 3.

Autor	Resistencia compresión uniaxial (Mpa)	Autor	Módulo de elasticidad (Gpa)
Hoek-Brown-RMR76 (1988)	9,41063546	Serafin & Pereira (1983)	9,44
Yudhbir RMR76(1983)	3,23385141	Mitri et al (1994)	30,99
Q (Barton)(2002)	30,3717246	Barton (2002)	23,36
RMi(Palmstrom)(1995)	56	Hoek et al (2002)	11,56

Autor	Resistencia compresión uniaxial (Mpa)	Autor	Módulo de elasticidad (Gpa)
Hoek-Brown-GSI (2002)	44,5787878	Chun et al (2006)	3,48
Ramamurthy 2004	25,4107882	Ramamurthy (2001)	3,41
RMS (Stille et al 1982)	2,5	Galera et al (2005)	4,29
		Mohammadi & Rahmannedjad (2010)	7,83

Fuente: Propia.

Tabla 73. Resumen ángulo de fricción y cohesión zona 1 y 3.

Autor	Angulo de fricción (°)	Cohesión (Mpa)
RocLab	58,12	1,207
Bieniawski	25-35	0,2-0,29
Aydan et al (1997)	32	0,27
Aydan & Kamamoto (2001)		1,82

Fuente: Propia.

Zona 2.

Tabla 74. Resumen resistencia a la compresión uniaxial y módulo de elasticidad zona 2.

Autor	Resistencia compresión uniaxial (Mpa)	Autor	Módulo de elasticidad (Gpa)
Hoek-Brown-RMR76 (1988)	0,66333048	Serafin & Pereira (1983)	3,55
Yudhbir RMR76(1983)	0,15966073	Mitri et al (1994)	4,18
Q (Barton)(2002)	8,673482	Barton (2002)	8,67
RMi(Palmstrom)(1995)	3,48	Hoek et al (2002)	6,22
Hoek-Brown-GSI (2002)	4,167905	Chun et al (2006)	1,52

Autor	Resistencia compresión uniaxial (Mpa)	Autor	Módulo de elasticidad (Gpa)
Ramamurthy 2004	2,333329	Ramamurthy (2001)	0,36
RMS (Stille et al 1982)	2,5	Galera et al (2005)	2,8
		Mohammadi & Rahmannedjad (2010)	3,58

Fuente: Propia.

Tabla 75. Resumen ángulo de fricción y cohesión zona 2.

Autor	Angulo de fricción (°)	Cohesión (Mpa)
RocLab	31,14	0,194
Bieniawski	15-25	0,098-0,196
Aydan et al (1997)	21	0,16
Aydan & Kamamoto (2001)		0,41

Fuente: Propia.

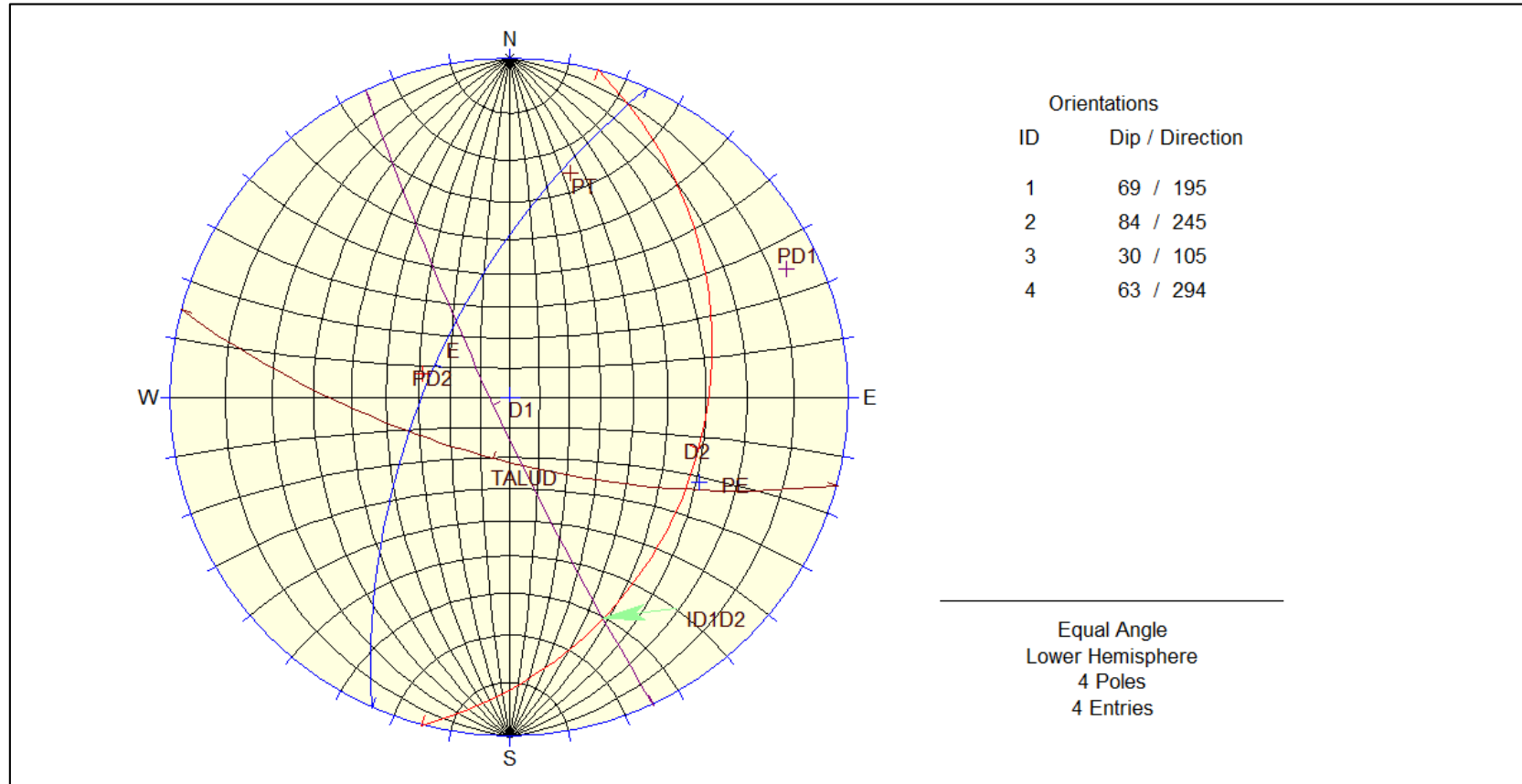
9. CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR MEDIO DE PROYECCIONES HEMISFÉRICAS.

Para la determinación de la estabilidad del talud rocoso se utilizó la red de Wulff donde se incorporaron los planos de las discontinuidades principales y posteriormente la ubicación de los polos respectivos, como se puede observar en la figura 43, la intersección entre el plano del talud, la diaclasa 1 y la diaclasa 2 forman una falla en cuña, siendo la de mayor importancia en el talud debido a que presenta menor inclinación que el mismo, por lo tanto en la flecha verde se ubica la intersección de los 2 planos de discontinuidades que intervienen en esta falla.

En la figura 44 se observa el procesamiento realizado a los datos estructurales introducidos anteriormente, incorporando la fricción a las diaclasas 1 y 2, sobre los polos de estas discontinuidades, y posteriormente trazando los planos correspondientes sobre los círculos de fricción (líneas verdes) y la línea que conecta la intersección ID1D2 con el centro de masa del sistema ubicado en la coordenada 0,0 (línea) amarilla.

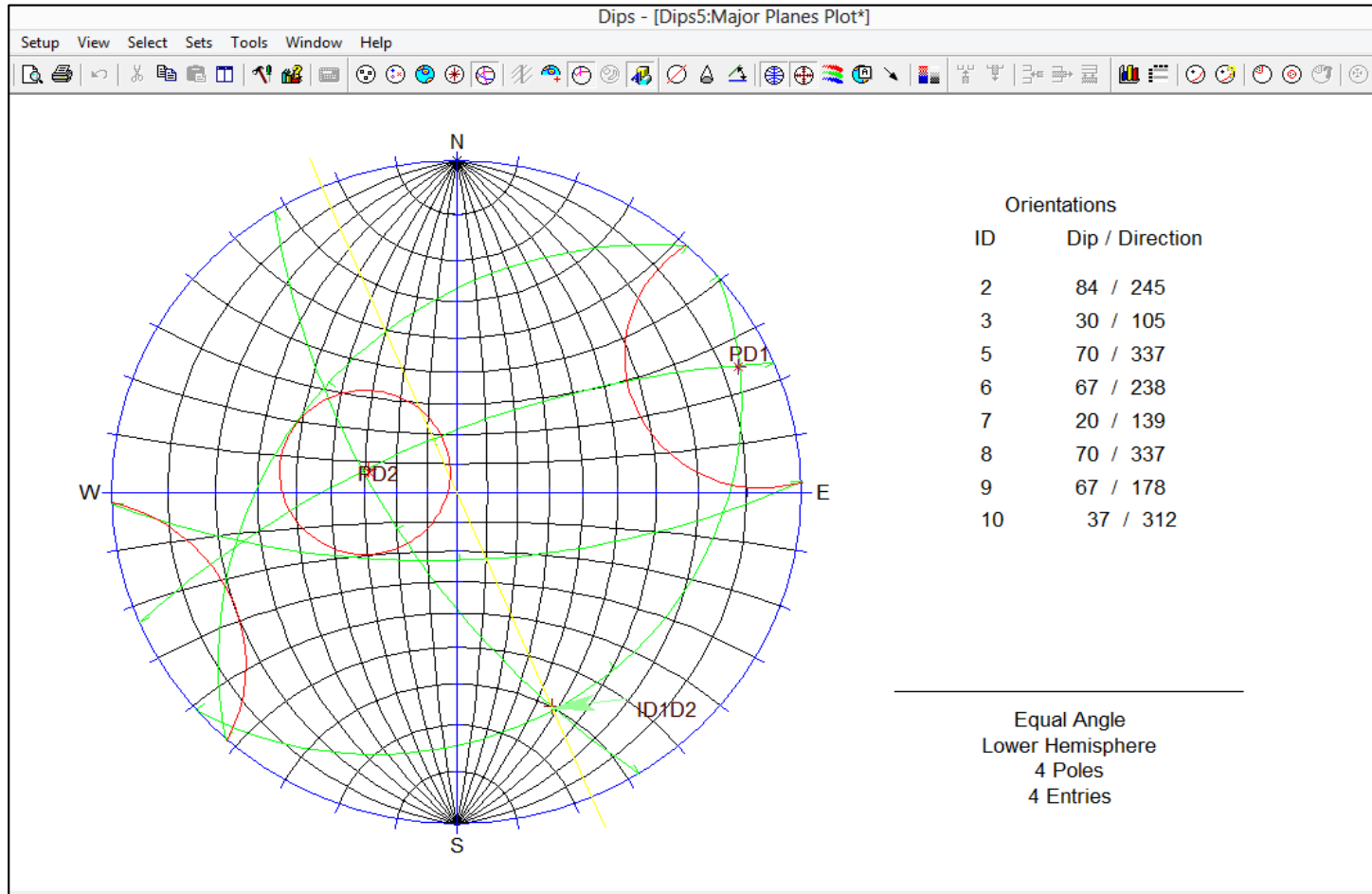
Adicionalmente se estimó el ángulo requerido para la estabilidad del talud y el ángulo disponible producto de la fricción de las diaclasas, para el cálculo del factor de seguridad como se muestra en la figura 45.

Figura 43. Incorporación de los datos estructurales en el análisis cinemático.



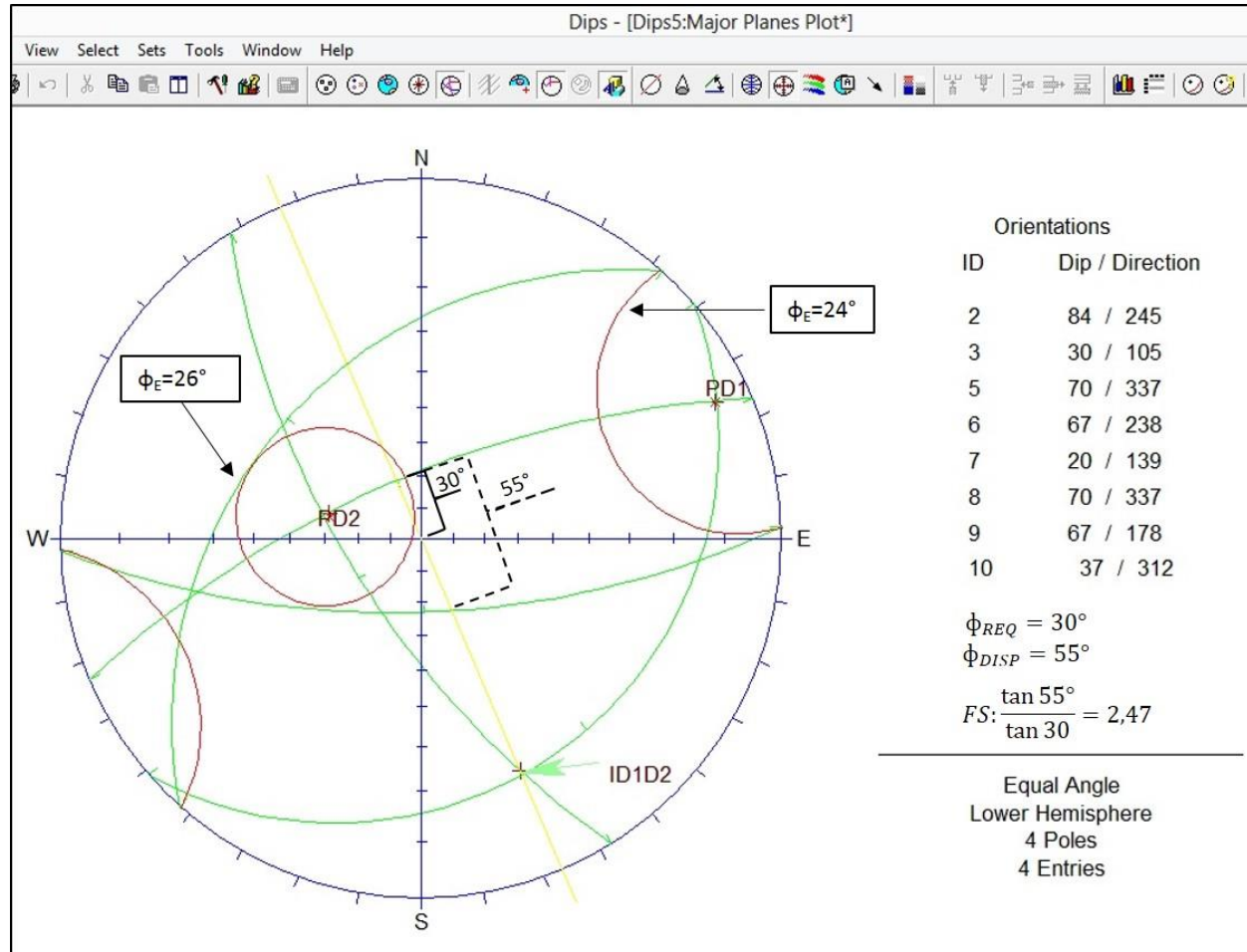
Fuente: Software DIPS

Figura 44. Procesamiento de los datos estructurales en el análisis cinemático.



Fuente: Software DIPS

Figura 45. Cálculo del factor de seguridad por medio del análisis cinemático.



Fuente: Software DIP

De lo anterior se puede concluir que el talud es cinemáticamente inestable en la intersección de las dos diaclasas presentes en el talud, pero se observa que el factor de seguridad es mayor a 1.5 cumpliendo con la norma NSR-10 para el factor de seguridad de taludes en condición estática, por lo cual podemos inferir que el macizo es mecánicamente estable.

10. CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR MEDIO DEL SOFTWARE SWEDGE.

Para el cálculo del factor de seguridad estático por medio del modelo determinístico se utilizó el Software Swedge donde se introdujeron los datos estructurales como se observa en las figuras 46 y 47, al igual que en el análisis anterior no tuvimos en cuenta la cohesión en las discontinuidades.

Figura 46. Datos de las discontinuidades.

	Dip (deg)	Dip Direction (deg)	Cohesion (t/m2)	Friction Angle (deg)
Joint Set 1	80	245	0	24
Joint Set 2	30	105	0	26
Upper Face	63	294		
Slope Face	69	195		

Tension Crack	
<input type="checkbox"/>	Tension Crack
Dip (deg)	70
Dip Direction (deg)	165
Trace Length (m)	12

Slope Properties		
Slope Height (m)	50	
Unit Weight (t/m3)	2.6	
<input type="checkbox"/>	Bench Width (m)	23.311
<input type="checkbox"/>	Overhanging	

Safety Factor = 1.96706
Wedge Weight = 12841.3 tonnes
Sliding on Line of Intersection:
Trend = 158.474 Plunge = 18.9644

Distance in meters
Force in Tonnes (1000 kg)

Fuente: Software Swedge

Figura 47. Coeficiente sísmico inactivo.

Deterministic Input Data ? ▲ X

Geometry Forces

Water Pressure

Unit Weight (t/m³)

Type:

Seismic

Seismic Coefficient

Direction:

External Forces

Number of External Forces:

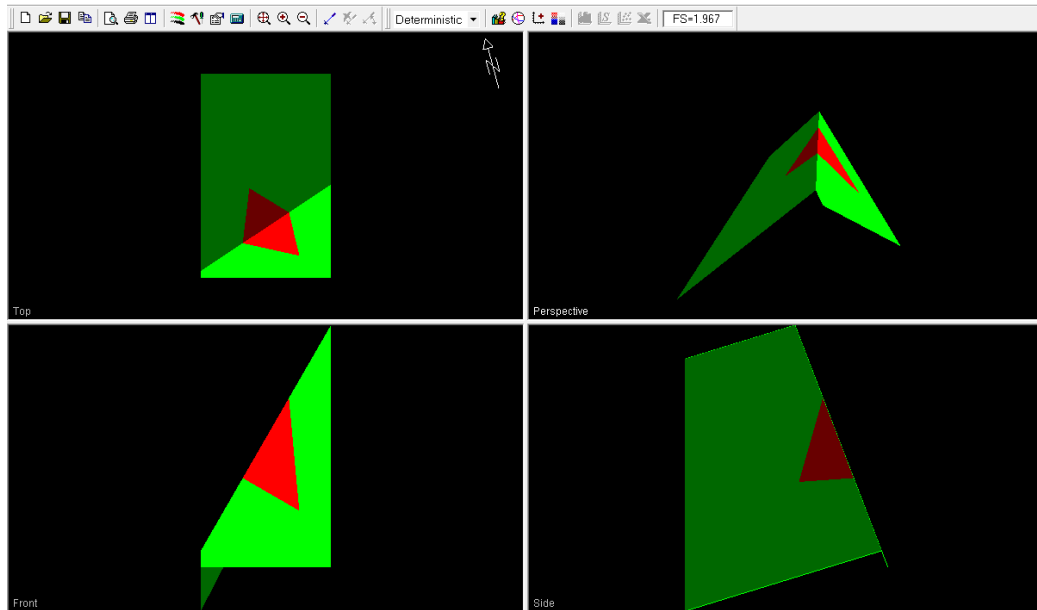
#	Trend°	Plunge°	Force (t)
---	--------	---------	-----------

Safety Factor = 1.96706
Wedge Weight = 12841.3 tonnes
Sliding on Line of Intersection:
Trend = 158.474 Plunge = 18.9644

Fuente: Software Swedge

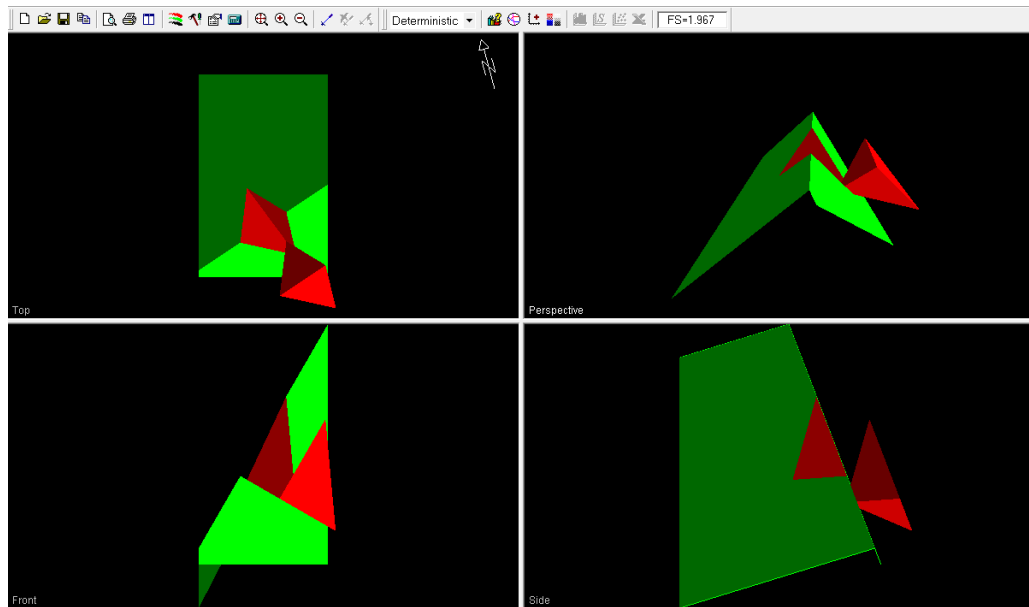
A continuación, se muestran los resultados de la modelación del macizo rocoso en condición estática, donde se obtuvo un factor de seguridad de 1,967 y el tipo de falla en cuña en el talud, como se observa en las figuras 48 y 49.

Figura 48. Factor de seguridad del talud rocoso.



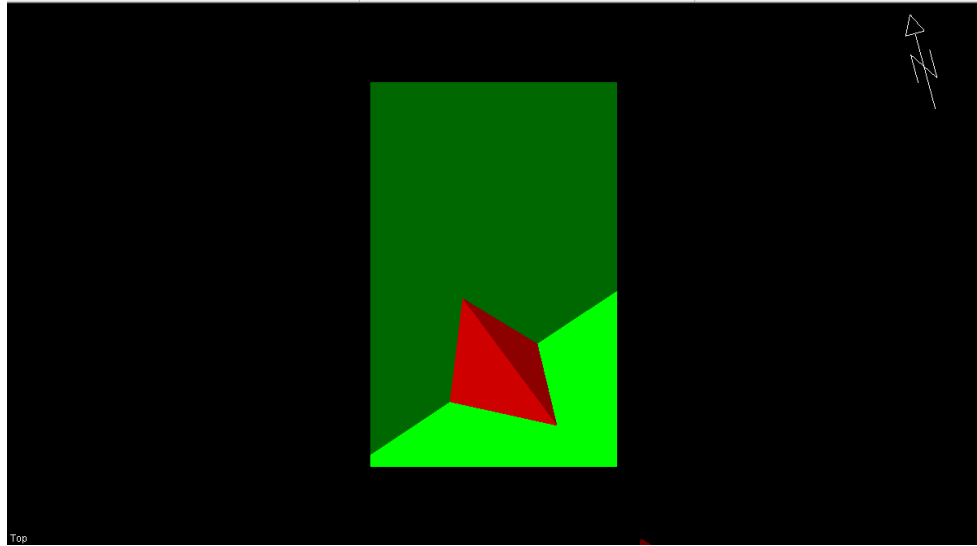
Fuente: Software Swedge

Figura 49. Análisis tridimensional del tipo de falla en el talud rocoso.



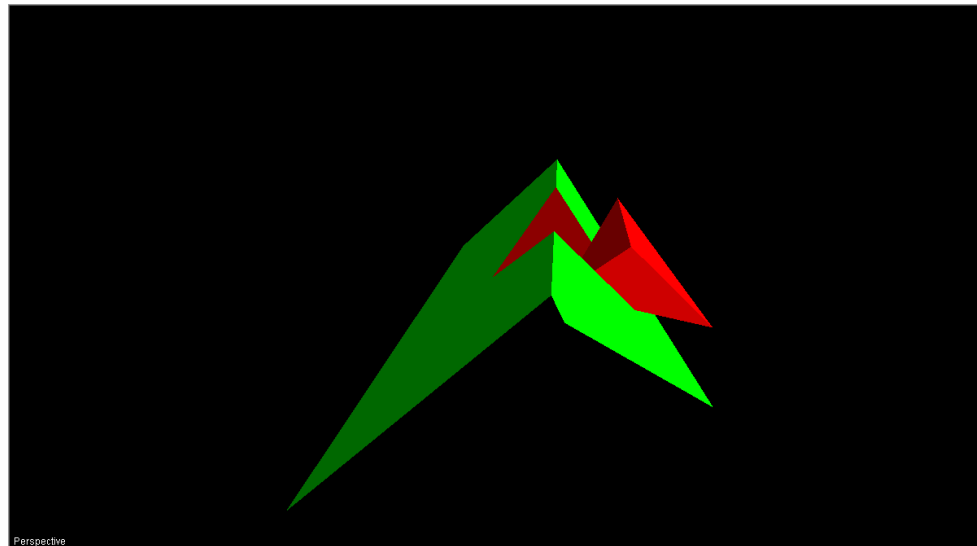
Fuente: Software Swedge

Figura 50. Vista superior de la falla en cuña del talud rocoso.



Fuente: Software Swedge

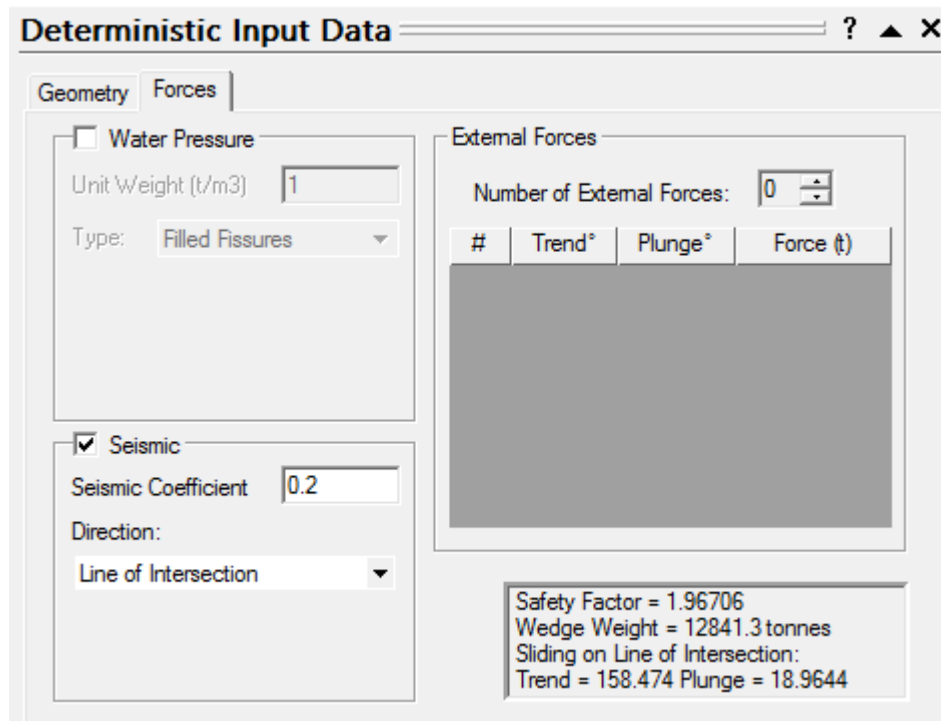
Figura 51. Vista lateral de la falla en cuña del talud rocoso.



Fuente: Software Swedge

Igualmente se realizó la modelación del talud rocoso en estado dinámico, activando el parámetro Seismic como se muestra en la figura 52, utilizamos el coeficiente sísmico de 0,2 típico para la zona de estudio.

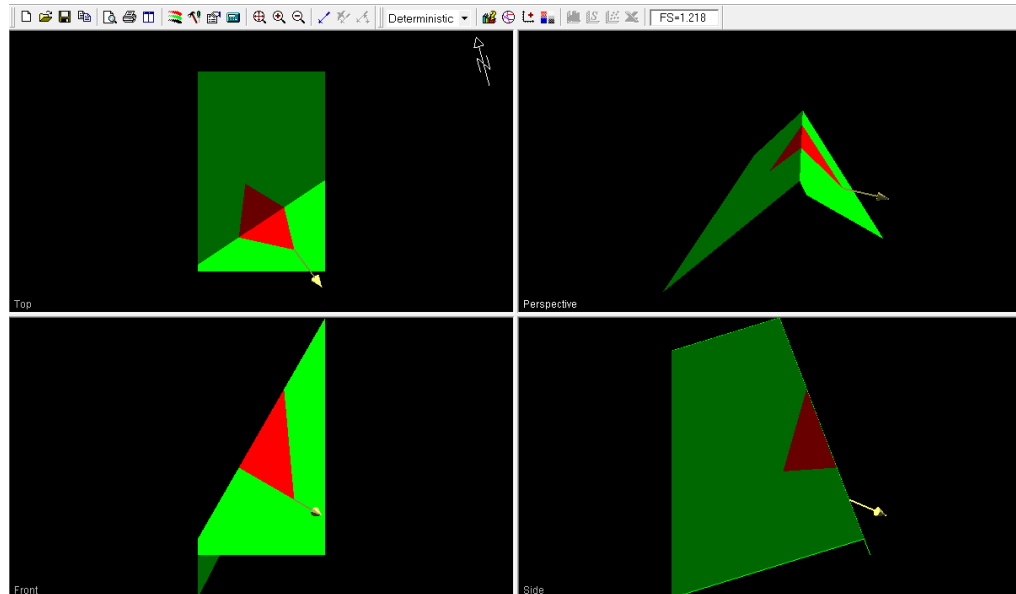
Figura 52. Coeficiente sísmico activo.



Fuente: Software Swedge

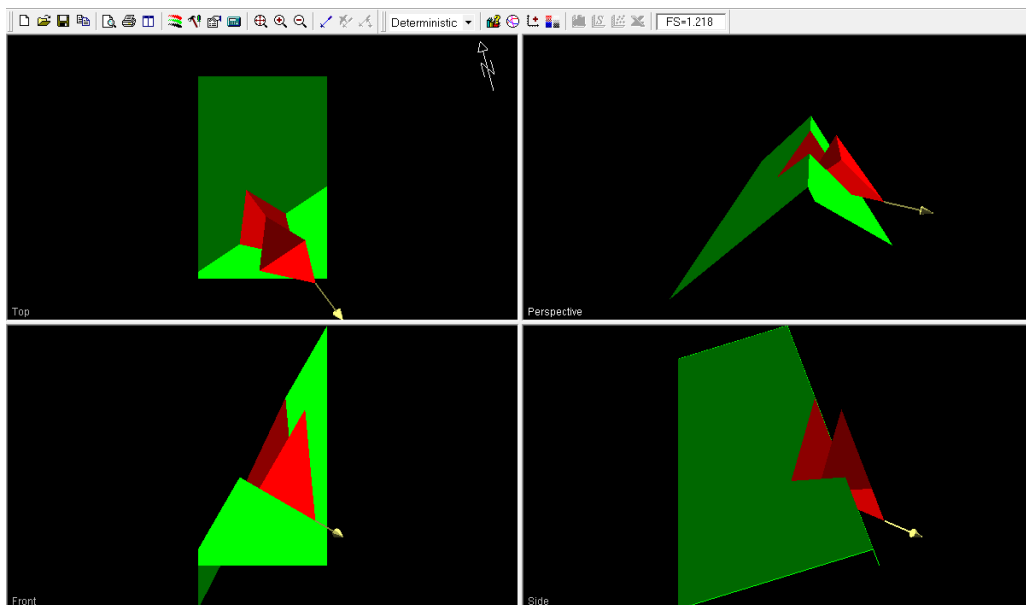
A continuación, se muestran los resultados de la modelación del macizo rocoso en condición dinámica, donde se obtuvo un factor de seguridad de 1,218 y el tipo de falla en cuña en el talud donde se incluye el vector del sismo en la dirección más perjudicial para el mismo, como se observa en las figuras 53 y 54.

Figura 53. Factor de seguridad del talud rocoso en condición dinámica.



Fuente: Software Swedge

Figura 54. Análisis tridimensional del tipo de falla en el talud rocoso en condición dinámica.



Fuente: Software Swedge

11. ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA.

La adquisición de los datos y el procesamiento de la refracción sísmica se realizaron en conjunto con la empresa INGEOEXPLORACIONES, como se muestra en las figuras 55 y 56.

Figura 55. Adquisición de datos para la refracción sísmica.



Fuente: Propia

Figura 56. Línea de tendido de la refracción sísmica.



Fuente: Propia

En las tablas 76 y 77 se presenta el resumen y los resultados obtenidos a partir del ensayo de refracción sísmica.

Tabla 76. Resumen datos de adquisición del ensayo de refracción sísmica del talud rocoso.

LOCALIZACION DE PUNTO DE TIRO			
PUNTO DE TIRO	LOCALIZACION (metros)	PROFUNDIDAD CAPA 2 (metros)	PROFUNDIDAD CAPA 3 (metros)
1	-10	0	N/A
2	-5	0	N/A
3	7.7	3.29	N/A
4	16.5	3.02	N/A
5	25.3	2.55	N/A
6	34.1	2.55	N/A
7	42.9	2.47	N/A
8	55.6	0	N/A

ENSAYO DE REFRACCION SISMICA LS 1			
Geófonos	Localizacion (metros)	Profundiad Capa 2 (metros)	Profundiad capa 3 (metros)
1	0	3.32	N/A
2	2.2	3.35	N/A
3	4.4	3.35	N/A
4	6.6	3.34	N/A
5	8.8	3.25	N/A
6	11	3.18	N/A
7	13.2	3.08	N/A
8	15.4	3.05	N/A
9	17.6	3	N/A
10	19.8	2.78	N/A
11	22	2.57	N/A
12	24.2	2.69	N/A
13	26.4	2.42	N/A
14	28.6	2.58	N/A
15	30.8	2.7	N/A
16	33	2.56	N/A
17	35.2	2.53	N/A
18	37.4	2.65	N/A
19	39.6	2.62	N/A
20	41.8	2.5	N/A

ENSAYO DE REFRACCION SISMICA LS 1			
Geófonos	Localizacion (metros)	Profundiad Capa 2 (metros)	Profundiad capa 3 (metros)
21	44	2.44	N/A
22	46.2	2.43	N/A
23	48.4	2.43	N/A
24	50.6	2.43	N/A

Fuente: Propia.

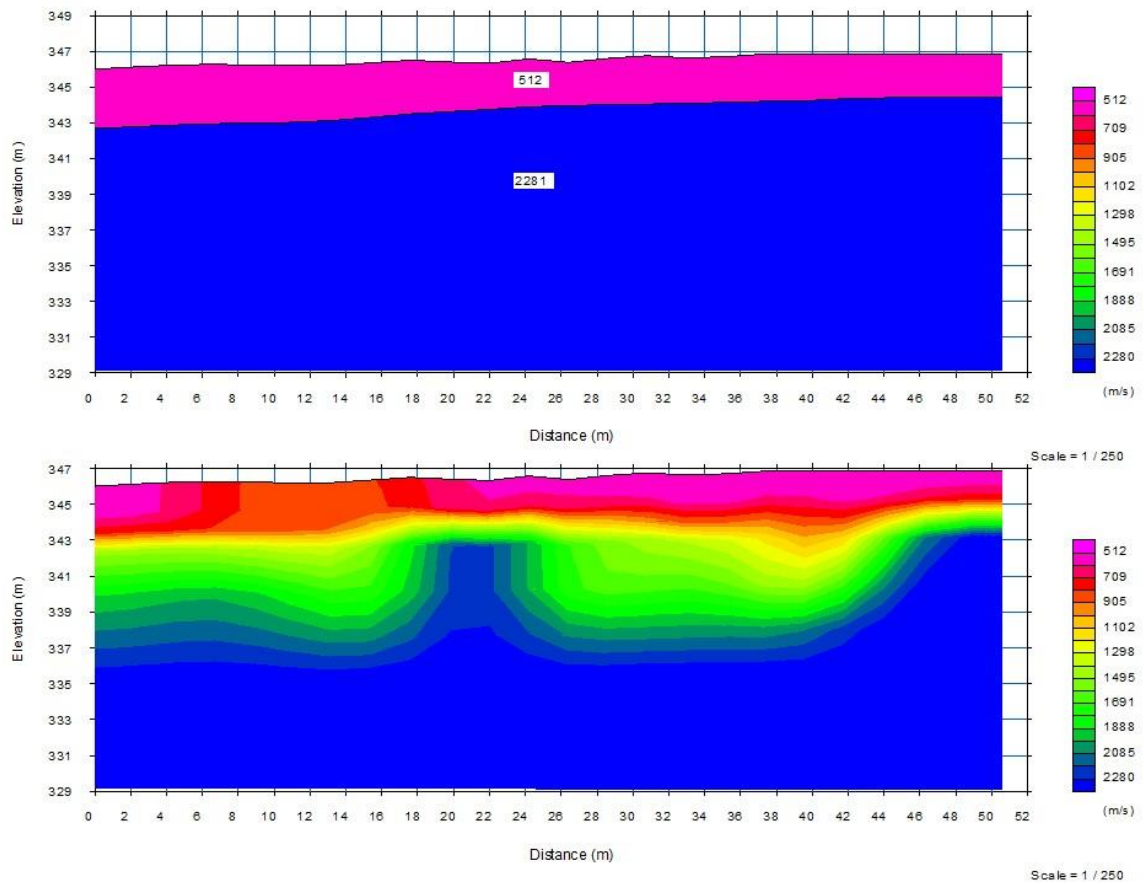
Tabla 77. Ensayo de ondas superficiales MASW 1D y correlación con parámetros geotécnicos.

TABLA DE DATOS - ENSAYO DE ONDAS SUPERCIALES MASW 1D - LS 1									
Depth (m)	S-wave velocity (m/s)	P-wave velocity (m/s)	Density (Ton/m3)	N	Relacion de Poisson ν	Módulo de Corte G (MPa)	Módulo de Elasticidad Ed (MPa)	Deformación K (MPa)	qadm (Ton/m2)
0.00	1080.71	2161.41	1.99	2158.70	0.33	2323	6194	6194	53.73
1.07	1081.15	2162.30	1.99	2161.52	0.33	2325	6200	6200	53.76
2.31	1078.92	2157.83	1.99	2147.33	0.33	2314	6171	6171	53.62
3.71	1074.46	2482.65	2.08	2119.18	0.38	2399	6645	9611	55.83
5.27	1068.54	2476.08	2.08	2082.26	0.39	2371	6570	9570	55.47
7.01	1063.49	2470.47	2.08	2051.06	0.39	2347	6507	9535	55.17
8.90	1064.40	2471.48	2.08	2056.64	0.39	2351	6518	9541	55.22
10.96	1074.18	2482.35	2.08	2117.48	0.38	2398	6642	9609	55.81
13.19	1093.39	2503.66	2.08	2240.41	0.38	2491	6887	9741	56.97
15.58	1204.39	2626.87	2.12	3048.29	0.37	3070	8394	10512	63.73
18.13	1291.17	2723.20	2.14	3804.42	0.36	3571	9676	11122	69.14
20.85	1337.00	2774.07	2.15	4251.39	0.35	3852	10390	11447	72.02
23.74	1386.96	2829.52	2.17	4778.28	0.34	4172	11197	11802	75.20
26.79	1439.40	2887.74	2.18	5377.84	0.33	4524	12076	12176	78.57
36.43	1478.35	2930.97	2.19	5855.14	0.33	4795	12750	12455	81.09

Fuente: Propia.

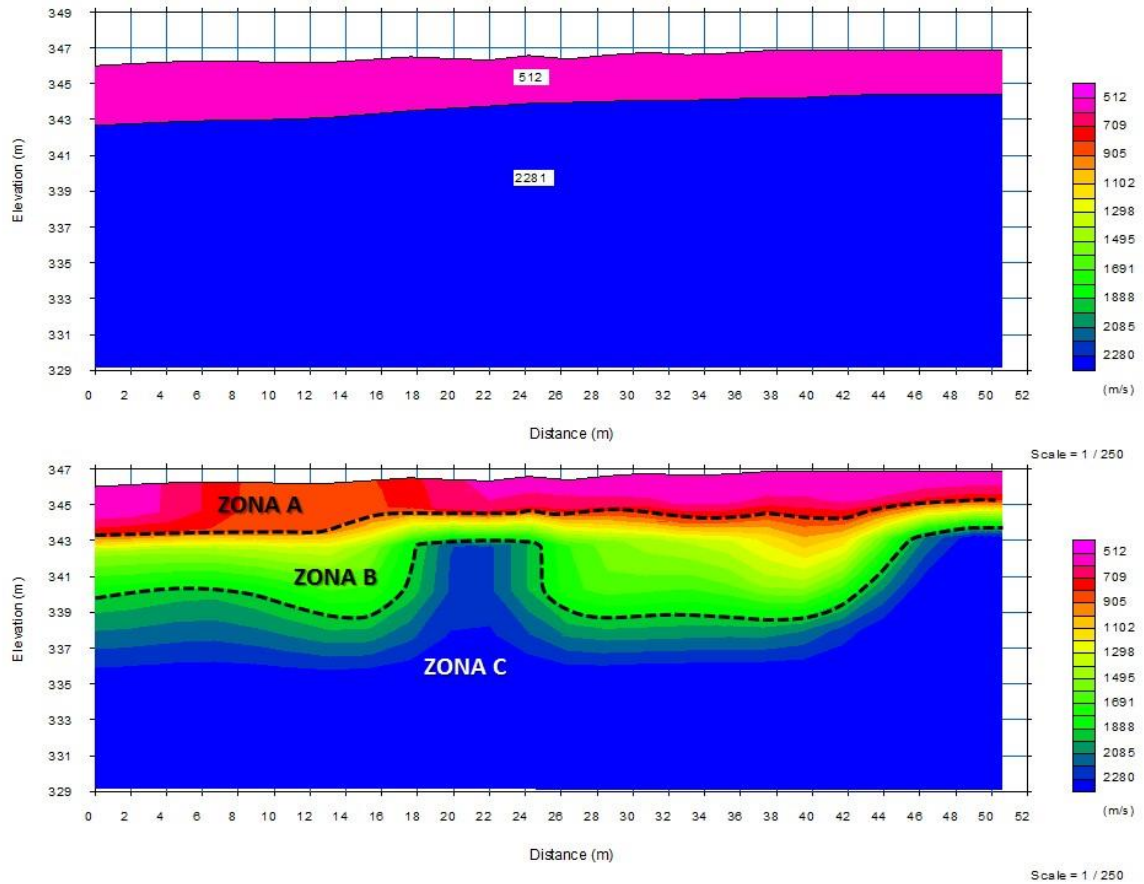
De acuerdo a la tabla de resultados promedio del ensayo de ondas superficiales MASW 1D de la línea sísmica LS1, el suelo con mayor rigidez se encuentra aproximadamente a partir de los 7.01 metros, tomando velocidades de onda de corte de 1080.71 m/s, la cual va aumentando hasta 1478.35 m/s a una profundidad de 36.43m.

Figura 57. Perfil geofísico del talud rocoso a partir de ondas compresionales.



Fuente: Propia

Figura 58. Interpretación del perfil geofísico del talud.

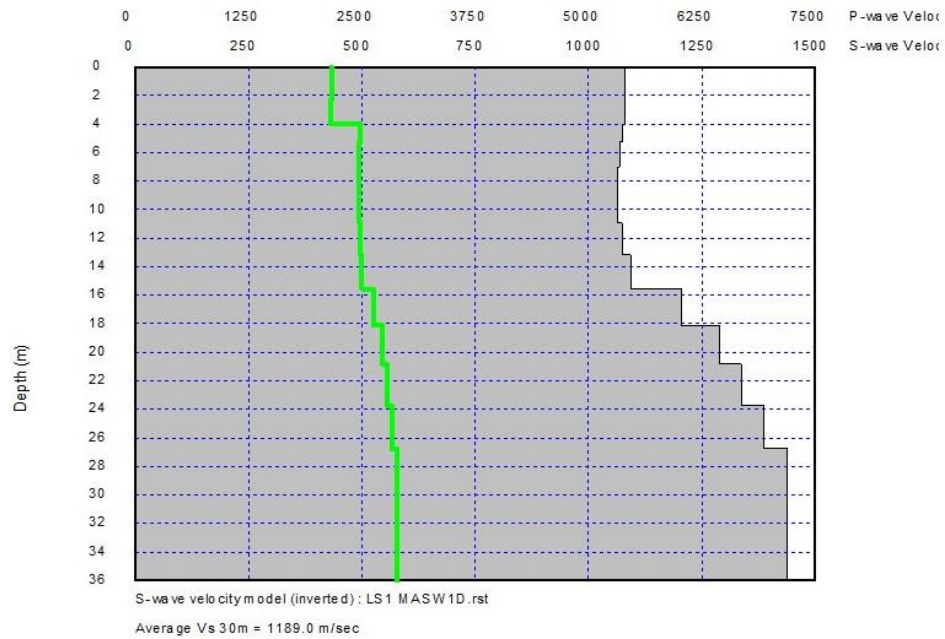


Fuente: Propia

En las figuras 57 Y 58 se puede observar el comportamiento del macizo rocoso en profundidad, diferenciándose claramente 3 zonas, donde la zona A pertenece al talud en estudio, el cual se encuentra moderadamente meteorizado y diaclasado, posteriormente se encuentra la zona B la cual es una zona de transición hasta llegar al macizo rocoso sano el cual corresponde a la zona C.

Adicionalmente en la mitad del perfil en la transición entre la zona B y zona C se observa un resalto marcado, lo cual nos indica que a pesar de que se trate de un macizo rocoso también se presenta meteorización diferencial en estos materiales y que su comportamiento no es homogéneo, debido a la intercalación de materiales rocosos de diferente composición.

Figura 59. Perfil sísmico ondas p y ondas s.



Fuente: Propia

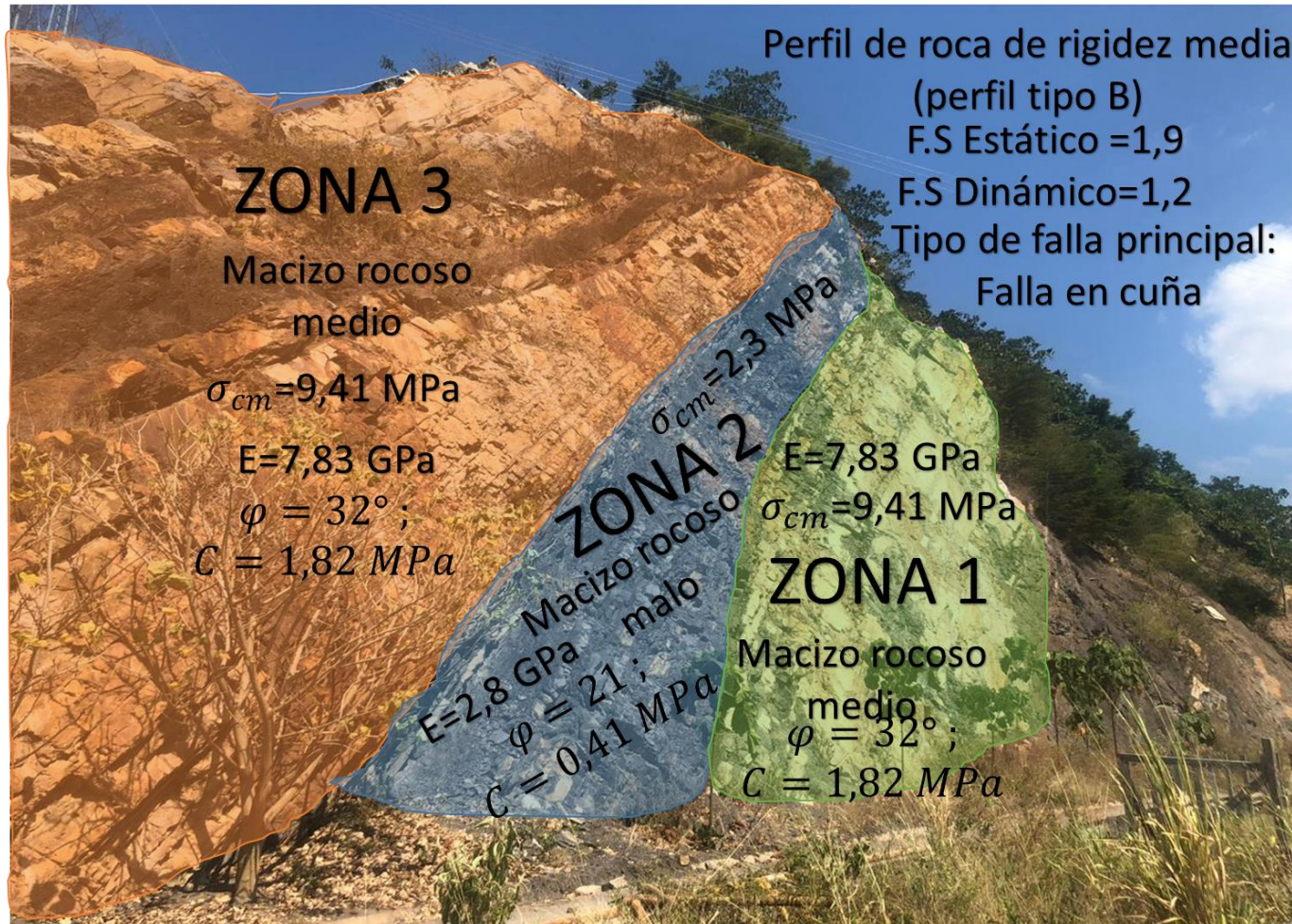
La velocidad de onda de corte (V_{s30}) promedio para el perfil sísmico es de 1189.0 m/s, y según la clasificación de los perfiles de suelos de la tabla A.2.4-1 de la Norma Sismo-Resistente Colombiana NSR10 se clasifica este tipo de suelo como PERFIL DE ROCA DE RIGIDEZ MEDIA (perfil tipo B).

12. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El talud rocoso analizado durante el documento fue dividido en 3 zonas, debido a que aproximadamente en la mitad de este se encontró una intercalación de materiales típico de la formación Tablazo, con el fin de caracterizar geomecánicamente los materiales de cada uno de los macizos rocosos como se observa en la figura 60, donde se presenta el modelo geotécnico producto de los estudios realizados sobre el talud, en este fueron incluidos los parámetros de ángulo de fricción, cohesión, módulo de elasticidad, resistencia a la compresión uniaxial y la clasificación respectiva de los macizos rocosos, estos parámetros fueron obtenidos a partir de las clasificaciones geotécnicas, los datos escogidos para el modelo podrían variar según la experiencia del investigador a la hora de la elección de que autor tomar para cada uno de los parámetros, en nuestro caso se compararon los datos de los diferentes autores con los datos arrojados por la geofísica para generar coherencia en los estudios realizados.

En general el talud rocoso presenta una cinemática inestable debido a las dos diaclasas principales que forman bloques en cuña con la superficie del mismo, estas generan puntos inestables en el macizo rocoso, se recomienda utilizar redes y/o mallas sobre la superficie del talud para la retención de los desprendimientos de roca, esto debido a que la mayor parte del talud se encuentra compuesto por un macizo rocoso medio (regular) y que es mecánicamente estable según los cálculos del factor de seguridad.

Figura 60. Modelo geotécnico del talud rocoso.



Fuente: Propia

13. CONCLUSIONES

- El talud rocoso presenta un comportamiento cinemático inestable por sus discontinuidades, pero es mecánicamente estable según el factor de seguridad obtenido por medio del software Swedge cumpliendo con la norma sismo resistente colombiana del 2010.
- Se pudo observar durante la fase de exploración en campo y con los resultados obtenidos a partir de la refracción sísmica que el talud presenta meteorización diferencial debido a que la roca que compone el macizo rocoso no es completamente homogénea, presenta intercalación entre materiales competentes e incompetentes.
- La velocidad de onda de corte (V_{s30}) promedio para el perfil sísmico es de 1189.0 m/s, y según la clasificación de los perfiles de suelos de la tabla A.2.4-1 de la Norma Sismo-Resistente Colombiana NSR10 se clasifica este tipo de suelo como PERFIL DE ROCA DE RIGIDEZ MEDIA (perfil tipo B).
- Se recomienda la utilización de malla sobre la superficie del talud debido a que este en general es un macizo rocoso con comportamiento geomecánico regular, para la retención de los bloques en los puntos inestables y algún desmoronamiento de roca que se pueda presentar en la zona de comportamiento geomecánica mala donde se debe realizar el mayor énfasis.
- Es importante la realización de los estudios cinemáticos, geotécnicos y geofísicos para este tipo de taludes para lograr una mayor comprensión e interpretación de estos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Martínez y K. nieves., Apoyo técnico para la revisión excepcional de los planes de esquema de ordenamiento territorial de los municipios localizados en la zona de embalse del proyecto hidroeléctrico Sogamoso., Bucaramanga: Proyecto de grado Universidad Industrial de Santander, 2015.
- [2] Servicio geológico colombiano, Mapa Geológico Cuadrángulo H-12, Bucaramanga, 1997.
- [3] D. Salcedo, Material de Taludes en Roca Modulo de Taludes, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Maestría en Geotecnia , 2016.
- [4] L. Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño y C. Oteo, Ingeniería Geológica, Madrid: Pearson educación, 2002.
- [5] J. Suárez, Suelos Residuales en Deslizamientos, Bucaramanga, 2009.
- [6] L. Sarmiento, J. Van Wess y S. Cloetingh, «Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models.,» *Journal of South American Earth Sciences* 21., p. 383–411., 2006.
- [7] M. Cooper, F. Addison, R. Álvarez, M. G. R. Coral, A. Hayward, S. Howe, J. Martínez, J. Naar, R. Peñas, A. Pulham y A. Y Taborda, «Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia.,» *AAPG Bulletin*, vol. 79, nº 10, p. 1421–1443, 1995.

[8] L. Cetina y H. Patiño, Determinación de los tensores de esfuerzos asociados a la evolución del flanco oeste del anticlinal de los Cobardes, Santander., Bucaramanga: Tesis de pregrado. UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología, 2013.