

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE TALUDES EN ZONAS CRÍTICAS DE LA
CARRETERA SOCORRO – SAN GIL, KM 104+192 – KM 117+350. MUNICIPIO
DEL SOCORRO, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA**

**Para Optar el Título Profesional de:
INGENIERO GEÓLOGO**

Autor:

Bach. Chávez Cruzado José Gonzalo

Asesor:

M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino

Cajamarca – Perú

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** CHÁVEZ CRUZADO JOSÉ GONZALO
DNI: 70894053
Escuela Profesional: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
- Asesor:** M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino
Facultad: Ingeniería
- Grado académico o título profesional**
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
- Tipo de Investigación:**
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:**
ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE TALUDES EN ZONAS CRÍTICAS DE LA CARRETERA SOCORRO – SAN GIL, KM 104+192 – KM 117+350. MUNICIPIO DEL SOCORRO, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA
Fecha de evaluación: 28/01/2025
- Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 14%
- Código Documento:** Oide:3117: 424392824
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 28/01/2025

		Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofía FAU 20148258601 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 28/01/2025 23:52:28-0500
<hr/> FIRMA DEL ASESOR Roberto Severino Gonzales Yana	<hr/> UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI	

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : "ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE TALUDES EN ZONAS CRÍTICAS DE LA CARRETERA SOCORRO - SAN GIL, KM 104+192 - KM 117+350. MUNICIPIO DEL SOCORRO, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA"

ASESOR : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0099-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 29 de enero de 2024, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **cuatro días del mes de febrero de 2025**, siendo las nueve horas (09:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Vocal : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Secretario : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada "ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE TALUDES EN ZONAS CRÍTICAS DE LA CARRETERA SOCORRO - SAN GIL, KM 104+192 - KM 117+350. MUNICIPIO DEL SOCORRO, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA", presentado por el Bachiller en Ingeniería Geológica JOSÉ GONZALO CHÁVEZ CRUZADO asesorado por el M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 4 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 15 PTS QUINCE (En letras)

En consecuencia, se lo declara A.P.N.O.B.A.O.O. con el calificativo de QUINCE acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 10.00 a.m. horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor



EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería Geológica: JOSÉ GONZALO CHÁVEZ CRUZADO.

RUBRO	PUNTAJE
	Máximo/Calificación
2. DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	
2.1. Capacidad de síntesis	3
2.2. Dominio del tema	3
2.3. Consistencia de las alternativas presentadas	3
2.4. Precisión y seguridad en las respuestas	2
PUNTAJE TOTAL (MÁXIMO 12 PUNTOS)	11

Cajamarca, 04 de febrero de 2025

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor



EVALUACIÓN FINAL DE LA SUSTENTACIÓN DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería Geológica: JOSÉ GONZALO CHÁVEZ CRUZADO.

RUBRO	PUNTAJE
A.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PRIVADA	21
B.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	11
EVALUACIÓN FINAL	
EN NÚMEROS (A + B)	15
EN LETRAS (A + B)	QUINCE
- Excelente 20 - 19	BUENO
- Muy Bueno 18 - 17	
- Bueno 16 - 14	
- Regular 13 a 11	
- Desaprobado 10 a menos	

Cajamarca, 04 de febrero de 2025

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Crispin Zenón Quispe Mamani.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A mi alma mater, la Universidad Nacional de Cajamarca, con énfasis especial a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica por contribuir en mi desarrollo como persona y como profesional.

Debo extender un sincero agradecimiento a mi asesor M. Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana por la paciencia, asistencia y orientación constante en el desarrollo de la investigación.

Además, debo mencionar mi agradecimiento infinito a la empresa GEOTECK SM por brindarme sus instalaciones y todas las facilidades para poder desarrollar esta investigación.

DEDICATORIA

La culminación de esta investigación hace parte de un gran logro y un paso más en la vida; la cual no hubiese sido posible sin la colaboración desinteresada de todos los que me acompañaron en este proceso; por ello dedico esta investigación a mis familiares y amigos, en particular a mis padres, Felicita y Santos, por el tesón, resiliencia y valores inculcados en mí.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE FOTOS.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	3
2.1.2 Antecedentes Nacionales	3
2.1.3 Antecedentes Locales.....	4
2.2 BASES TEÓRICAS	4
2.2.1 Clasificación de los macizos rocosos.....	4
2.2.1.1 Índice de calidad de la roca (RQD: Rock Quality Designation)	4
2.2.1.2 Sistema de valoración del macizo rocoso (RMR ₈₉ : Rock Mass Rating) .	5
2.2.1.3 Índice de resistencia geológica (GSI: Geological Strength Index)	7
2.2.2 Criterios de rotura	9
2.2.2.1 Criterio generalizado de Hoek – Brown	9
2.2.2.2 Criterio de Mohr - Coulomb.....	10
2.2.3 Análisis cinemático	14
2.2.3.1 Rotura planar	14
2.2.3.2 Rotura en cuña	15
2.2.4 Análisis de taludes	20
2.2.4.1 Factor de seguridad	20
2.2.4.2 Método de equilibrio límite	20
2.2.5 Sismicidad.....	25
2.2.5.1 Zonas de amenaza sísmica	25
2.2.5.2 Efectos locales.....	29
2.2.5.3 Coeficiente de importancia.....	31
2.2.5.4 Sismo de diseño	31
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	32

CAPÍTULO III		
MATERIALES Y MÉTODOS.....		33
3.1	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	33
3.1.1	Geográfica	33
3.1.2	Política	33
3.2	ACCESIBILIDAD	33
3.3	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	34
3.3.1	Tipo, nivel, diseño y método de la investigación	34
3.3.2	Población de estudio.....	34
3.3.3	Muestra.....	34
3.3.4	Unidad de análisis.....	34
3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	34
3.4.1	Técnicas.....	34
3.4.2	Instrumentos y equipos	35
3.5	PROCEDIMIENTO.....	35
3.5.1	Etapla preliminar de gabinete (Pre campo).....	35
3.5.2	Etapla de campo (In situ)	35
3.5.3	Etapla final de gabinete (Post campo)	35
3.6	GEOMORFOLOGÍA	36
3.6.1	Geoformas de origen denudacional	36
3.6.1.1	Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco)	36
3.6.1.2	Ladera ondulada (Dlo)	37
3.6.2	Geoformas de origen estructural.....	38
3.6.2.1	Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc).....	38
3.6.2.2	Ladera estructural de cuesta (Scle)	38
3.6.3	Geoformas de origen antropogénico.....	39
3.7	GEOLOGÍA LOCAL	40
3.7.1	Formación Rosablanca (Kir)	40
3.7.2	Formación Paja (Kip)	40
3.7.3	Formación Tablazo (Kit).....	41
3.7.4	Cuaternario de Derrubio (Qd)	42
3.8	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	43
3.8.1	Anticlinal.....	43
3.8.2	Monoclinal.....	43
3.8.3	Falla normal	44
3.9	ANÁLISIS GEOTÉCNICO	45
3.9.1	Estación de Talud Crítico 01 (ESTC-01).....	47
3.9.2	Estación de Talud Crítico 02 (ESTC-02).....	62
3.9.3	Estación de Talud Crítico 03 (ESTC-03).....	78
3.9.4	Estación de Talud Crítico 04 (ESTC-04).....	94
3.9.5	Estación de Talud Crítico 05 (ESTC-05).....	107
3.9.6	Estación de Talud Crítico 06 (ESTC-06).....	120

	Pág.
CAPÍTULO IV	
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	133
4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	133
4.1.1 Análisis geológico	133
4.1.2 Análisis geomecánico	134
4.1.3 Análisis estereográfico – cinemático.....	137
4.1.4 Análisis de estabilidad	138
4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	144
 CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	145
 5.1 CONCLUSIONES.....	145
5.2 RECOMENDACIONES.....	146
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	147
ANEXOS.....	149

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Índice de la calidad de la roca.	5
Tabla 2. Calidad del macizo rocoso en función del RMR_{89}	5
Tabla 3. Parámetros de la clasificación geomecánica RMR_{89}	6
Tabla 4. Valor del GSI.	8
Tabla 5. Guías para estimar el factor de perturbación D.	13
Tabla 6. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.	24
Tabla 7. Nivel de amenaza sísmica según valores de A_a y de A_v	25
Tabla 8. Clasificación de los perfiles de suelo.	29
Tabla 9. Valores del coeficiente F_a , para la zona de periodos cortos del espectro.	30
Tabla 10. Valores del coeficiente de importancia (I).	31
Tabla 11. Valores de K_{ST}/a_{max} mínimos para análisis seudoestáticos de taludes.	31
Tabla 12. Coordenadas del tramo de investigación.	33
Tabla 13. Ruta de acceso al área de investigación.	33
Tabla 14. Valores de A_a para el Socorro.	46
Tabla 15. Valor del coeficiente F_a	46
Tabla 16. Datos del talud y macizo rocoso en la ESTC-01.	47
Tabla 17. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-01.	48
Tabla 18. Cálculo del RQD para la ESTC-01.	49
Tabla 19. Cálculo del RMR_{89} para las lodolitas en la ESTC-01.	49
Tabla 20. Cálculo del RMR_{89} para las calizas en la ESTC-01.	50
Tabla 21. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.	50
Tabla 22. Datos del talud y macizo rocoso en la ESTC-02.	62
Tabla 23. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-02.	63
Tabla 24. Cálculo del RQD para la ESTC-02.	64
Tabla 25. Cálculo del RMR_{89} para las lodolitas en la ESTC-02.	64
Tabla 26. Cálculo del RMR_{89} para las areniscas calcáreas en la ESTC-02.	65
Tabla 27. Cálculo del RMR_{89} para las calizas margosas en la ESTC-02.	65
Tabla 28. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.	66
Tabla 29. Ubicación y datos del macizo rocoso en la ESTC-03.	78
Tabla 30. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-03.	79
Tabla 31. Cálculo del RQD para la ESTC-03.	80
Tabla 32. Cálculo del RMR_{89} para las calizas margosas en la ESTC-03.	80

	Pág.
Tabla 33. Cálculo del RMR_{89} para las lodolitas en la ESTC-03.....	81
Tabla 34. Cálculo del RMR_{89} para las areniscas calcáreas en la ESTC-03.	81
Tabla 35. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.	82
Tabla 36. Datos del talud y macizo rocoso en la ESTC-04.	94
Tabla 37. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-04.	95
Tabla 38. Cálculo del RQD para la ESTC-04.....	96
Tabla 39. Cálculo de RMR_{89} para la ESTC-04.....	96
Tabla 40. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.	97
Tabla 41. Datos del talud y macizo rocoso en la ESTC-05.	107
Tabla 42. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-05.	108
Tabla 43. Cálculo del RQD para la ESTC-05.....	109
Tabla 44. Cálculo de RMR_{89} para la ESTC-05.....	109
Tabla 45. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.	110
Tabla 46. Datos del talud y macizo rocoso en la ESTC-06.	120
Tabla 47. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-06.	121
Tabla 48. Cálculo del RQD para la ESTC-06.....	122
Tabla 49. Cálculo de RMR_{89} para la ESTC-06.....	122
Tabla 50. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.	123
Tabla 51. Unidades estratigráficas del área de investigación.	134
Tabla 52. Clasificación geomecánica de los taludes analizados.....	135
Tabla 53. Parámetros de entrada en el software RocData v.4.....	136
Tabla 54. Parámetros de salida del software RocData v.4.	136
Tabla 55. Análisis cinemático - estereográfico de los taludes.....	137
Tabla 56. Rangos de Factor de Seguridad.....	138
Tabla 57. Análisis del Factor de Seguridad en seis escenarios posibles.	139

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Relaciones entre esfuerzos principales mayores y menores para el criterio de Hoek – Brown y el equivalente de Mohr – Coulomb. (Hoek et al. 2002).	11
Figura 2. Disposición de las discontinuidades con respecto al talud para deslizamiento planar. (modificado de Hoek y Bray, 1981).....	14
Figura 3. Análisis cinemático para mecanismo de rotura tipo planar. a) Modelo del mecanismo planar. b) Representación estereográfica. (Armas, 2004).	15
Figura 4. Orientación de las familias de discontinuidades respecto al talud para roturas en cuña. (modificado de Hoek y Bray, 1981).	16
Figura 5. Análisis cinemático para mecanismo de rotura en cuña. a) Modelo del mecanismo de rotura en cuña. b) Representación estereográfica. (Armas, 2004).....	17
Figura 6. Criterio para saber si la cuña desliza a través de ambos planos de discontinuidad o a través de uno solo. (Ramírez y Alejano, 2004).	19
Figura 7. Criterio de análisis de cuña directa e inversa. (Ramírez y Alejano, 2004).	19
Figura 8. División en rebanadas verticales de una masa deslizante de una rotura circular. (Modificado de Ramírez y Alejano, 2004).	21
Figura 9. Esquema de fuerzas y aspectos geométricos en una rebanada. (Ramírez y Alejano, 2004).	22
Figura 10. Zonas de amenazas sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de A_a y A_v . (NSR-10).	26
Figura 11. Mapa de valores de A_a . (NSR-10).....	27
Figura 12. Mapa de valores de A_v . (NSR-10).....	28
Figura 13. Análisis de las propiedades geomecánicas de las lodolitas en la ESTC-01.	51
Figura 14. Análisis de las propiedades geomecánicas de las calizas en la ESTC-01.	52
Figura 15. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-01.	54
Figura 16. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-01.	55
Figura 17. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-01.	56
Figura 18. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-01.	57
Figura 19. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-01.....	58
Figura 20. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en la ESTC-01.	59
Figura 21. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-01.	60

	Pág.
Figura 22. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-01.	61
Figura 23. Análisis de las propiedades geomecánicas de las lodolitas en la ESTC-02.	67
Figura 24. Análisis de las propiedades geomecánicas de las areniscas en la ESTC-02.	68
Figura 25. Análisis de las propiedades geomecánicas de las calizas en la ESTC-02.	69
Figura 26. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-02.	70
Figura 27. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-02.	71
Figura 28. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-02.	72
Figura 29. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-02.	73
Figura 30. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-02.	74
Figura 31. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en la ESTC-02.	75
Figura 32. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-02.	76
Figura 33. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-02.	77
Figura 34. Análisis de las propiedades geomecánicas de las calizas en la ESTC-03.	83
Figura 35. Análisis de las propiedades geomecánicas de las lodolitas en la ESTC-03.	84
Figura 36. Análisis de las propiedades geomecánicas de las areniscas en la ESTC-03.	85
Figura 37. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-03.	86
Figura 38. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-03.	87
Figura 39. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-03.	88
Figura 40. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-03.	89
Figura 41. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-03.	90
Figura 42. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en ESTC-03.	91
Figura 43. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-03.	92
Figura 44. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-03.	93
Figura 45. Análisis de las propiedades geomecánicas en la ESTC-04.	98
Figura 46. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-04.	99

	Pág.
Figura 47. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-04.	100
Figura 48. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-04.	101
Figura 49. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-04.	102
Figura 50. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-04.	103
Figura 51. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en la ESTC-04.	104
Figura 52. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-04.	105
Figura 53. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-04.	106
Figura 54. Análisis de las propiedades geomecánicas en la ESTC-05.	111
Figura 55. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-05.	112
Figura 56. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-05.	113
Figura 57. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-05.	114
Figura 58. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-05.	115
Figura 59. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-05.	116
Figura 60. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en la ESTC-05.	117
Figura 61. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-05.	118
Figura 62. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-05.	119
Figura 63. Análisis de las propiedades geomecánicas en la ESTC-06.	124
Figura 64. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-06.	125
Figura 65. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-06.	126
Figura 66. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-06.	127
Figura 67. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-06.	128
Figura 68. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-06.	129
Figura 69. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en la ESTC-06.	130
Figura 70. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-06.	131
Figura 71. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-06.	132
Figura 72. Gráfica estadística del análisis cinemático.	137

	Pág.
Figura 73. Gráfica estadística del Factor Seguridad en condiciones normales.	141
Figura 74. Gráfica estadística del Factor Seguridad en un escenario de saturación parcial.....	141
Figura 75. Gráfica estadística del Factor Seguridad en un escenario de saturación total.	142
Figura 76. Gráfica estadística del Factor Seguridad en un escenario de sismicidad máxima.....	142
Figura 77. Gráfica estadística del Factor Seguridad en un escenario de saturación parcial y sismicidad máxima.	143
Figura 78. Gráfica estadística del Factor Seguridad en un escenario de saturación total y sismicidad máxima.	143

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco).....	37
Foto 2. Ladera ondulada (Dlo).....	37
Foto 3. Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc).....	38
Foto 4. Ladera estructural de cuesta (Scle).....	39
Foto 5. Geoformas de origen antropogénico (Asp y Ac).....	39
Foto 6. Contacto entre la Fm. Rosablanca (Kir) y la Fm. Paja (Kip).....	40
Foto 7. Estratos de lodolitas con margas la Fm. Paja (Kip).....	41
Foto 8. Lodolitas, areniscas calcáreas y calizas de la Fm. Tablazo.....	42
Foto 9. Corte donde se evidencia el Depósito Cuaternario de Derrubio (Qd).....	42
Foto 10. Anticlinal cortado por una falla normal en estratos de la Fm. Tablazo.....	43
Foto 11. Vista de un monoclinal emplazado en la Fm. Rosablanca.....	44
Foto 12. Falla normal local emplazada sobre estratos de la Fm. Tablazo.....	44
Foto 13. Perfil de la ESTC-01 compuesto por calizas y lodolitas.....	47
Foto 14. Perfil de la ESTC-02 compuesto por calizas, lodolitas y areniscas.....	62
Foto 15. Perfil de la ESTC-03 compuesto por calizas, lodolitas y areniscas.....	78
Foto 16. Perfil de la ESTC-04 compuesto por lodolitas y margas.....	94
Foto 17. Perfil de la ESTC-05 compuesto por lodolitas y margas.....	107
Foto 18. Perfil de la ESTC-06 compuesto por areniscas calcáreas.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS

ESTC	: Estación de Talud Crítico.
Km	: Kilómetro.
GPS	: Sistema de Posicionamiento Global.
ISRM	: Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas.
RCU	: Resistencia a la Compresión Uniaxial.
RQD	: Designación de la Calidad de la Roca.
RMR₈₉	: Sistema de Valoración del Macizo Rocoso.
JCOND₈₉	: Condiciones de Superficie de las Discontinuidades.
GSI	: Índice de Resistencia Geológica.
D	: Buzamiento.
DD	: Dirección de Buzamiento.
Fm.	: Formación
F.S.	: Factor de Seguridad.
K_h	: Aceleración Máxima Horizontal.
K_v	: Aceleración Máxima Vertical.
A_a	: Aceleración horizontal pico efectiva
F_a	: Coeficiente de amplificación
K_{ST}	: Coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestático de taludes
I	: Coeficiente de importancia
ND	: Número de discontinuidades
L	: Longitud
λ	: Frecuencia de fracturas por metro lineal

MPa	: Megapascal
NO	: Noroeste
NE	: Noreste
SE	: Sureste
SO	: Suroeste
Kir	: Formación Rosablanca
Kip	: Formación Paja
Kit	: Formación Tablazo
Qd	: Cuaternario de Derrubio
Dco	: Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión
Dlo	: Ladera ondulada
Ssslc	: Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal
Scle	: Ladera estructural de cuesta
Asp	: Superficies de explanación
Ac	: Canteras
mi	: Constante del material
mb	: Valor reducido de la constante del material
D	: Factor de perturbación
MR	: Módulo de ratio
Ei	: Deformabilidad de la roca intacta
γ	: Peso específico

RESUMEN

La investigación se ubica en la carretera que conecta los municipios del Socorro y San Gil, departamento de Santander, Colombia, progresivas Km 104+192 – Km 117+350. Litológicamente, los taludes críticos se encuentran dentro de la Formación Tablazo (Kit) y la Formación Paja (Kip), que están constituidos por calizas, areniscas y lodolitas. En la investigación se realiza la evaluación geotécnica en seis taludes críticos, donde su inestabilidad es producto de la meteorización, grado de fracturamiento, propiedades físico-mecánicas de los macizos rocosos y a su vez vinculado a variables como la sismicidad y la precipitación; por la cual se realizó secciones transversales al eje de la carretera y se determinó el comportamiento geotécnico de los taludes críticos estimando parámetros geomecánicos con la aplicación de clasificaciones geomecánicas y con el apoyo del software RocData v.4 se obtuvo el ángulo de fricción y la cohesión. En el análisis cinemático se utilizó el software Dips v.7, para determinar la probabilidad de rotura (planar y cuña), obteniendo valores muy bajos; además, con el software Slide v.6 se calculó el Factor de Seguridad en los seis taludes críticos. Finalmente, la ESTC-02 tiene estabilidad relativa en un escenario posible; la ESTC-04 tiene estabilidad relativa en tres escenarios posibles; y la ESTC-05 tiene estabilidad relativa en cuatro escenarios posibles. Hay una excepción en el análisis, donde la ESTC-06 muestra una estabilidad a largo plazo, pero se considera inestable por presentar una alta probabilidad de rotura en cuña (55,43%).

Palabras clave: Talud, estabilidad geotécnica, geomecánica, cinemática, factor de seguridad.

ABSTRACT

The investigation is located on the road that connects the municipalities of Socorro and San Gil, department of Santander, Colombia, progressives Km 104 + 192 - Km 117 + 350. Lithologically, the critical slopes are located within the Tablazo Formation (Kit) and the Paja Formation (Kip), which are made up of limestone, sandstone and mudstone. In the investigation, the geotechnical evaluation is carried out on six critical slopes, where their instability is a product of weathering, degree of fracturing, physical-mechanical properties of the rock masses and in turn linked to variables such as seismicity and precipitation; for which cross sections were made to the axis of the road and the geotechnical behavior of the critical slopes was determined by estimating geomechanical parameters with the application of geomechanical classifications and with the support of the RocData v.4 software, the friction angle and cohesion were obtained. In the kinematic analysis, the Dips v.7 software was used to determine the probability of failure (planar and wedge), obtaining very low values; in addition, the Safety Factor was calculated in the six critical slopes with the Slide v.6 software. Finally, the ESTC-02 has relative stability in one possible scenario; the ESTC-04 has relative stability in three possible scenarios; and the ESTC-05 has relative stability in four possible scenarios. There is one exception in the analysis, where the ESTC-06 shows long-term stability, but is considered unstable due to a high probability of wedge failure (55.43%).

Keywords: Slope, geotechnical stability, geomechanics, kinematics, safety factor.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el diseño de taludes está dentro de un plano de importancia ingenieril de primer orden, ya que en primeras instancias no se toma en cuenta la correcta estabilidad de estos al realizar las carreteras, esto se debe en gran parte a factores económicos que dan viabilidad a los proyectos; razón por la cual, al tener la carretera ya lista y ver fenómenos de deslizamientos, es que recién se empieza a actuar para mitigar ese tipo de problemas. El área de investigación se encuentra localizado en el municipio del Socorro, departamento de Santander, Colombia y abarca el tramo km 104+192 al km 117+350 de la carretera Socorro – San Gil; donde se evidencia afloramientos rocosos de las Formaciones Paja y Tablazo. Los agentes atmosféricos como las precipitaciones, infiltración y la sismicidad, generan cambios en las propiedades de los macizos rocosos, desencadenando así la baja resistencia de las rocas y originando la inestabilidad geotécnica de los taludes.

De esta manera se formula la siguiente interrogante, ¿cuál es el comportamiento geotécnico de los taludes en zonas críticas de la carretera Socorro – San Gil, km 104+192 – km 117+350, municipio del Socorro, departamento de Santander, Colombia?; donde el propósito de la investigación es contribuir con información puntual sobre zonas críticas de inestabilidad geotécnica en un tramo de la carreta Socorro – San Gil; teniendo en cuenta variables litológicas, estructurales, morfogenéticas y geomecánicas, además de los agentes desencadenantes como la precipitación, infiltración y sismicidad. La carretera Socorro – San Gil es una vía nacional, en la cual se evidencia deslizamientos y desprendimientos, originando así un peligro constante para los usuarios de dicha vía; razón por la cual esta investigación servirá como fuente de información para identificar, controlar y evitar daños latentes. Asimismo, será una base para posteriores investigaciones y estudios de distinto ámbito.

Esta investigación tiene un alcance netamente descriptivo - analítico y con una perspectiva u óptica cuantitativa. En cuanto a la delimitación de la investigación será dividido en dos tipos, delimitación geográfica y temporal. El objetivo principal es realizar el análisis geotécnico de los taludes en zonas críticas de la carretera Socorro – San Gil, km 104+192 – km 117+350, municipio del Socorro, departamento de Santander, Colombia; teniendo además como objetivos específicos el cartografiar las unidades litomorfoestructurales, realizar la caracterización geomecánica de los taludes, interpretar y analizar los datos obtenidos en la caracterización geomecánica, calcular el factor de seguridad de los taludes y realizar la zonificación de las áreas críticas.

La investigación consta de cinco (V) capítulos, los cuales son descritos a continuación: Capítulo I, Introducción, se precisa la problemática, la formulación del problema, justificación, delimitación, limitaciones, objetivos e hipótesis de la presente investigación. Capítulo II, Marco teórico de la investigación, describe los antecedentes teóricos, bases teóricas y la definición de los términos básicos. Capítulo III, Materiales y Métodos, en esta sección se describe la ubicación geográfica y política donde se llevó acabo la presente investigación, la metodología, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, el procedimiento y el procesamiento de datos, tales como la geomorfología, geología y análisis geotécnico. Capítulo IV, Análisis y discusión de resultados, acá se describe y explica los resultados de la evaluación geotécnica en todas las estaciones de taludes críticos, también contiene la contrastación de la hipótesis. Capítulo V, Conclusiones y Recomendaciones, se precisan las conclusiones acordes a los objetivos planteados y se sugieren recomendaciones para mejorar la investigación y apoyo para futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Monte (2020), “Análisis de estabilidad de taludes de roca mediante el método de elementos finitos”. Esta investigación replica las condiciones reales de unos taludes a través de un modelo numérico, con el fin de determinar la causa del desprendimiento.

Rodríguez (2016), “Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos zona Ronquillo – Corisorgona Cajamarca – Perú”. Esta investigación analiza el comportamiento geoestructural, geomorfológico, geodinámico y geomecánico de los macizos rocosos que presentan laderas inestables.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Betancur y López (2019), “Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso en el nivel veintiuno de la mina la Maruja (distrito minero de Marmato, Caldas) para estimar las recomendaciones de estabilidad y soporte en la excavación y su correlación con las alteraciones hidrotermales”. Esta investigación correlaciona la clasificación obtenida con la interacción roca-fluido y estima que sí existe una influencia significativa en la calidad del macizo rocoso.

Arias (2021), “Análisis probabilístico de estabilidad de taludes con falla planar en la comuna universitaria, de la ciudad de Manizales, Colombia”. Esta investigación hace un análisis estadístico donde se determinó la función de la densidad y el ajuste de la función de probabilidad de las variables del modelo.

2.1.3 Antecedentes Locales

Martínez (2018), “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”. Esta investigación combina los métodos de análisis de las discontinuidades, caracterización geotécnica y modelo geofísico a partir de la refracción sísmica.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Clasificación de los macizos rocosos

La clasificación de los macizos rocosos está apoyada en ciertos factores que establecen su comportamiento geomecánico, tales como la litología y propiedades de la matriz rocosa, estructura geológica y las discontinuidades, grado de meteorización o alteración, estado de tensiones *in situ* y presencia de agua (González de Vallejo *et al.* 2002). En la clasificación geomecánica para investigar taludes se puede utilizar sistemas como RQD, RMR y GSI; los cuales utilizan valoraciones para los múltiples factores del macizo rocoso.

2.2.1.1 Índice de calidad de la roca (RQD: Rock Quality Designation)

El RQD es un método propuesto por Deere en 1967 para estimar un valor cuantitativo de la calidad del macizo rocoso a través del uso de testigos de perforación diamantina, donde considera las piezas intactas de los núcleos mayores o iguales a 10 cm en la longitud total del testigo. La relación que plantea Deere entre el índice del RQD y la calidad de la roca se muestra en la Tabla 1.

Para cuando no se tenga núcleos de perforación, Priest y Hudson (1976) hallaron una estimación aceptable del RQD que considera las posibles distribuciones de espaciamientos de discontinuidades a lo largo de una línea recta de un macizo rocoso.

El cálculo se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$RQD=100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda+1)$$

Dónde se tiene: λ = Número de discontinuidades / Longitud (m)

Tabla 1. Índice de la calidad de la roca.

RQD (%)	Calidad de la roca
< 25	Muy pobre
25 - 50	Pobre
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Fuente: Elaborado con base en U. Deere y W. Deere 1988.

2.2.1.2 Sistema de valoración del macizo rocoso (RMR₈₉: Rock Mass Rating)

Desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos: resistencia uniaxial de la roca, grado de fracturación en términos del RQD, espaciado de las discontinuidades, condiciones de las discontinuidades y condiciones hidrogeológicas (González de Vallejo *et al.* 2002).

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad RMR, que varía de 0 a 100 y esta clasificación distingue cinco clases, cuyo significado geotécnico se expresa en la Tabla 2 (González de Vallejo *et al.* 2002).

Tabla 2. Calidad del macizo rocoso en función del RMR₈₉.

CLASE	RMR	CALIDAD DE LA ROCA
I	81 - 100	Muy buena
II	61 - 80	Buena
III	41 - 60	Regular
IV	21 - 40	Mala
V	0 - 20	Muy mala

Fuente: Elaborado con base en Bieniawski 1989.

Tabla 3. Parámetros de la clasificación geomecánica RMR₈₉.

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES							
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo de Carga Puntual	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2- 4 MPa	1 - 2 MPa	<i>Compresión simple.</i>		
		Compresión simple	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
		<i>Valor</i>	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %		
		<i>Valor</i>	20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	6 - 20 cm	< 6 cm		
		<i>Valor</i>	20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		<i>Valor</i>	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		<i>Valor</i>	6	5	4	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		<i>Valor</i>	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		<i>Valor</i>	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		<i>Valor</i>	6	5	3	1	0		
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación: presión agua / σ principal	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
		<i>Valor</i>	15	10	7	4	0		

Fuente: Adaptado de Bieniawski 1989.

2.2.1.3 Índice de resistencia geológica (GSI: Geological Strength Index)

Hoek *et al.* (1994) desarrollaron el GSI, que indica el índice de calidad geomecánica para macizos rocosos y se basa en la identificación y clasificación en campo de dos características fundamentales como la macroestructura y la condición de las superficies de las discontinuidades. Es estimado a partir de inspecciones visuales del macizo rocoso expuesto en las superficies de excavaciones, tales como afloramientos, taludes y túneles (Gavilanes y Andrade 2004).

Hoek *et al.* (1994) señala que, el GSI proporciona un sistema para estimar la reducción de la resistencia del macizo rocoso para diferentes condiciones geológicas.

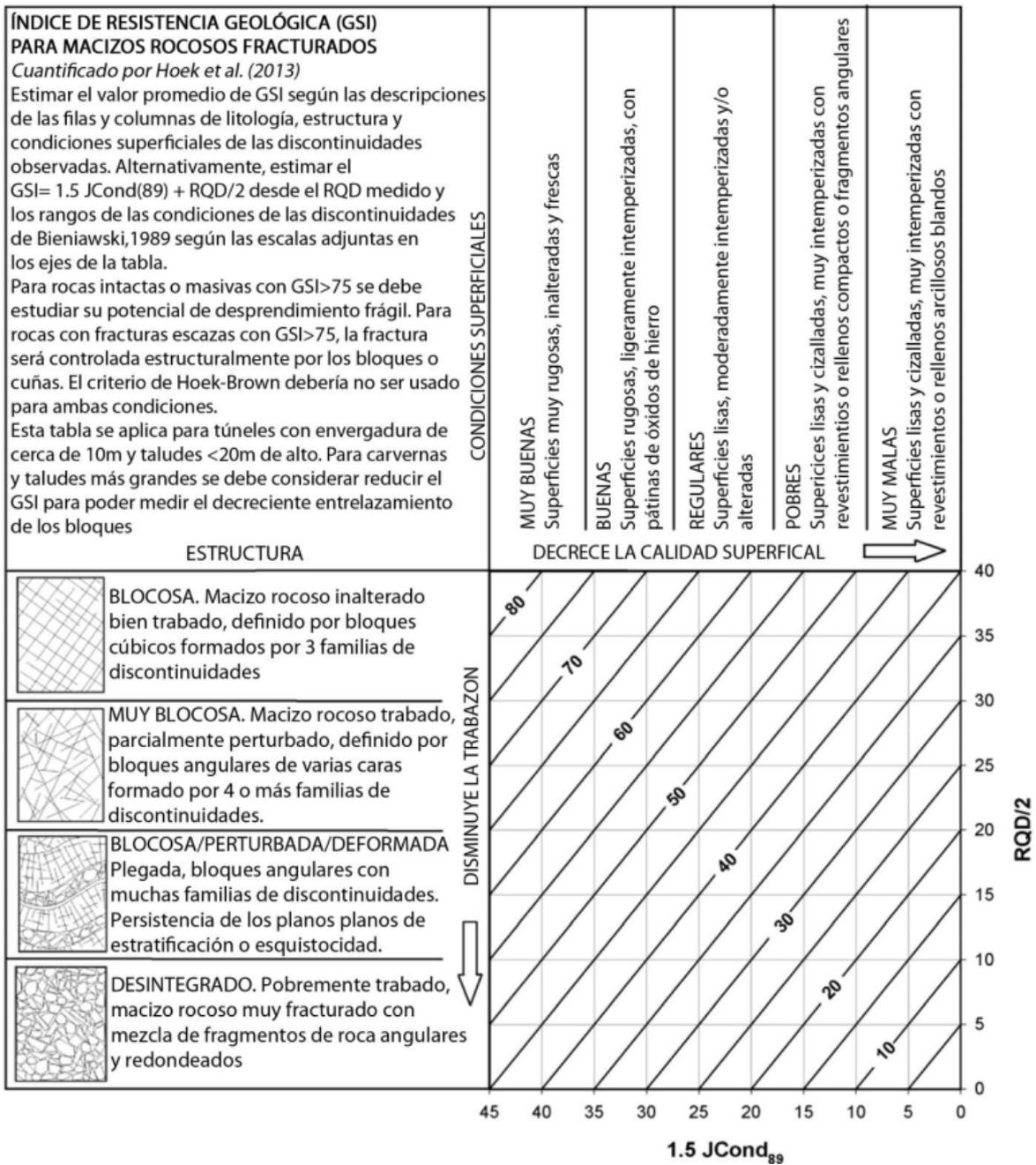
Marinos y Hoek (2000) desarrollaron un cambio en el sistema GSI con la finalidad integrar macizos rocosos de mala calidad, quedando así un sistema clasificación cualitativa del macizo rocoso. Años más tarde Hoek *et al.* (2013) presentaron una propuesta de estimación/cuantificación del GSI mediante las condiciones de las discontinuidades y el RQD.

En la Tabla 4 se muestra la escala de la estructura ingenieril está definida por las valoraciones de las condiciones de las discontinuidades (**1.5 JCond₈₉**) y la escala de los bloques de roca está definida por la designación de la calidad de la roca (**RQD/2**).

De tal manera que, el valor del GSI resulta de la suma de las dos escalas y da como resultado la siguiente relación:

$$\mathbf{GSI = 1.5 JCond_{89} + RQD/2}$$

Tabla 4. Valor del GSI.



Fuente: Elaborado con base en Hoek et al. 2013.

2.2.2 Criterios de rotura

2.2.2.1 Criterio generalizado de Hoek – Brown

El criterio generalizado de Hoek – Brown fue propuesto para la estimación de la resistencia del macizo rocoso, introducido por Hoek (1994) y Hoek *et al.* (1995), se expresa en la siguiente expresión (Hoek & Brown 2018).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde m_b , es un valor reducido de la constante del material m_i y está expresado por:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

s y a son las constantes del macizo rocoso, expresadas por las siguientes relaciones:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

donde, para roca intacta, las constantes del material se denotan por m_i , $s = 1$ y $a = 0,5$; D es un factor que depende del grado de perturbación a la que el macizo rocoso ha sido sometido por las voladuras o por la relajación de los esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos *in situ* inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados. En la Tabla 5 se dan las directrices para la selección de D .

La resistencia a la compresión uniaxial se obtiene realizando $\sigma_3 = 0$ en el criterio generalizado de Hoek – Brown, quedando de la siguiente manera:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a$$

La resistencia a la tracción se obtiene realizando $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$ en el criterio generalizado de Hoek – Brown. Esto representa una condición de tensión biaxial.

$$\sigma_t = -(s\sigma_{ci}/m_b)$$

Hoek y Diederichs (2006) utilizando una base de datos de mediciones del módulo de deformación del macizo rocoso de proyectos en China (incluido Taiwán), propusieron la siguiente ecuación para estimar el módulo del macizo rocoso, citado por Hoek & Brown (2018).

$$E_{rm}[GPa] = E_i \left\{ 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + \exp^{[(60+15D-GSI)/11]}} \right\}$$

Donde E_i es el módulo de deformación de la roca intacta (MPa).

Cuando no se tiene información sobre el módulo de deformación de la roca intacta (E_i), Hoek y Diederichs (2006) plantearon una ecuación alternativa para su cálculo, la cual se muestra a continuación.

$$E_{rm}[GPa] = 10^5 \frac{1 - D/2}{1 + \exp^{[(75+25D-GSI)/11]}}$$

2.2.2.2 Criterio de Mohr - Coulomb

Para poder utilizar el criterio de Mohr – Coulomb, se hace necesario determinar los ángulos de fricción y las resistencias cohesivas para cada macizo rocoso e intervalo de esfuerzos. Esto se realiza ajustando una relación lineal media a la curva generada a partir del criterio generalizado de Hoek – Brown para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_3$. El proceso de ajuste supone equilibrar las áreas por encima y por debajo de la curva de Mohr – Coulomb. Esto genera las siguientes ecuaciones para el ángulo de fricción (ϕ') y la resistencia cohesiva (c') (Hoek *et al.* 2002).

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}}$$

Teniendo la relación: $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max}/\sigma_{ci}$

La resistencia al corte de Mohr – Coulomb (τ), para un esfuerzo normal expresado por σ'_n , se encuentra reemplazando estos valores de c' y ϕ' en la ecuación:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

La gráfica equivalente, en términos de esfuerzos principales menor y mayor (ver Figura 1), está determinada por:

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma'_3$$

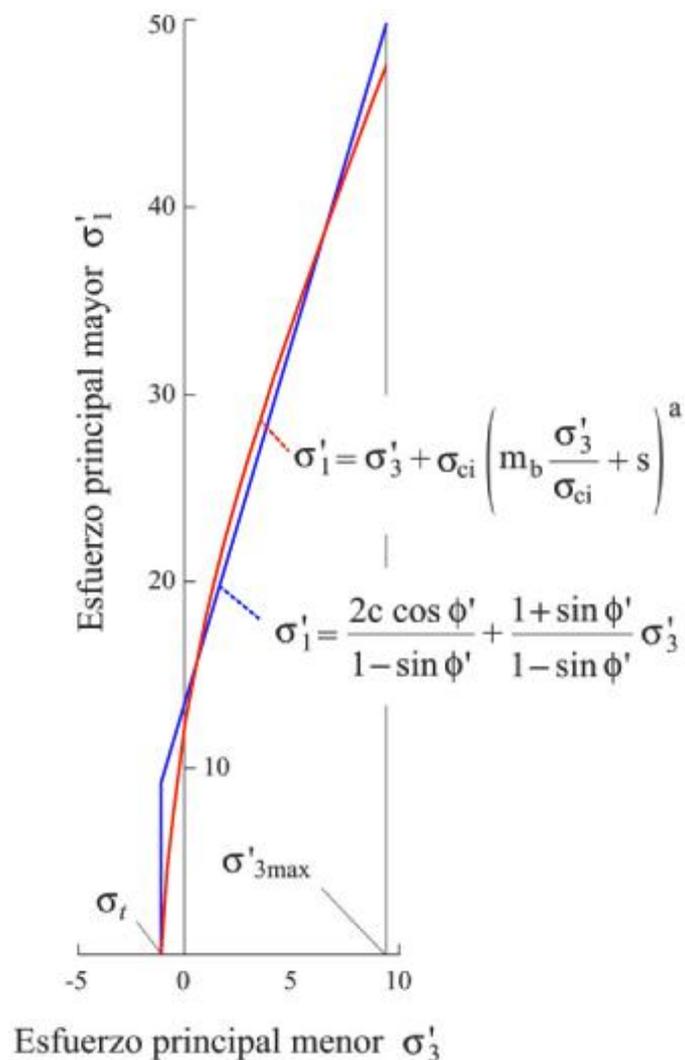


Figura 1. Relaciones entre esfuerzos principales mayores y menores para el criterio de Hoek – Brown y el equivalente de Mohr – Coulomb. (Hoek et al. 2002).

Hoek y Brown (1997) propusieron el concepto de resistencia del macizo rocoso global (σ'_{cm}), el cual estimaron a partir de la relación Mohr – Coulomb:

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

Hoek *et al.* (2002) establecieron la determinación del parámetro σ'_{3max} en taludes, donde el factor de seguridad calculado, la forma y la ubicación de la superficie de rotura son equivalentes; es así que, establecieron la siguiente relación:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$$

Donde γ es el peso unitario del macizo rocoso y H es la altura del talud.

En cuanto al cálculo de la deformabilidad de la roca intacta (E_i), Hoek y Diederichs (2006) plantean una relación en la que se puede incluir la deformabilidad de la roca intacta (E_{rm}/E_i), disponiendo de la relación de módulo (MR) la cual fue propuesta por Deere (1968).

$$E_i = MR \sigma_{ci}$$

Dicha ecuación resulta de gran utilidad cuando no se tiene valores directos de la deformabilidad de la roca intacta (E_i) o cuando es complicado realizar un muestreo completamente intacto o sin perturbaciones para poder medir E_i .

A continuación, se presenta la Tabla 5 donde se muestra unas guías para el factor de alteración o perturbación “D”. El factor de perturbación nunca debe aplicarse a todo el macizo rocoso que rodea una excavación.

Tabla 5. Guías para estimar el factor de perturbación D.

ASPECTO DEL MACIZO ROCOSO	DESCRIPCIÓN DEL MACIZO ROCOSO	VALOR SUGERIDO DE "D"
	<p>Una voladura o excavación de excelente calidad controlada mediante una máquina perforadora de caminos o una tuneladora produce una alteración mínima de la masa rocosa confinada que rodea un túnel.</p>	<p>D = 0</p>
	<p>La excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad produce una alteración mínima del macizo rocoso circundante.</p> <p>Cuando los problemas de compresión provocan un levantamiento significativo del piso, la perturbación puede ser grave a menos que se coloque un invertido temporal, como se muestra en la fotografía.</p>	<p>D = 0</p> <p>D = 1 Sin invertir</p>
	<p>Un control deficiente de la alineación de la perforación, el diseño de la carga y la secuencia de detonación da como resultado una voladura muy deficiente en un túnel de roca dura con daños severos, que se extienden 2 o 3 m, en la masa rocosa circundante.</p>	<p>D = 1,0 en la superficie con una disminución lineal a D = 0 a ± 2 m dentro del macizo rocoso circundante</p>
	<p>Las voladuras a pequeña escala en taludes de ingeniería civil producen daños modestos al macizo rocoso cuando se utilizan voladuras controladas, como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía.</p> <p>Las voladuras de producción incontroladas pueden provocar daños importantes a la pared rocosa.</p>	<p>D = 0,5 para limpieza controlada de paredes precortadas o lisas</p> <p>D = 1,0 para voladuras de producción</p>
	<p>En algunos macizos rocosos débiles, la excavación se puede realizar mediante rasgado y explanación con tractores de oruga. Los daños a las pistas se deben principalmente al alivio de tensiones.</p> <p>Los taludes de minas a cielo abierto muy grandes sufren importantes perturbación debido a voladuras de producción intensa y alivio de tensiones debido a la eliminación de sobrecarga.</p>	<p>D = 0,7 para efectos de excavación mecánica de daños por reducción de tensión.</p> <p>D = 1,0 para voladuras de producción</p> <p>Se puede derivar una relación D de transición que incorpora los efectos de la relajación del estrés a partir de la calificación de perturbación.</p>

Fuente: Elaborado con base en Hoek y Brown, 2018.

2.2.3 Análisis cinemático

2.2.3.1 Rotura planar

Esta rotura consiste en el deslizamiento de una masa de roca donde el buzamiento de la misma es paralelo o cuasi paralelo al buzamiento de la cara del talud y es mayor que su ángulo de fricción.

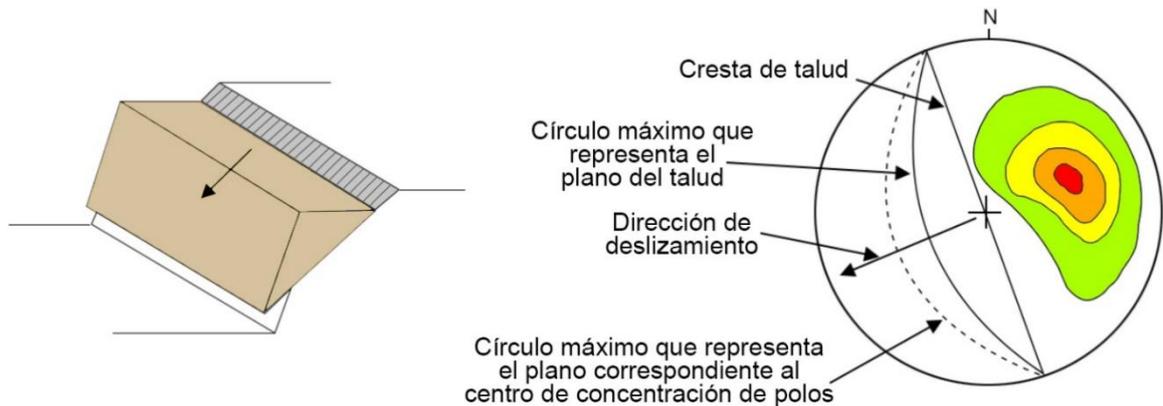
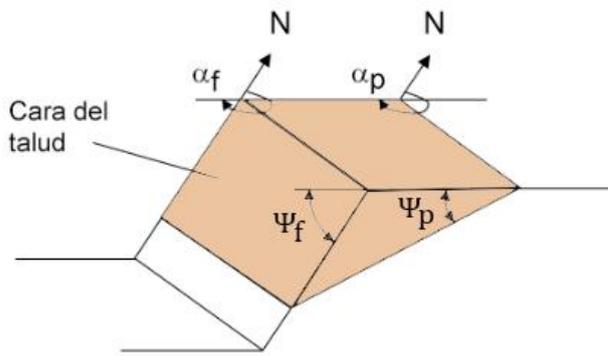


Figura 2. Disposición de las discontinuidades con respecto al talud para deslizamiento planar. (modificado de Hoek y Bray, 1981).

Según Hoek y Bray (1981), existen condiciones estructurales para que pueda darse una rotura planar, las cuales se presentan a continuación y se ilustran en la Figura 3.

- La dirección de la discontinuidad planar debe de estar 20° dentro del rumbo de la cara del talud, en ambas direcciones: $\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ$
- El buzamiento de la discontinuidad planar debe ser menor que el buzamiento de la cara del talud, además de inclinarse hacia dicha cara: $\Psi_p < \Psi_f$
- El buzamiento de la discontinuidad debe ser mayor que el ángulo de fricción de la superficie de deslizamiento: $\Psi_p > \phi_p$

Cuando se cumplen las condiciones estructurales mencionadas, el deslizamiento se da cuando las fuerzas tangenciales que se desarrollan en la superficie de rotura son mayores que las fuerzas resistentes. En la Figura 3 podemos observar la ilustración de dichas condiciones mediante el análisis estereográfico.



a) Modelos del Mecanismo Planar

Donde:

α_f = Dirección del buzamiento de la cara del talud.

α_p = Dirección del buzamiento del plano de deslizamiento.

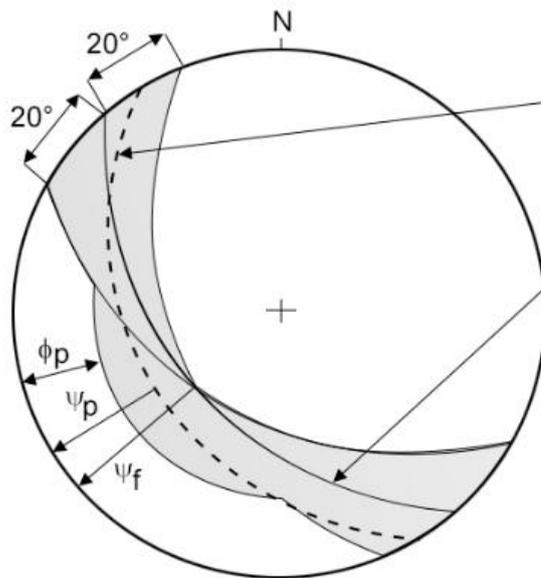
ψ_f = Buzamiento del talud.

ψ_p = Buzamiento del plano.

ϕ_p = Ángulo de Fricción del plano.

Condiciones para Mecanismo Planar:

1. $\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ$
2. $\psi_p < \psi_f$
3. $\psi_p > \phi_p$



Círculo máximo representando el plano de deslizamiento.

Círculo máximo representando la cara del talud.

Planos de discontinuidad que satisfagan las razones: $(\alpha_f - 20^\circ) \leq \alpha_p \leq (\alpha_f + 20^\circ)$ y $\phi_p < \psi_p < \psi_f$ son cinemáticamente viables para superficies de deslizamiento. Los círculos máximos que se encuentran dentro del área sombreada cumplirían con estas condiciones.

b) Representación Estereográfica

Figura 3. Análisis cinemático para mecanismo de rotura tipo planar. a) Modelo del mecanismo planar. b) Representación estereográfica. (Armas, 2004).

2.2.3.2 Rotura en cuña

Es el deslizamiento de un bloque en forma de cuña, formado por dos planos de discontinuidad, a favor de su línea de intersección. Para que se produzca este tipo de rotura, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud, y deben cumplir ciertas condiciones estructurales. Este tipo de rotura suele presentarse en macizos con varias familias de discontinuidades, cuya orientación, espaciado y continuidad determina la forma y el volumen de la cuña. (González de Vallejo *et al.* 2002)

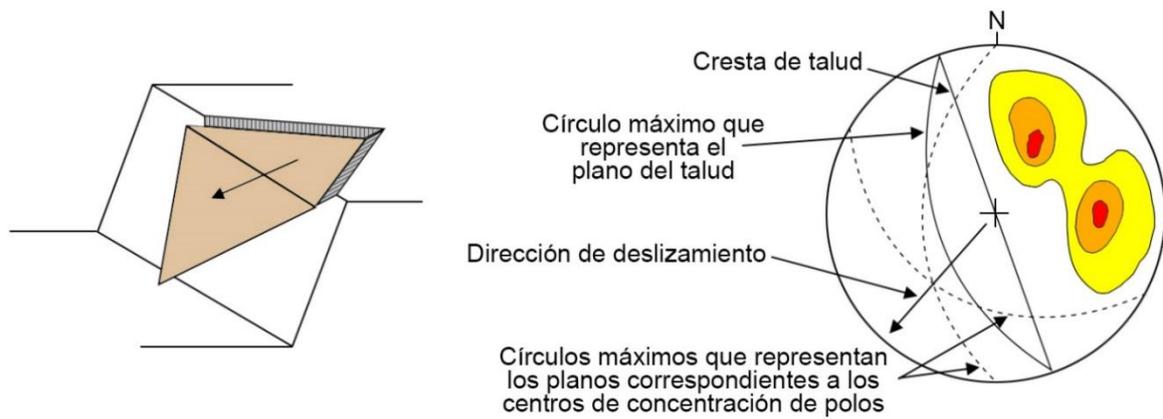


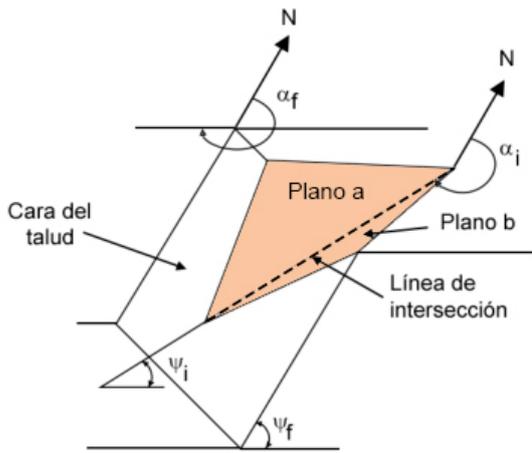
Figura 4. Orientación de las familias de discontinuidades respecto al talud para roturas en cuña. (modificado de Hoek y Bray, 1981).

A continuación, se presenta las condiciones estructurales para que exista una rotura en cuña y, además, se ilustran en la Figura 5.

- a) El rumbo de la línea de intersección debe ser aproximadamente igual a la dirección del buzamiento de la cara del talud: $\alpha_i = \alpha_f \pm$ (debe aflorar hacia la cara del talud)
- b) La inmersión de la línea de intersección debe ser menor que el buzamiento de la cara del talud. Bajo esta condición, se dice que la línea de intersección aflora en dirección hacia la cara del talud: $\Psi_i < \Psi_f$
- c) La inmersión de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción del o los planos de deslizamiento. Si los ángulos de fricción para ambos planos son marcadamente diferentes, un ángulo promedio de ellos puede ser aplicable.

$$\phi < \Psi_i$$

Como el modelo representa una forma tridimensional, no se asume la extensión lateral como un requisito. El análisis estereográfico puede también determinar si el deslizamiento ocurrirá en ambos planos formadores de la cuña o en uno solo.



a) Modelo del Mecanismo en Cuña

Donde:

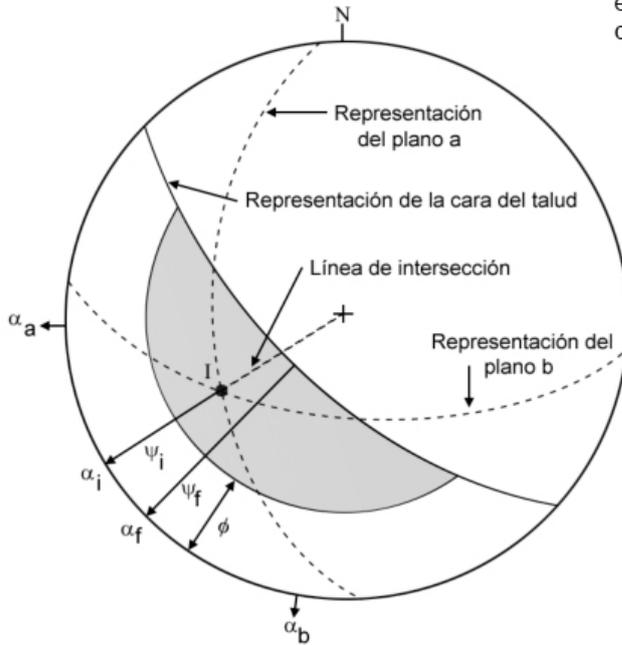
- α_f = Dir. del buzamiento de la cara del talud.
- α_a = Dir. del buzamiento del plano a.
- α_b = Dir. del buzamiento del plano b.
- Ψ_f = Buzamiento del talud.
- Ψ_a = Buzamiento del plano a.
- Ψ_b = Buzamiento del plano b.
- ϕ = Ángulo de fricción.
- Ψ_i = Inmersión de la línea de intersección.
- α_i = Rumbo de la línea de intersección.

Condiciones para Mecanismo en Cuña:

1. Si $\alpha_i = \alpha_f \pm$ (que aflore hacia la cara del talud).
2. $\Psi_i < \Psi_f$
3. $\phi < \Psi_i$

Markland's Test:

Si α_a o α_b se encuentra entre α_i y α_f entonces ocurrirá el deslizamiento sobre el plano a y b en dirección del máximo buzamiento, de lo contrario será a través de la línea de intersección.



b) Representación Estereográfica

Combinaciones de planos de discontinuidad con una línea de intersección que aflore hacia la cara del talud, $\alpha_i = \alpha_f \pm$, y que satisfagan la inecuación $\phi < \Psi_i < \Psi_f$ representan cinemáticamente fallamientos viables en cuña. Las líneas de intersección de aquellos planos deberán ubicarse dentro del área sombreada en la estereofalsilla.

Figura 5. Análisis cinemático para mecanismo de rotura en cuña. a) Modelo del mecanismo de rotura en cuña. b) Representación estereográfica. (Armas, 2004).

Para saber si una cuña desliza a través de los dos planos de discontinuidad o solo por uno de ellos, se debe utilizar la proyección estereográfica. Se debe sombrear el sector circular comprendido entre la dirección de buzamiento del talud (**T**) y la línea de intersección (**I**) entre los planos de discontinuidad (Figura 6). Una vez realizado esto, pueden darse tres circunstancias (Ramírez y Alejano 2004).

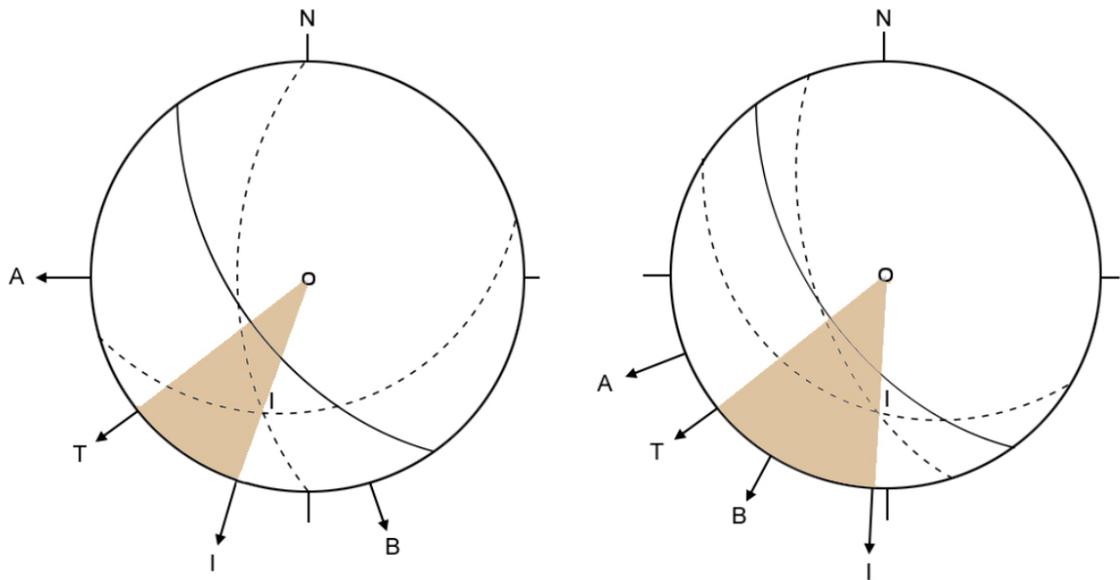
- a) Que las direcciones de buzamiento de los planos de discontinuidad de A y B queden fuera de la zona sombreada, en cuyo caso el deslizamiento se producirá por ambos, tratándose de una rotura en cuña propiamente dicha (Figura 6).
- b) Que solo una de las direcciones de uno de los planos de discontinuidad, bien A o bien B, quede dentro del sector circular sombreado, en cuyo caso se producirá el deslizamiento plano a través del plano de discontinuidad que quede dentro de la zona sombreada; en cuyo caso, el análisis de estabilidad se realizará como si se tratara de una rotura plana (Figura 6).
- c) Que las dos direcciones de buzamiento de los planos de discontinuidad tanto A como B queden dentro de la zona sombreada, en cuyo caso se producirá el deslizamiento plano a través del plano de discontinuidad cuya dirección de buzamiento está más próxima a la dirección de buzamiento del plano del talud (T); en cuyo caso, el análisis de estabilidad también se realizará como si se tratará de una rotura plana.

Nomenclatura típica para el cálculo de cuñas:

- **A:** Dirección de buzamiento del plano A.
- **B:** Dirección de buzamiento del plano B.
- **T:** Dirección de buzamiento de la cara del talud.
- **I:** Intersección de los planos A y B.
- **T_b:** Intersección de la cara del talud y B.
- **T_a:** Intersección de la cara del talud y A.

La zona sombreada es el sector circular que queda entre T y la dirección de I.

Si A y B quedan en la zona sombreada, el deslizamiento de cuña se produce por aquel plano cuya dirección de buzamiento esté más próxima a T.



a) Si A y B quedan fuera de la zona sombreada, el deslizamiento de cuña se produce por ambos planos.

b) Si solo A o solo B quedan en la zona sombreada, el deslizamiento se produce solo por ese plano.

* En caso de que este plano sea paralelo ($+ o - 20^\circ$) a la cara del talud se analizará como rotura plana.

Figura 6. Criterio para saber si la cuña desliza a través de ambos planos de discontinuidad o a través de uno solo. (Ramírez y Alejano, 2004).

Para saber si una cuña es directa o inversa, solo se analiza si los planos que la forman buzcan hacia el mismo o distinto lado de la línea de intersección (ver Figura 7). Nota: Si la dirección de la línea de intersección de los planos de rotura I está entre T_a y T_b , entonces la cuña será directa, en caso contrario la cuña será inversa.

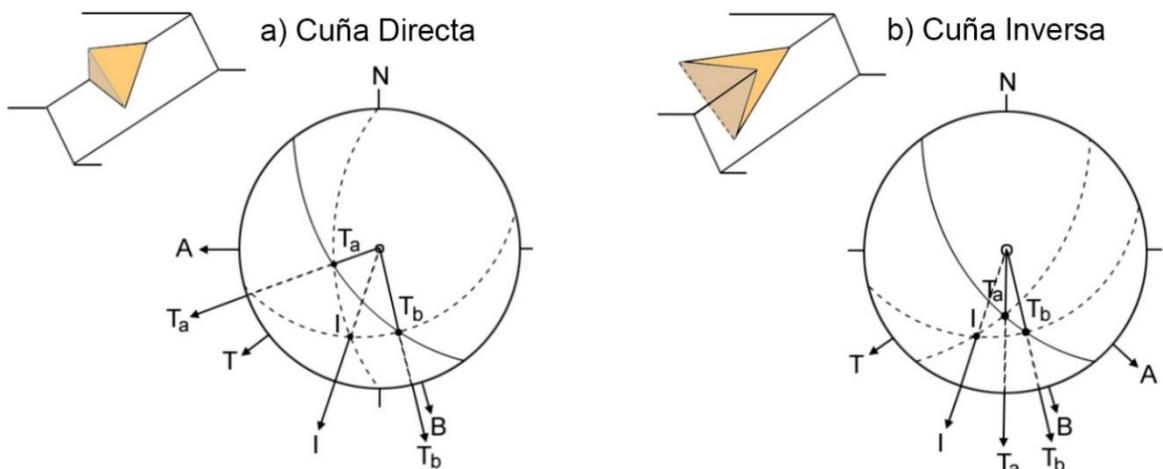


Figura 7. Criterio de análisis de cuña directa e inversa. (Ramírez y Alejano, 2004).

2.2.4 Análisis de taludes

2.2.4.1 Factor de seguridad

Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la rotura, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla, citado por Suárez (2009).

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

Otro criterio es dividir la masa que se va a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos (Suárez 2009).

2.2.4.2 Método de equilibrio límite

Durante muchos años se ha realizado el análisis de los movimientos de los taludes o laderas, haciendo uso de las técnicas de límite de equilibrio. Este sistema supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. (Suárez 2009).

Métodos exactos

Según Suárez (2009), el método de equilibrio límite se basa en la estática, facilitando soluciones exactas; pero no se tiene en cuenta las deformaciones, la distribución de las presiones y generalmente se asume el material como isotrópico, supone esfuerzos uniformemente distribuidos y utiliza modelos de falla sencillos; por lo tanto, los métodos exactos se deben aplicar únicamente en taludes con geometría sencilla, como la rotura planar y la rotura en cuña.

Métodos no exactos

La geometría de la superficie de falla no permite obtener una solución exacta mediante las leyes de la estática (como sucede con los métodos exactos), debido a que se tiene una estática indeterminada y se deben tener consideraciones adicionales para obtener su solución.

– Método de Dovelas

Para la aplicación de este método es necesario dividir la masa susceptible de deslizamiento en una serie de tajadas o rebanadas verticales y estudiar el equilibrio de cada una de ellas aisladamente, teniendo en cuenta la influencia de todas las demás, siendo mayor la precisión cuanto mayor sea la cantidad de tajadas (Figura 8). El problema presenta más incógnitas que ecuaciones; esto obliga a realizar unos supuestos, que son los que caracterizan y diferencian unos métodos de otros (Ramírez y Alejano 2004).

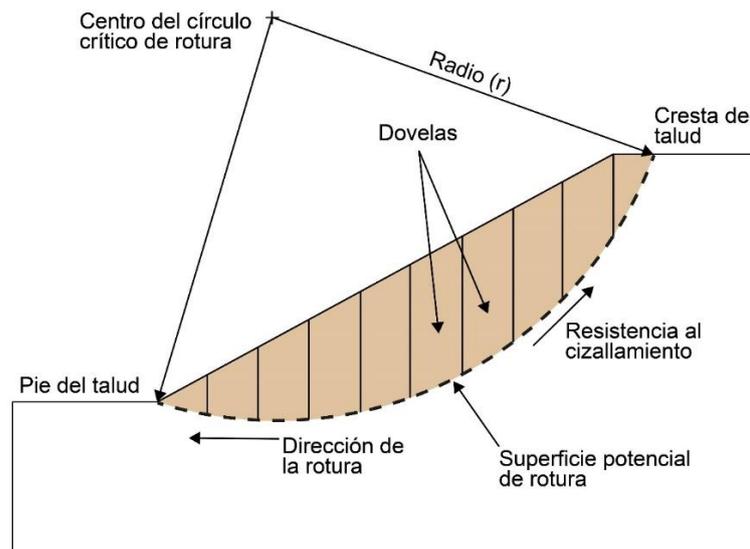


Figura 8. División en rebanadas verticales de una masa deslizante de una rotura circular. (Modificado de Ramírez y Alejano, 2004).

La Figura 9 presenta esquemáticamente una rebanada intermedia de una masa de roca en la que puede tener lugar una rotura circular, de ancho Δx_i , teniendo en cuenta las fuerzas que ejercen las rebanadas superiores e inferiores y los empujes de agua (Ramírez y Alejano, 2004).

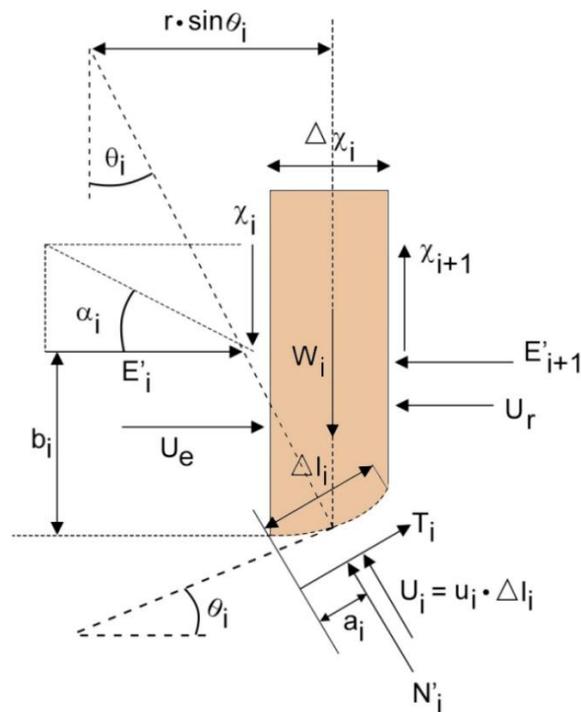


Figura 9. Esquema de fuerzas y aspectos geométricos en una rebanada. (Ramírez y Alejano, 2004).

Las fuerzas que actúan en una de estas rebanadas son en primer lugar, y sobre las caras laterales de la rebanada, las resultantes de los esfuerzos efectivos normales E'_i , y tangenciales X_i y de las presiones intersticiales U_e y U_r ; en la superficie de rotura actúan la resultante de los esfuerzos normales efectivos N'_i , de las resistencias al corte T'_i y de las presiones intersticiales U_i . Para resolver un problema con n rebanadas, se dispone de $3n$ ecuaciones, n para cada rebanada: equilibrio de fuerzas horizontales, equilibrio de fuerzas verticales y de momentos. Sin embargo, las incógnitas a resolver son $4n-2$; n valores de N'_i , $n-1$ valores de E'_i , $n-1$ valores de X_i , $n-1$ valores de b_i y 1 valor del **F.S.** (Ramírez y Alejano, 2004).

Cuando se realizan más hipótesis de las necesarias ($n-1$ hipótesis); al haber más hipótesis que ecuaciones, no se cumplirían todas las condiciones de equilibrio, por lo que serían métodos aproximados. Los métodos precisos son aquellos que solo establecen $n-2$ hipótesis, requeriría el uso de ordenadores y suelen utilizarse en fases avanzadas de proyectos; aunque, el grado de exactitud de las soluciones obtenidas irá más asociado a la verosimilitud de las hipótesis que al número de las mismas.

Los métodos de dovelas utilizados en esta investigación, son los descritos por Ramírez y Alejano (2004). Además, Suárez (2009) presenta algunos de los métodos más utilizados (ver Tabla 6).

Método de Bishop simplificado (1955): Asume que las fuerzas tangenciales en las caras de las rebanadas son nulas ($X_i = 0$), reduciendo en n-1 el número de incógnitas, lo que lleva a un sistema aproximado, ya que el equilibrio de las fuerzas horizontales no se satisface en una de las rebanadas.

Método de Spencer (1967): Supone que la fuerza lateral sobre cada rebanada forma un ángulo α con la horizontal. Este método es exacto, ya que tiene el mismo número de ecuaciones que de incógnitas.

$$\frac{X_i}{E'_i} = \tan \alpha$$

Estas n-1 hipótesis reducen el número de incógnitas a 3n-1, pero la inclinación constante es una nueva incógnita, por lo que el sistema queda completamente determinado con 3n incógnitas y otras tantas ecuaciones.

Método de Morgenstern y Price (1965): Estos autores proponen un método similar al de Spencer, sólo que la inclinación de las fuerzas resultantes aplicadas en las caras de las rebanadas se asume que varía de acuerdo con un tramo de una función arbitraria, introduciendo la incógnita λ , de acuerdo con la siguiente relación:

$$\alpha_i = \frac{X_i}{E'_i} = \lambda \cdot f(x)$$

Donde $f(x)$ es una función que se elige arbitrariamente (por ejemplo, la función seno o la función mitad del seno), siendo necesario un ordenador para realizar los tanteos precisos para que la función $f(x)$ sea la más idónea. Este tramo de la función seleccionada introduce la incógnita adicional, dejando el sistema completamente determinado con 3n ecuaciones y otras tantas incógnitas.

Tabla 6. Métodos de análisis de estabilidad de taludes.

Método	Superficie de Falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizante como para las dovelas individuales, los factores de seguridad son bajos.
Bishop Simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo en número de incógnitas.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de superficie de falla	Fuerzas	Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y fuerzas	Establece el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante, pero desconocida.
Janbu Simplificado (Janbu 1968)	Cualquier forma de superficie de falla	Fuerzas	Al igual que Bishop, asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de superficie de falla	Fuerzas	Asume que todas las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie de terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Sarma (1973)	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y fuerzas	Permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el Factor de Seguridad.
Morgenstern y Price	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y fuerzas	El método es similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Elementos Finitos	Cualquier forma de superficie de falla	Analiza esfuerzos y deformaciones	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de elementos, pero no se obtiene un Factor de Seguridad.
Espiral Logarítmica	Espiral Logarítmica	Momentos y fuerzas	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

Fuente: Elaborado con base en Suárez 2009.

2.2.5 Sismicidad

Para poder definir las condiciones sísmicas se tuvo en cuenta el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10 (2010). Los movimientos sísmicos de diseño se definen en función de la aceleración pico efectiva, representada por el parámetro A_a , y de la velocidad pico efectiva, representada por el parámetro A_v , para una probabilidad del diez por ciento (10%) de ser excedidos en un lapso de cincuenta años. (NSR-10).

2.2.5.1 Zonas de amenaza sísmica

Zona de amenaza sísmica baja: Es el conjunto de lugares en donde la aceleración horizontal pico efectiva (A_a) como la velocidad horizontal pico efectiva (A_v) son menores o iguales a 0,10.

Zona de amenaza sísmica intermedia: Es el conjunto de lugares en donde la aceleración horizontal pico efectiva (A_a) o la velocidad horizontal pico efectiva (A_v), o ambos, son mayores a 0,10 y ninguno de los dos excede 0,20

Zona de amenaza sísmica alta: Es el conjunto de lugares en donde la aceleración horizontal pico efectiva (A_a) o la velocidad horizontal pico efectiva (A_v), o ambos, son mayores que 0,20.

Tabla 7. Nivel de amenaza sísmica según valores de A_a y de A_v .

Mayor valor entre A_a y A_v	Asociado en los mapas de la Figura 11 y Figura 12 a Región N°	Amenaza sísmica
0,50	10	Alta
0,45	9	Alta
0,40	8	Alta
0,35	7	Alta
0,30	6	Alta
0,25	5	Alta
0,20	4	Intermedia
0,15	3	Intermedia
0,10	2	Baja
0,05	1	Baja

Fuente: Capítulo A.2 de la NSR-10.

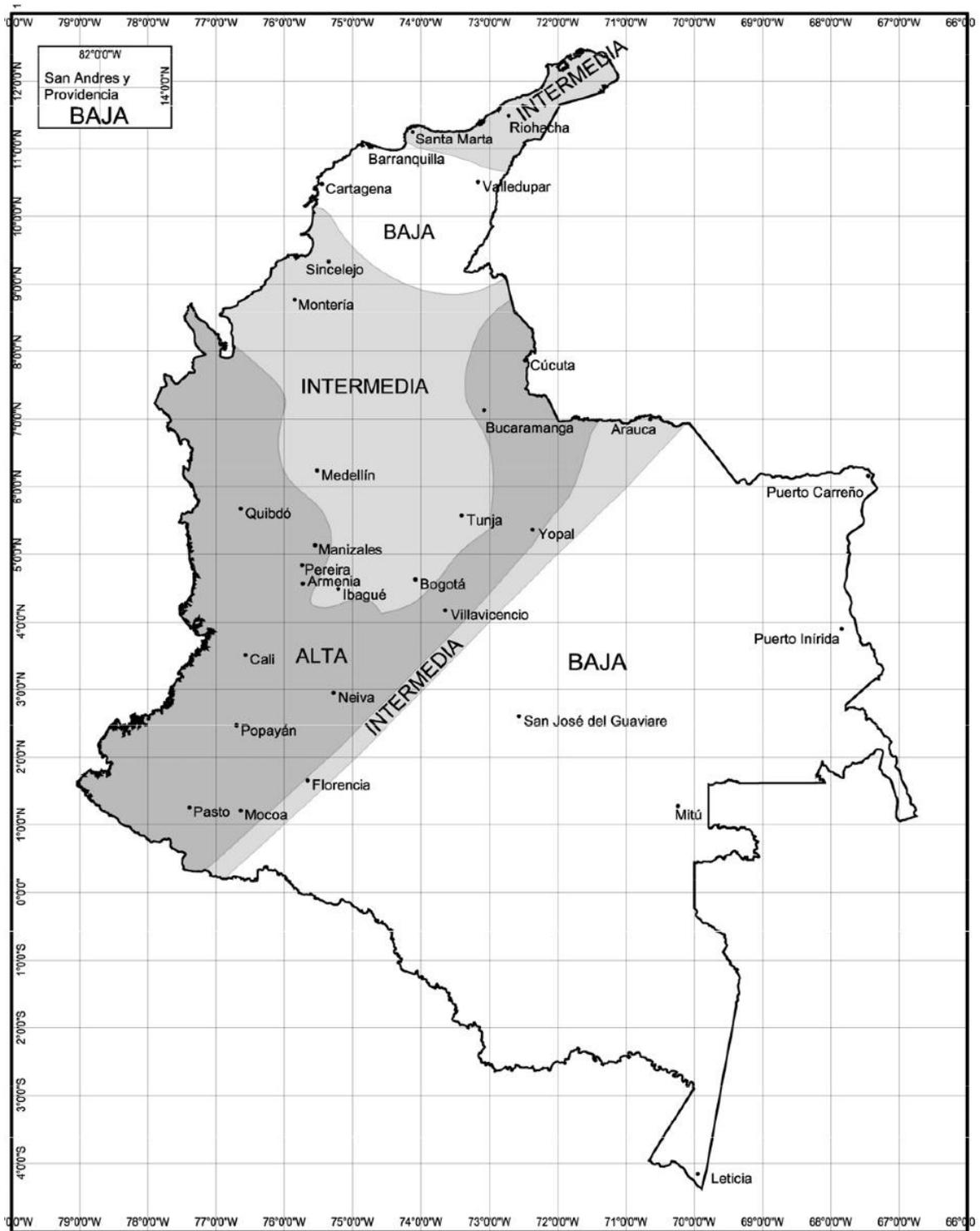


Figura 10. Zonas de amenazas sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de A_a y A_v . (NSR-10).

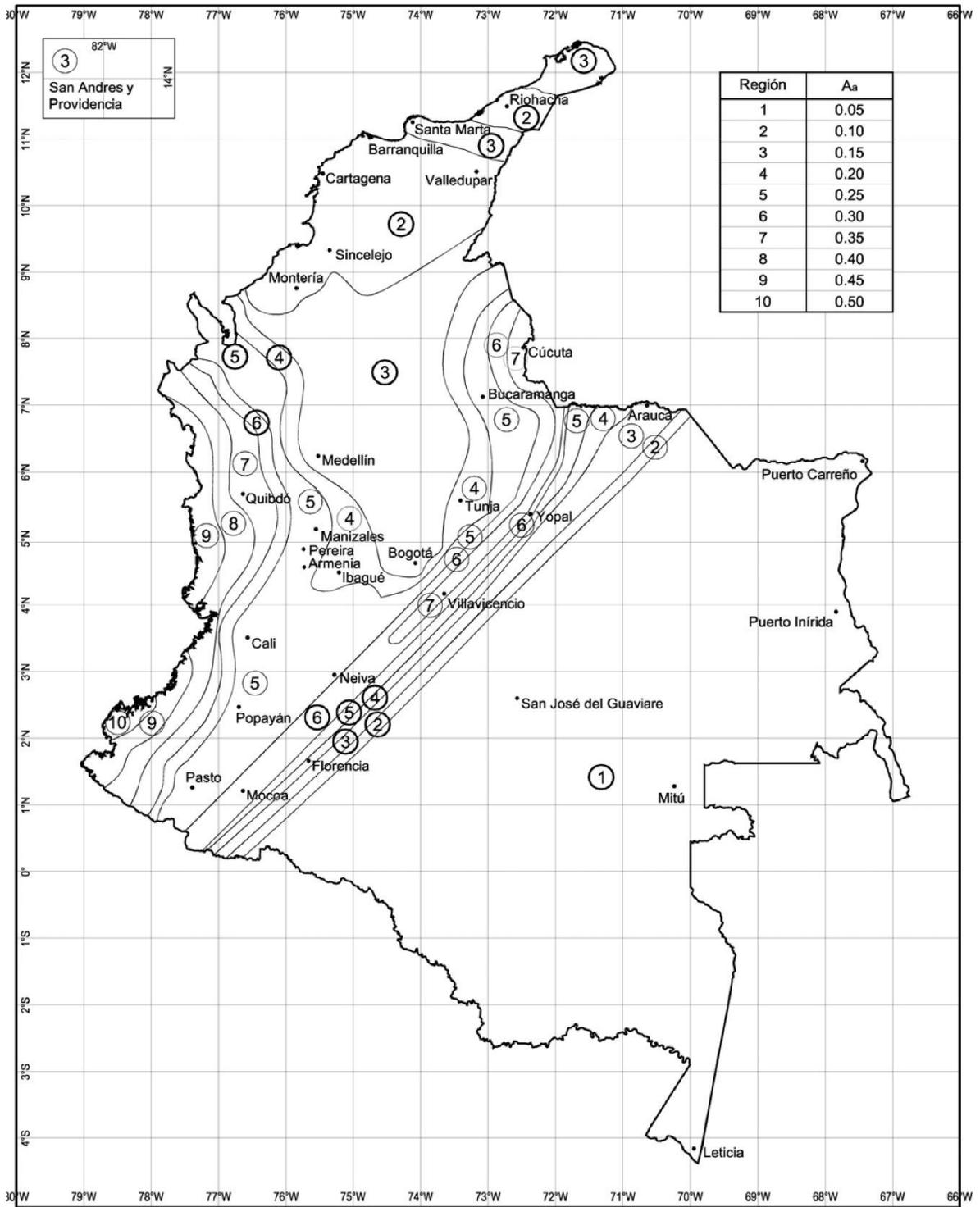


Figura 11. Mapa de valores de A_a. (NSR-10).

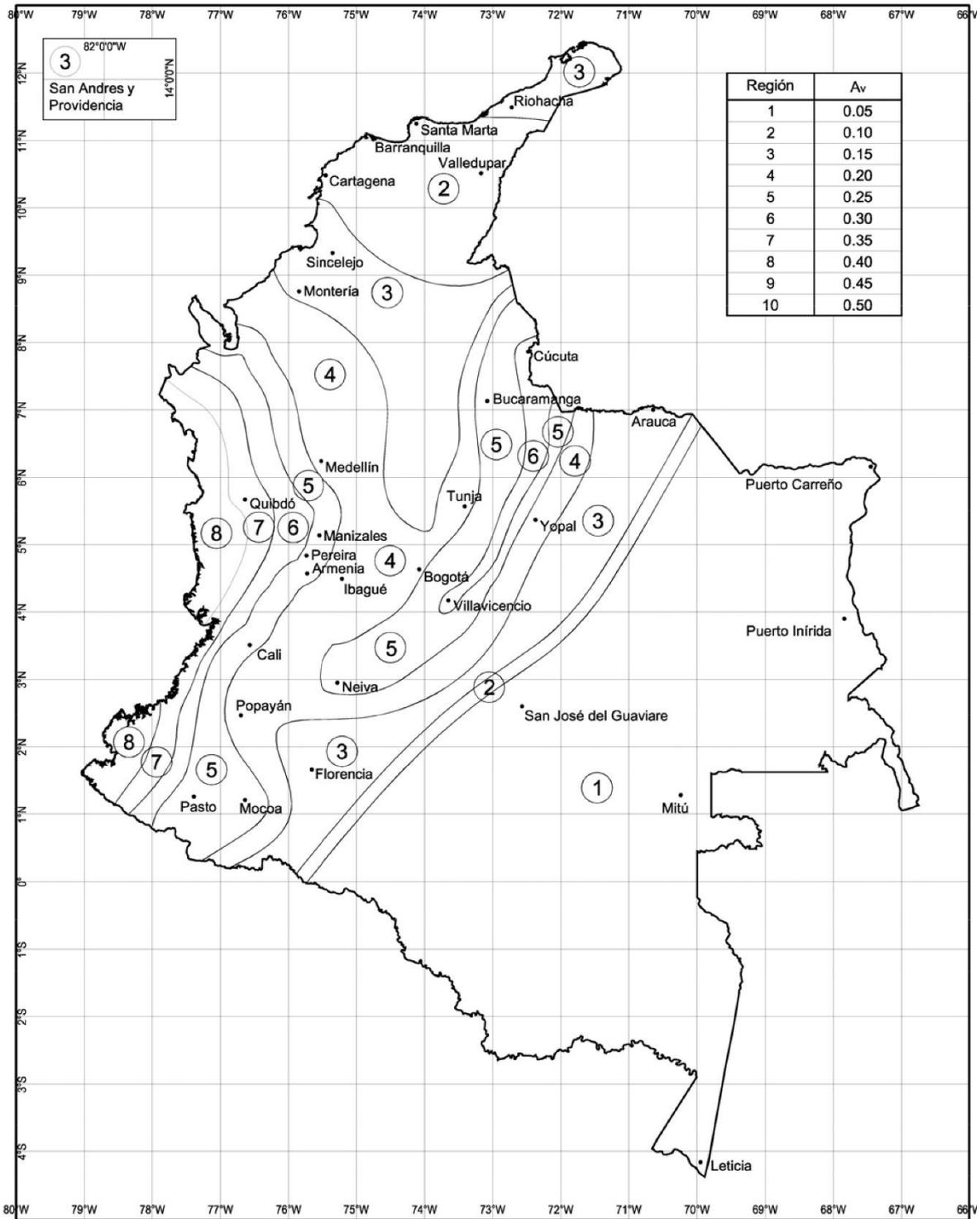


Figura 12. Mapa de valores de A_v . (NSR-10).

2.2.5.2 Efectos locales

Los coeficientes de amplificación, F_a y F_v , afectan la zona del espectro de períodos cortos y períodos intermedios, respectivamente. Los efectos locales de la respuesta sísmica de la edificación deben evaluarse con base en los perfiles de suelo dados a continuación, independientemente del tipo de cimentación empleado. (NSR-10).

Tipos de perfil de suelo

Se definen seis tipos de perfil de suelo los cuales se presentan en la Tabla 8. Los parámetros utilizados en la clasificación son los correspondientes a los 30 m superiores del perfil para los perfiles tipo A hasta E. Para el perfil tipo F se aplican otros criterios y la respuesta no debe limitarse a los 30 m superiores del perfil en los casos de perfiles con espesor de suelo significativo.

Tabla 8. Clasificación de los perfiles de suelo.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente.	$\bar{V}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media.	1500 m/s > $\bar{V}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante.	760 m/s > $\bar{V}_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios.	$\bar{N} \geq 50$ $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante.	360 m/s > $\bar{V}_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones.	$50 > \bar{N} \geq 15$ 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa ($\approx 0,5$ kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla con el criterio de velocidad de la onda de cortante.	180 m/s > \bar{V}_s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas.	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ 50 kPa ($\approx 0,5$ kgf/cm ²) > \bar{s}_u
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación de suelo realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de estudios sísmicos particulares de sitio. Se contemplan las siguientes subclases: F1 - Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F2 - Turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F3 - Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7,5 m con Índice de Plasticidad IP > 75). F4 - Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m).	

Fuente: Capítulo A.2 de la NSR-10.

Velocidad de la onda de cortante en roca

La roca competente del perfil tipo A, debe definirse por medio de mediciones de velocidad de la onda de cortante en el sitio o en perfiles de la misma Formación donde haya meteorización y fracturación similares. En aquellos casos en que sabe que las condiciones de la roca son continuas hasta una profundidad de al menos 30 m, la velocidad de onda de cortante superficial puede emplearse para definir \bar{V}_s . Para el perfil Tipo B, debe medirse en el sitio o estimarse, para roca competente con meteorización y fracturación moderada. Para las rocas más blandas o muy meteorizadas o fracturadas, deben medirse en el sitio la velocidad de la onda de cortante, o bien clasificarse como perfil tipo C.

Los perfiles donde existan más de 3 m de suelo entre la superficie de la roca y la parte inferior de la fundación, no pueden clasificarse como perfiles tipo A o B.

En la siguiente tabla se dan los valores del coeficiente F_a que amplifica las ordenadas del espectro en roca para tener en cuenta los efectos de sitio en el rango de períodos cortos del orden de T_0 . Para valores intermedios de A_a se permite interpolar linealmente entre valores del mismo tipo de perfil.

Tabla 9. Valores del coeficiente F_a , para la zona de periodos cortos del espectro.

Tipo de perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0,1$	$A_a = 0,2$	$A_a = 0,3$	$A_a = 0,4$	$A_a \geq 0,5$
A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
D	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
E	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
F	véase nota	véase nota	véase nota	véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con los estudios sísmicos particulares de sitio.

Fuente: Capítulo A.2 de la NSR-10.

2.2.5.3 Coeficiente de importancia

Grupos de uso: Grupo IV (Edificaciones indispensables): centros de salud, aeropuertos, sistemas masivos de transporte, refugios para emergencias, etc. Grupo III (Edificaciones de atención a la comunidad): policía, bomberos, colegios, universidades, etc. Grupo II (Estructuras de ocupación especial): edificaciones donde se pueden reunir más de 200 personas en un mismo salón, edificios gubernamentales, almacenes, etc. Grupo I (Estructuras de ocupación normal): casas, apartamentos, etc.

Tabla 10. Valores del coeficiente de importancia (I).

Grupo de uso	Coeficiente de importancia (I)
IV	1,50
III	1,25
II	1,10
I	1,00

Fuente: Capítulo A.2 de la NSR-10.

2.2.5.4 Sismo de diseño

Para el análisis y diseño de taludes, se debe emplear la aceleración máxima del terreno (a_{max}) obtenida de un espectro (aceleración del espectro de diseño para periodo cero) o por medio de análisis de amplificación de ondas unidimensionales o bidimensionales. En caso que sea un estudio de microzonificación sísmica, se utilizará la aceleración máxima superficial del terreno establecida en el espectro de diseño respectivo. El coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestático de taludes (K_{ST}) tiene valor inferior o igual al de a_{max} y se admiten los valores mínimos de K_{ST}/a_{max} , dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) y del tipo de análisis. (NSR-10).

Tabla 11. Valores de K_{ST}/a_{max} mínimos para análisis pseudoestáticos de taludes.

Material	K_{ST}/a_{max} mínimo	Análisis de amplificación mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%).	0,80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%).	1,00	Ninguno
Todos los materiales térreos.	0,67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar.
Todos los materiales térreos.	0,50	Amplificación de onda bidimensional.

Fuente: Capítulo H.5 de la NSR-10.

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Talud: Es una masa de tierra que presenta una pendiente o cambios de altura. En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente. (Suárez, 2009).

Macizo Rocos: Conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. Presenta carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo, consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, que condicionan su comportamiento geomecánico e hidráulico (González de Vallejo, 2002).

Amenaza sísmica: Probabilidad de ocurrencia de eventos asociados con un sismo (movimientos de masa, rotura del terreno, fallas en superficie, deformación tectónica, inundaciones) que causen daños materiales o pérdidas de vidas en un lugar y en un lapso de tiempo determinados (Hoyos, 2012).

Factor de seguridad: Es la resistencia global frente a cargas externas que tiene el macizo rocoso antes de sufrir deformaciones permanentes en su estructura (González de Vallejo *et al.* 2002).

Factores geomecánicos: Determinan el comportamiento mecánico del terreno (González de Vallejo *et al.* 2002).

Factores geológicos: Son la estratigrafía, litología y estructuras geológicas de un talud (González de Vallejo *et al.* 2002).

Factores geométricos: Determinan la altura e inclinación de un talud (González de Vallejo *et al.* 2002).

Geodinámica: Parte de la geología física o geomorfología que estudia los fenómenos geológicos que provocan modificaciones en la superficie terrestre por acción de los esfuerzos tectónicos internos o esfuerzos externos (Dávila, 2011).

Deslizamiento: Es un movimiento pendiente abajo de una masa de tierra o roca que se produce en superficies de rotura o en zonas relativamente delgadas de intensa deformación de corte (Highland y Bobrowsky 2008).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 Geográfica

La carretera Socorro – San Gil, se encuentra ubicado al suroeste de la ciudad de Bucaramanga, en la Plancha 135 – San Gil con una extensión aproximada de 22 km. Las coordenadas del tramo de investigación se definen por Punto Inicial y Punto Final, en el sistema de coordenadas Magna Sirgas Origen Nacional CTM12 (ver Tabla 12).

Tabla 12. Coordenadas del tramo de investigación.

Tramo	Kilómetro	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m.s.n.m.)
Punto Inicial	Km 104+192	4925231	2549898	1454
Punto Final	Km 117+350	5449889	1981818	1234

3.1.2 Política

Políticamente se encuentra ubicado entre los municipios de Socorro y Pinchote, pertenecientes al departamento de Santander, Colombia (ver Anexos).

3.2 ACCESIBILIDAD

El acceso al área de investigación es de simple y sencilla llegada desde cualquier ciudad principal de Colombia, pero se realizará las rutas desde dos de las ciudades principales más cercanas, Bucaramanga y Bogotá; motivo por el cual se presenta a continuación las rutas.

Tabla 13. Ruta de acceso al área de investigación.

Ruta	Transporte	Estado	Distancia	Tiempo
Bucaramanga - San Gil	Automóvil	Asfaltada	99 km	2:40 horas
Bogotá - Socorro	Automóvil	Asfaltada	304 km	6 horas

3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1 Tipo, nivel, diseño y método de la investigación

El tipo de investigación es no experimental, puesto que se realiza tal como se encuentra, sin modificar las variables de los taludes inestables; nivel transversal, debido a que se estudia en un determinado tiempo; diseño cuantitativo, porque se recopila y analiza datos mediante softwares; y el método de investigación es deductivo, ya que deductivamente se obtiene datos de la descripción de las estaciones geomecánicas, para así hallar el factor de seguridad y también es inductivo, ya que se obtiene una conclusión general de sucesos particulares.

3.3.2 Población de estudio

Taludes del tramo del km 104+192 – km 117+350 de la carretera Socorro – San Gil que tiene una longitud aproximada de 13 km.

3.3.3 Muestra

Zonas críticas de la carretera Socorro – San Gil, tramo km 104+192 – km 117+350.

3.3.4 Unidad de análisis

Los sistemas de clasificación geomecánica tales como el RQD, RMR, y GSI; el nivel freático, la sismicidad y el factor de seguridad.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1 Técnicas

Las técnicas de recolección de datos son: análisis documental, observación, medición en campo (ensayos geomecánicos in situ), recolección de información en tablas geomecánicas, procesamiento de la información mediante los softwares RocData v.4, Dips v.7, Slide v.6, ArcGIS v.10.8, AutoCAD v.25 y SASPlanet v.23.

3.4.2 Instrumentos y equipos

Los instrumentos son: libreta de campo, imágenes satelitales, mapas geológicos y topográficos, ficha para adquisición de datos geológicos - geomecánicos, GPS, brújula, wincha, cámara fotográfica, picota, lápiz de dureza, ácido clorhídrico (HCl), lupa, protractor, lapiceros, tablero, laptop y softwares.

3.5 PROCEDIMIENTO

3.5.1 Etapa preliminar de gabinete (Pre campo)

Se conforma por la planificación de tareas, búsqueda y recopilación de información (tesis, papers, libros) asociada con el problema de investigación, además de la evaluación de imágenes satelitales para la identificación previa de estructuras y geoformas. También se elaboró mapas básicos (geológico, topográfico y ubicación) con la información de la Plancha 135 – San Gil tomado del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

3.5.2 Etapa de campo (In situ)

Abarca la investigación elemental de campo, con la finalidad de obtener y adquirir información necesaria; logrando realizar el cartografiado geológico, estructural, geomorfológico, geodinámico y caracterización geomecánica, a escala 1:30.000. Realizando esto, nos permite definir las condiciones geotécnicas de los taludes críticos del tramo de investigación.

3.5.3 Etapa final de gabinete (Post campo)

En esta etapa se utiliza la información recopilada en etapas anteriores, donde se realiza el análisis, procesamiento e interpretación utilizando softwares de Rocscience Inc (RocData v.4, Dips v.7, Slide v.6), ArcGIS v.10.8, SASPlanet v.23, AutoCAD v.25. Es así que se define la inestabilidad de los taludes y posteriormente se presenta la investigación.

3.6 GEOMORFOLOGÍA

El área de investigación presenta características geomorfológicas relacionadas a procesos tectónicos, por lo que está controlada por las estructuras geológicas de la zona, generando geoformas de tipo estructural. Una consecuencia del modelado paisajístico son los procesos continuos tales como la erosión y la remoción de masas, a causa de factores como el clima, el agua y la intervención del hombre sobre su entorno; donde al asociarse estos agentes se generan geoformas de origen denudacional. Se observó escarpes, que es consecuencia de una alternancia de una litología más compacta o dura como las areniscas y calizas con estratos de margas y lodolitas, donde estos últimos al ser más blandos se erosionan con facilidad, lo que a su vez posibilita en lugares de baja altitud se generen laderas más suaves.

Para las geoformas y el tipo de relieve hallados en el área de investigación, se empleará la clasificación geomorfológica del sistema ITC, teniendo en cuenta la unidad, subunidad y componente o elemento geomorfológico, relacionándose a las geoformas de origen denudacional y estructural.

3.6.1 Geoformas de origen denudacional

Estas geoformas se relacionan con procesos exógenos degradacionales, que afectan a la roca en prolongados periodos de tiempo y originan una erosión lenta y constante. Se distinguen por presentar relieves ondulados de pendientes suaves en sitios de mayor exposición de la roca. Presentan pendientes fuertes (escarpes erosivos); junto con la litología y el clima se generan acumulación de remanentes de las unidades originales en las pendientes de ladera y piedemonte, generando así nuevas geoformas.

3.6.1.1 Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco)

Esta geoforma tiene forma de lóbulo con morfología alomada y pendiente aproximada de 15°. Se ha formado por procesos gravitacionales de transporte y acumulación de materiales en laderas adyacentes a donde se genera estos procesos y además se ve influenciado por las aguas de escorrentía.



Foto 1. Cono y lóbulo coluvial y de soliflucción (Dco).

3.6.1.2 Ladera ondulada (Dlo)

Esta geoforma presenta superficies con declive de formas alomadas (planas, cóncavas y convexas) con pendientes aproximadas de hasta 30°; la forma de esta se ve ligada a la composición litológica y a la erodabilidad de la unidad en la cual se encuentran.



Foto 2. Ladera ondulada (Dlo).

3.6.2 Geformas de origen estructural

Los procesos tectónicos han producido estructuras a partir de su relieve de rocas duras y blandas que presentan control estructural y que el paisaje ha sido modelado por factores atmosféricos, teniendo un grado de alteración bajo.

3.6.2.1 Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc)

Esta geoforma presenta una superficie inclinada (vertical a subvertical) con longitudes largas y pendientes abruptas a escarpadas. Tiene la característica de desarrollarse sobre un flanco de una estructura sinclinal, debido a procesos erosivos sobre rocas blandas a intermedias. Esta unidad presenta movimientos en masa del tipo deslizamiento traslacional y caída de detritos que dieron lugar a la formación de otra geoforma tal como cono y lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco).

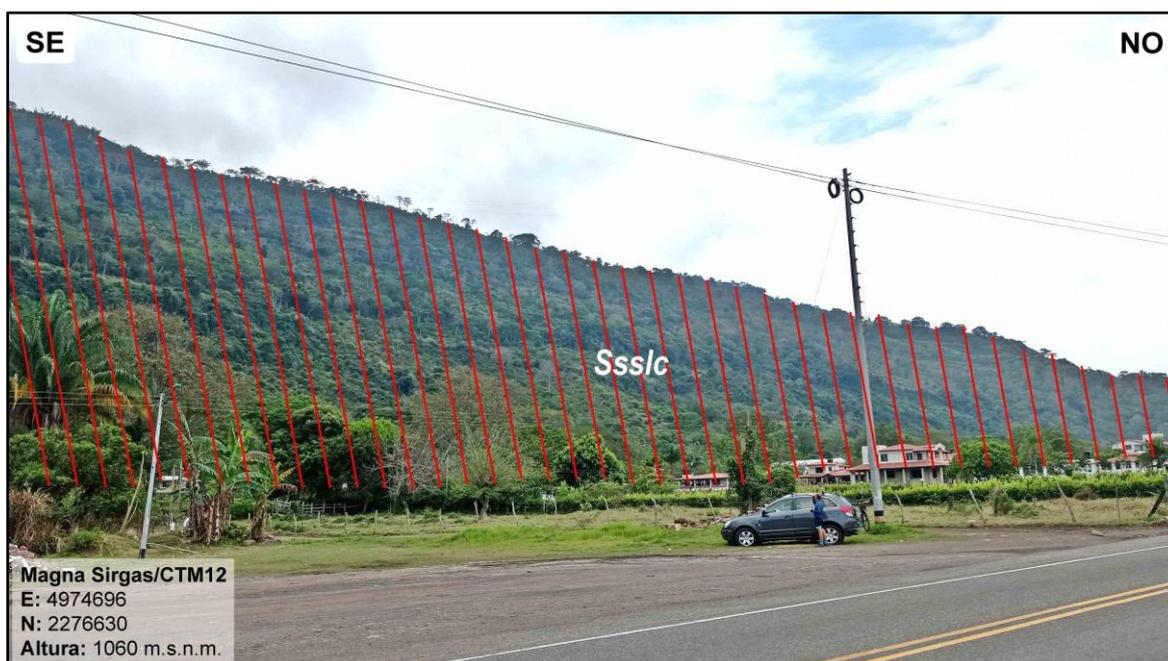


Foto 3. Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc).

3.6.2.2 Ladera estructural de cuesta (Scle)

Esta geoforma tiene una superficie inclinada con una pendiente aproximada de hasta 15°, de forma plana y con estratos en sentido de la inclinación del terreno. Esta unidad está constituida por rocas moderadamente duras y suelos residuales delgados, se caracteriza porque presenta movimientos en masa del tipo de reptación de suelos.



Foto 4. Ladera estructural de cuesta (Scle).

3.6.3 Geformas de origen antropogénico

Son geformas generadas por la intervención del hombre sobre el suelo y el paisaje, dentro de los cuales tenemos las Superficies de explanación (Asp) que son lugares donde se han construido viviendas y vías de comunicación (la vía nacional y trochas), también se tiene las Canteras (Ac) que modifican así la morfología natural del terreno.



Foto 5. Geformas de origen antropogénico (Asp y Ac).

3.7 GEOLOGÍA LOCAL

3.7.1 Formación Rosablanca (Kir)

La Formación Rosablanca aflorante en el área de estudio está constituida litológicamente por rocas carbonatadas con facies terrígenas hacia el techo. Compuesta hacia el techo por areniscas calcáreas de color gris amarillento en capas medias a gruesas con geometría tabular, alternadas con calizas masivas, gris azuladas; areniscas calcáreas grises de grano medio, arcillolitas calcáreas de color marrón rojizo y calizas masivas gris oscuras. En cuanto al contacto con la Formación Paja, este es un contacto concordante y neto, el cual se pudo observar el corte de carretera.



Foto 6. Contacto entre la Fm. Rosablanca (Kir) y la Fm. Paja (Kip).

3.7.2 Formación Paja (Kip)

La Formación Paja aflorante en el área de estudio está constituida litológicamente por lodolitas calcáreas de hasta 25 cm de espesor, color negro, con nódulos calcáreos intercalados con margas de espesor medio y color gris oscuro con geometría tabular.

Hacia el techo de esta unidad se evidencian capas gruesas de lodolitas de color negro y tonalidades rojizas que ocasionado producto de la meteorización, además presentan láminas de yeso paralelas a la laminación y como relleno de pequeñas fracturas, intercaladas con capas de margas; además se encuentran nódulos ferruginosos.



Foto 7. Estratos de lodolitas con margas la Fm. Paja (Kip).

3.7.3 Formación Tablazo (Kit)

La Formación Tablazo aflorante en el área de estudio está constituida litológicamente por intercalaciones de capas tabulares gruesas (aproximadamente 1,5 m) de calizas, color gris azulado, también se evidencia la presencia de calizas margosas delgadas y capas de lodolitas calcáreas de color grisáceo; además algunas capas de areniscas calcáreas de color marrón, de grano fino, dispuestas en capas gruesas tabulares. Esta Formación tiene un contacto concordante con la Formación Simití, la cual la suprayace.



Foto 8. Lodolitas, areniscas calcáreas y calizas de la Fm. Tablazo (Kit).

3.7.4 Cuaternario de Derrubio (Qd)

Este tipo de depósito se forma y se encuentra en la base de los escarpes y zonas de desprendimientos de fragmentos rocosos de las laderas adyacentes debido a los agentes erosivos y la gravedad. Este depósito evidencia rangos variables de espesor en la zona, compuesto por cantos de calizas y areniscas calcáreas de tamaño heterogéneo, angulosos a subangulosos, con matriz limo arcillosa.



Foto 9. Corte donde se evidencia el Depósito Cuaternario de Derrubio (Qd).

3.8 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área de estudio comprende eventos tectónicos compresivos con rumbo SO-NE, las estructuras principales son pliegues y fallas regionales, donde la zona de estudio está controlada por la falla regional de Confines y plegamientos asociados a esta. Los pliegues presentan una orientación SO-NE y una compresión NO-SE.

3.8.1 Anticlinal

Esta estructura se encuentra ubicada al SE-NO de un tramo de la carretera en estudio y esta estructura a su vez se logra observar, porque es un corte de talud de una cantera. Se observa un pliegue anticlinal cortado por una falla normal y con poca extensión longitudinal, donde el eje de la estructura tiene una orientación NE-SO. Esta estructura se emplaza sobre estratos de la Formación Tablazo.

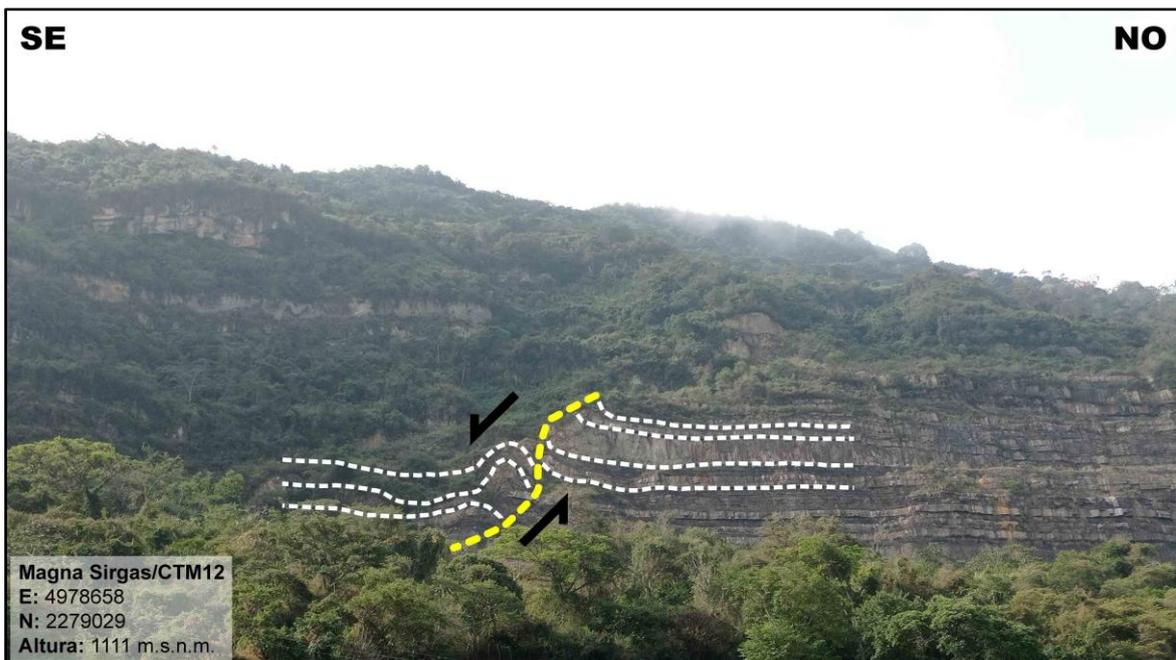


Foto 10. Anticlinal cortado por una falla normal en estratos de la Fm. Tablazo.

3.8.2 Monoclinal

En la Foto 11 se muestra un monoclinal, donde se observa la ondulación en los estratos de la Formación Rosablanca, que, a su vez, da indicio de las fuerzas que actuaron y deformaron el macizo rocoso, cambiando su forma sin perturbar la continuidad de los mismos.



Foto 11. Vista de un monoclinal emplazado en la Fm. Rosablanca.

3.8.3 Falla normal

En la Foto 12 se observa una falla normal local en estratos de roca caliza compacta de gran espesor intercalado con calizas nodulosas de la Formación Tablazo, donde se evidencia que el plano de falla muestra una ligera meteorización y moderado a bajo grado de fracturamiento. El plano de falla presenta una orientación de 123°N y un buzamiento de 74° .



Foto 12. Falla normal local emplazada sobre estratos de la Fm. Tablazo.

3.9 ANÁLISIS GEOTÉCNICO

La evaluación geológica – geomecánica en la carretera Socorro – San Gil ha sido sectorizada en seis sitios críticos (taludes), donde se definieron elementos geológicos tales como la litología, estructuras y geomorfología; mientras que en los geomecánicos se empleó las clasificaciones de Índice de Calidad de la Roca (RQD), Valoración del Macizo Rocosos (RMR) e Índice de Resistencia Geológica (GSI), en cuanto a los parámetros físico – mecánicos de las rocas se calcularon con el criterio de Hoek – Brown con el software RocData v.4, obteniendo así el ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c); estos a su vez, hacen parte de la metodología empírica. En cuanto a la metodología analítica se realizó mediante proyecciones estereográficas con el software Dips v.7, identificando las familias de discontinuidades tendientes a fallas tipo planar, cuña o vuelco. Posteriormente con el software Slide v.6 se procedió a realizar el análisis del talud en condiciones que representan el estado actual y pronóstico del talud, determinando un Factor de Seguridad (FS) el cual debería ser superior a 1,5 para ser considerado estable según Hoek (2007).

Para el cálculo del coeficiente de sismicidad horizontal (K_h) y el coeficiente de sismicidad vertical (K_v) necesarios para el análisis sísmico, se calculará según la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-10), los cuales están en función de:

- La amenaza sísmica, que se expresa según el coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva para diseño (A_a) y el coeficiente de velocidad horizontal pico efectiva para diseño (A_v).
- Las características de la estratificación del suelo, a través de los coeficientes de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos (F_a) e intermedios (F_v).
- El coeficiente de importancia (I).
- El coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestático de taludes (K_{ST}).

Ahora bien, para obtener A_a nos remitimos a la Figura 11, donde se encuentran dichos valores para el municipio del Socorro.

Tabla 14. Valores de A_a para el Socorro.

Localidad	A_a	Zona de amenaza sísmica
Socorro	0.20	Intermedia

Fuente: Tomado del Apéndice A-4, NSR-10.

La determinación del coeficiente de amplificación sísmica (F_a), está en función del tipo de suelo y los valores de A_a , para lo cual se utiliza la Tabla 8 y la Tabla 9. Ahora bien, para el análisis y diseño de taludes, se emplea la aceleración máxima del terreno (a_{max}) con una aceleración del espectro de diseño para periodo cero; por lo que solo se trabajará con el tipo de perfil y los valores de A_a y F_a .

Tabla 15. Valor del coeficiente F_a .

Tipo de perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos
	$A_a = 0.2$
C	1.2

Con respecto al coeficiente de importancia (I), según la Tabla 10, nos encontramos en el Grupo de Uso I, con un valor de 1.00. Una vez definido el espectro de diseño y teniendo en cuenta los valores de K_{ST} mostrados en la Tabla 11, se toma un valor de 1.00 para las ESTC-01, ESTC-02, ESTC-03 y ESTC-06, mientras que para ESTC-04 y ESTC-05 se toma un valor de 0.80.

Una vez definidos los valores de $A_a=0.2$, $F_a=1.2$, $I=1.0$, $K_{ST}=1.0$ y $K_{ST}=0.8$ se procede a determinar el coeficiente de sismicidad horizontal (K_h) con la siguiente fórmula:

$$K_h = A_a \times F_a \times I \times K_{ST}$$

$$K_h = (0.2) \times (1.2) \times (1.0) \times (1.0) \quad \wedge \quad K_h = (0.2) \times (1.2) \times (1.0) \times (0.8)$$

$$\mathbf{K_{h1} = 0.24} \quad \wedge \quad \mathbf{K_{h2} = 0.192}$$

En cuanto al valor de coeficiente de sismicidad vertical (K_v) se toma las dos terceras partes ($2/3$) del coeficiente de sismicidad horizontal (K_h), según como lo menciona la NSR-10 en su capítulo A.2.8., teniendo así:

$$K_v = K_h \times 2/3$$

$$\mathbf{K_{v1} = 0.24 \times 2/3 = 0.16} \quad \wedge \quad \mathbf{K_{v2} = 0.192 \times 2/3 = 0.128}$$

3.9.1 Estación de Talud Crítico 01 (ESTC-01)

Esta estación se encuentra ubicado al margen derecho de la carretera entre las progresivas Km 104+198 – Km 104+208, y a su vez, se ubica dentro de la Formación Tablazo (Kit) que consta de lodolitas de color gris oscuro con espesor de 1,8 m, calizas muy compactas de color grisáceo amarillento en superficie, mientras que la muestra fresca es de color grisáceo azulado con espesor de 2 m y un paquete de calizas nodulares de 1,5 m. Presenta un grado de meteorización moderada (física y orgánica) y un grado de fracturamiento moderado presentando hasta cuatro familias de discontinuidades. El talud tiene una altura de 7 m con una inclinación de 88°, la cresta mantiene la morfología natural del terreno y se tiene un ancho de carretera de 11 m.



Foto 13. Perfil de la ESTC-01 compuesto por calizas y lodolitas.

Tabla 16. Datos del talud y macizo rocoso en la ESTC-01.

MACIZO ROCOSO				
Litología / Formación		Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI
Calizas y lodolitas / Fm. Tablazo		Moderado	Medio	Bloq. regular
GEOMETRÍA DEL TALUD				
Altura	Pie	Orientación	Talud	Cabeza
7 m	11 m	D	88	25
		DD	328	328

Para el cálculo de la resistencia a la compresión uniaxial, se utilizó el Martillo de Schmidt (esclerómetro), realizando las medidas en los tres tipos de roca presentes en el talud, además, según el análisis de laboratorio se tiene las densidades para las lodolitas de 21,21 kN/m³, calizas de 25,28 kN/m³ y calizas nodulares de 24,93 kN/m³ (promedio calizas 25,105 kN/m³).

Teniendo la información mencionada, se realizó la corrección de las medidas en el gráfico de Miller, obteniendo un valor estimado de la resistencia a la compresión uniaxial (RCU); donde, $R_L = 20$ (ISRM revisada) es de 25 MPa, $R_L = 46$ (ISRM revisada) es de 106 MPa y $R_L = 53$ (ISRM revisada) es de 149 MPa. Obteniendo así un resultado final de la resistencia a la compresión uniaxial del talud en lodolitas de 25 MPa y en calizas de 128 MPa.

Tabla 17. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-01.

LECTURAS	LODOLITAS		CALIZAS		CALIZAS NODULARES	
	Medidas	Corregidas	Medidas	Corregidas	Medidas	Corregidas
Lectura 1	15	22	38	39	55	54
Lectura 2	13	20	38	39	55	54
Lectura 3	12	19	40	41	54	53
Lectura 4	15	22	41	42	54	53
Lectura 5	12	19	39	40	57	55
Lectura 6	14	21	39	40	54	53
Lectura 7	14	21	42	42	52	51
Lectura 8	12	19	43	43	56	55
Lectura 9	12	19	46	46	57	55
Lectura 10	14	21	48	48	55	54
Lectura 11	15	22	47	47	56	55
Lectura 12	12	19	45	45	56	55
Lectura 13	12	19	51	50	57	55
Lectura 14	13	20	53	52	55	54
Lectura 15	13	20	49	49	52	51
Lectura 16	14	21	49	49	53	52
Lectura 17	15	22	50	49	53	52
Lectura 18	14	21	51	50	50	49
Lectura 19	14	21	52	51	51	50
Lectura 20	13	20	53	52	52	51
Promedio		20		46		53
RCU		25 MPa		106 MPa		149 MPa
						128 MPa

Para el cálculo del RQD se aplica una fórmula, razón por la cual, se procedió a calcular en las lodolitas y calizas; obteniendo distintos valores tales como, el RQD en las lodolitas de 25,98% y el RQD en las calizas de 88,78%.

Tabla 18. Cálculo del RQD para la ESTC-01.

RQD=100e^{-0,1λ}(0,1λ+1)				
Rocas	ND	L	λ	RQD
Lodolitas	33	1,25	26,4	25,98%
Calizas compactas	6	1,5	4,0	93,84
Calizas nodulares	18	2,5	7,2	83,72

En cuanto al cálculo del RMR₈₉, según la valoración de la Tabla 19, las lodolitas se clasifican dentro de la Clase IV, un valor RMR₈₉ de 38 y un índice de calidad de la roca Mala; mientras que las calizas (ver Tabla 20) se clasifican dentro de la Clase II, un valor RMR₈₉ de 66 y un índice de calidad de la roca Buena.

Tabla 19. Cálculo del RMR₈₉ para las lodolitas en la ESTC-01.

RANGO DE VALORES						
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 – 250 (12)	50 – 100 (7)	25 – 50 (4)	5 – 25 (2) 1 – 5 (1) < 1 (0)	
RQD	90 – 100 % (20)	75 – 90 % (17)	50 – 75 % (13)	25 – 50 % (8)	< 25 % (3)	
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	6 – 20 cm (8)	< 6 cm (5)	
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1)	> 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1)	> 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1)	Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2)	Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1)	Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. Húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)	
VALOR TOTAL RMR	38					

Tabla 20. Cálculo del RMR₈₉ para las calizas en la ESTC-01.

RANGO DE VALORES					
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 – 250 (12)	50 – 100 (7)	25 – 50 (4)	5 – 25 (2) 1 – 5 (1) < 1 (0)
RQD	90 – 100 % (20)	75 – 90 % (17)	50 – 75 % (13)	25 – 50 % (8)	< 25 % (3)
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	6 – 20 cm (8)	< 6 cm (5)
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1) > 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1) > 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1) Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2) Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1) Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. Húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)
VALOR TOTAL RMR	66				

Para el cálculo del GSI se necesita el valor de JCOND₈₉, el cual se obtiene mediante la suma de cada valor de la condición de las discontinuidades (ver Tabla 19 y Tabla 20), mientras que el valor de RQD se extrae de la Tabla 18.

Tabla 21. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.

GSI = 1,5 JCOND ₈₉ + RQD/2								
Roca	Valoración de la Condición de las Discontinuidades						RQD	GSI
	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	JCOND ₈₉		
Lodolitas	6	1	1	2	3	13	25,98	32,49
Calizas	6	4	3	4	3	20	88,78	74,39

Mediante el software RocData v.4 determinamos las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, el cual nos proporciona los siguientes parámetros de Hoek-Brown en las lodolitas (mb=0.048, s=0.0088, a=0,519) y calizas (mb=1.605, s=0.0140, a=0,501); Mohr-Coulomb en lodolitas (cohesión = 0.028 MPa, ángulo de fricción = 31.06°) y calizas (cohesión = 2.338 MPa, ángulo de fricción = 56.41°).

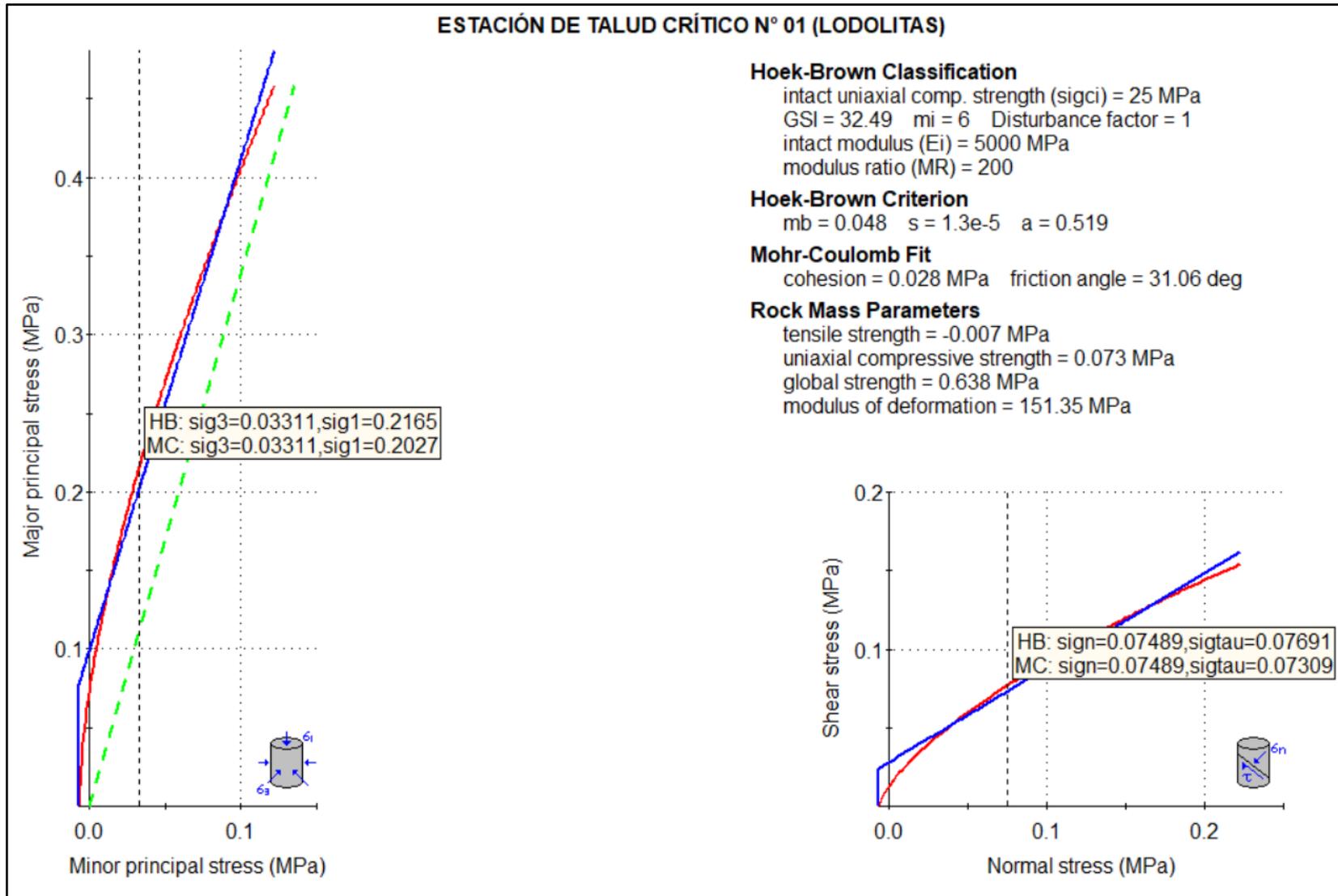


Figura 13. Análisis de las propiedades geomecánicas de las lodolitas en la ESTC-01.

ESTACIÓN DE TALUD CRÍTICO N° 01 (CALIZAS)

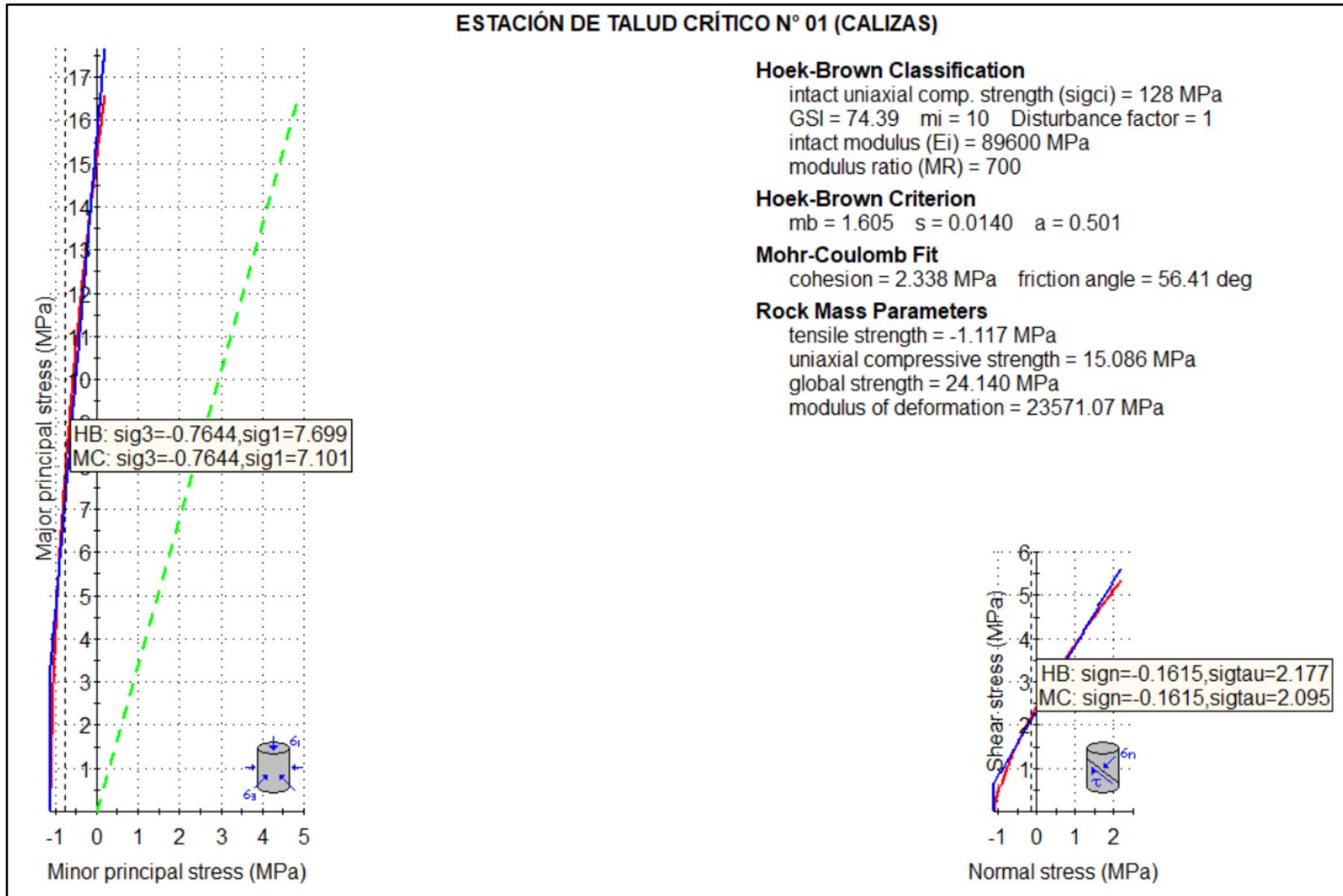


Figura 14. Análisis de las propiedades geomecánicas de las calizas en la ESTC-01.

En las figuras mostradas anteriormente se observa un gráfico biaxial, en el cual el eje de las abscisas muestra el esfuerzo principal mayor y el eje de las ordenadas el esfuerzo principal menor.

La línea de color azul representa la gráfica de Mohr-Coulomb y la línea de color rojo representa la gráfica de Hoek-Brown. Además, la línea punteada de color verde, representa la gráfica de Mogi, la cual define la relación entre las tensiones principales efectivas mayor y menor en el que se produce la transición de la rotura frágil a la rotura dúctil; entonces, como se observaría que la envolvente de tensiones principales queda encima de la línea de Mogi, esto nos indica un tipo de rotura frágil tanto en las lodolitas como en las calizas.

Además de ello, en las lodolitas se presenta una resistencia a la tracción igual a -0.007 MPa, una resistencia compresiva uniaxial de 0.073 MPa, una resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso igual a 0.638 MPa y un módulo de deformación de 151.35 MPa. En las calizas se presenta una resistencia a la tracción igual a -1.117 MPa, una resistencia compresiva uniaxial de 15.086 MPa, una resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso igual a 24.140 MPa y un módulo de deformación de 23571.07 MPa.

En cuanto al análisis cinemático realizado con el software Dips v.7, se observa que hay una probabilidad de 0% para que exista una rotura planar; mientras que, en el análisis de rotura en cuña existe una probabilidad de $26,25\%$ con intersecciones críticas entre la familia de discontinuidades 2 y 3, con orientación noroeste.

El análisis con el software Slide v.6, permite calcular el factor de seguridad de los taludes, en el cual se utilizó tres métodos de análisis tales como Bishop Simplificado, GLE/Morgenstern-Price y Spencer. Con respecto a la superficie de análisis, se realizó con no circular ya que se aplica en rocas.

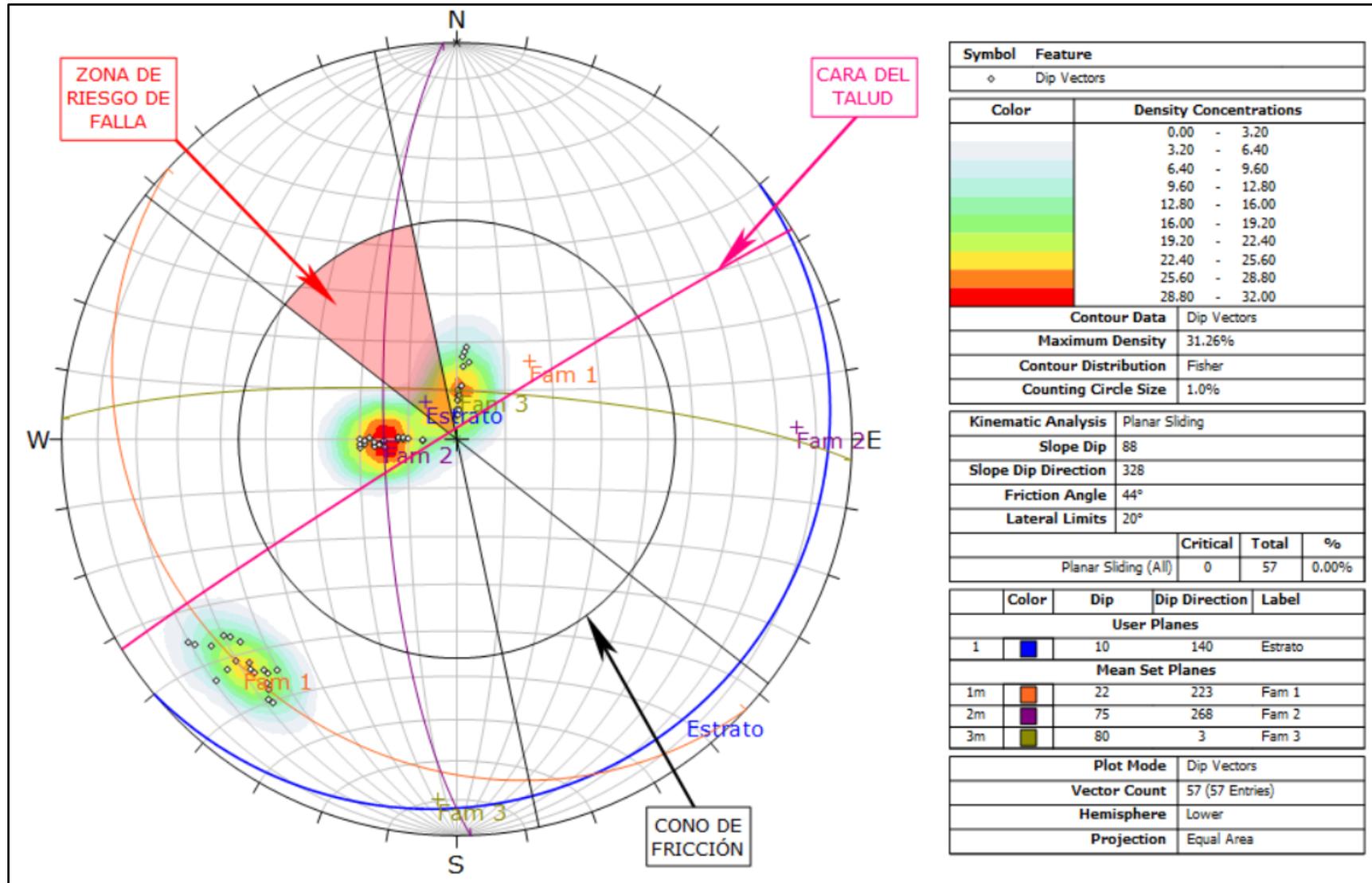


Figura 15. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-01.

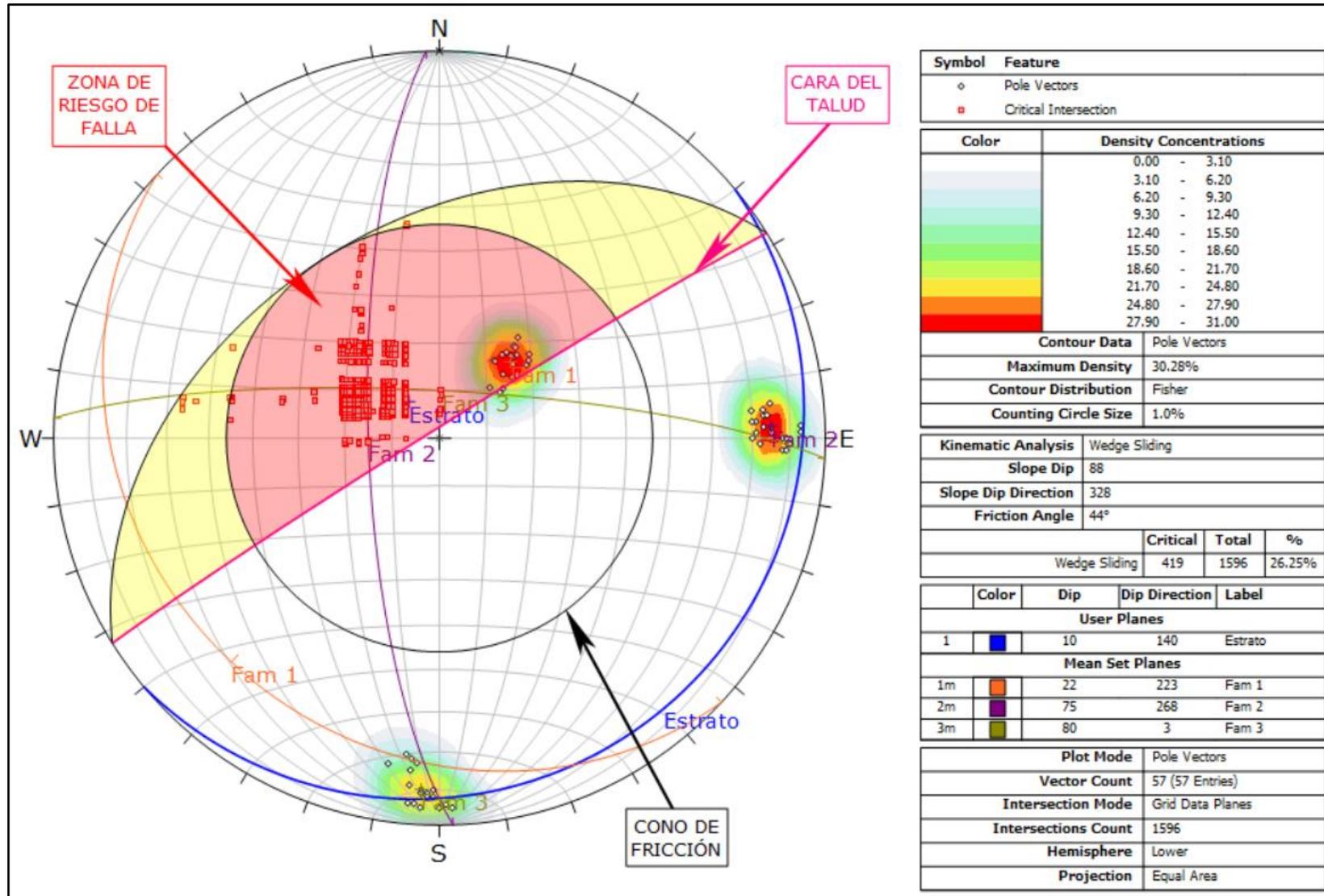


Figura 16. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-01.

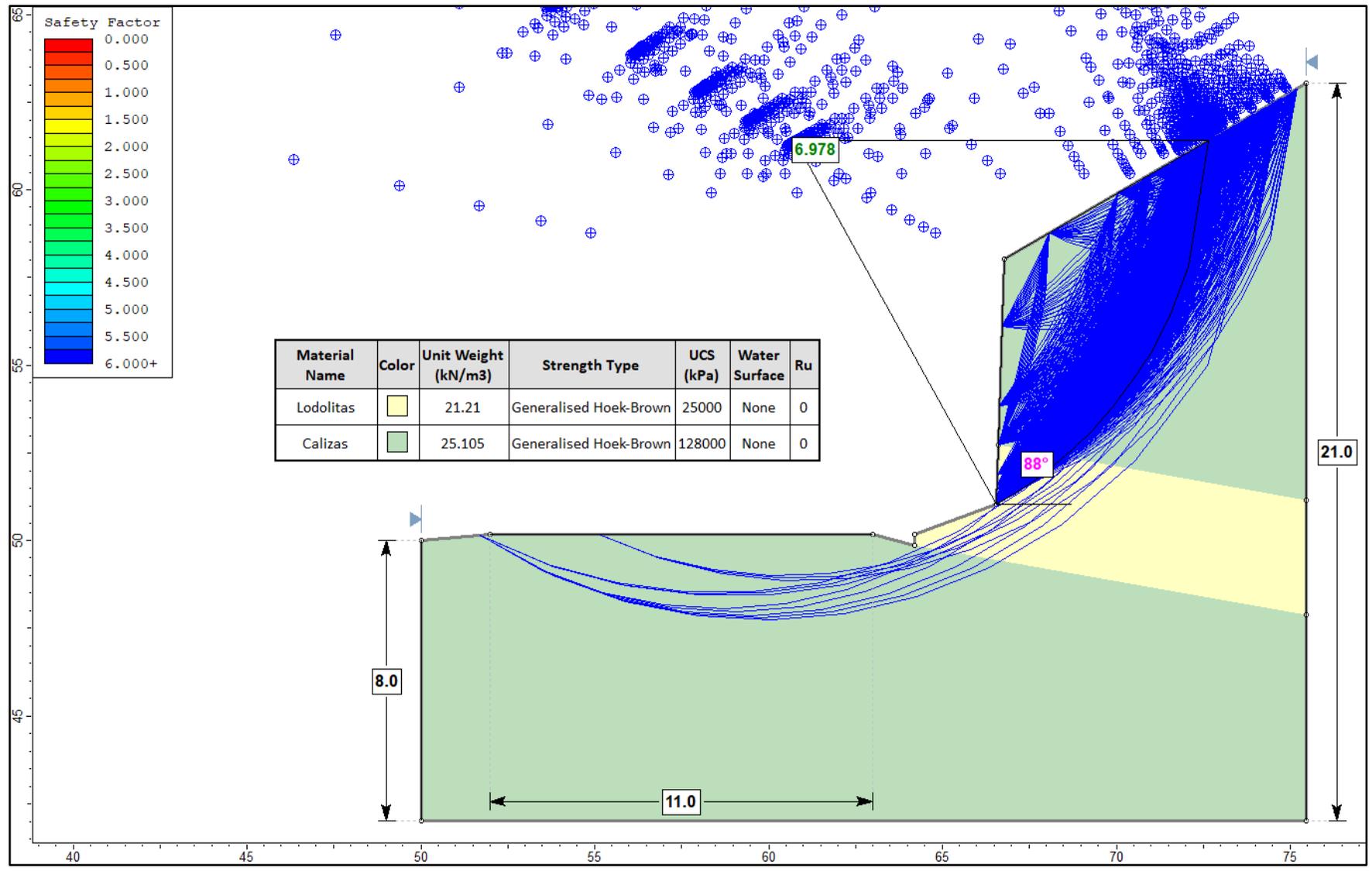


Figura 17. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-01.

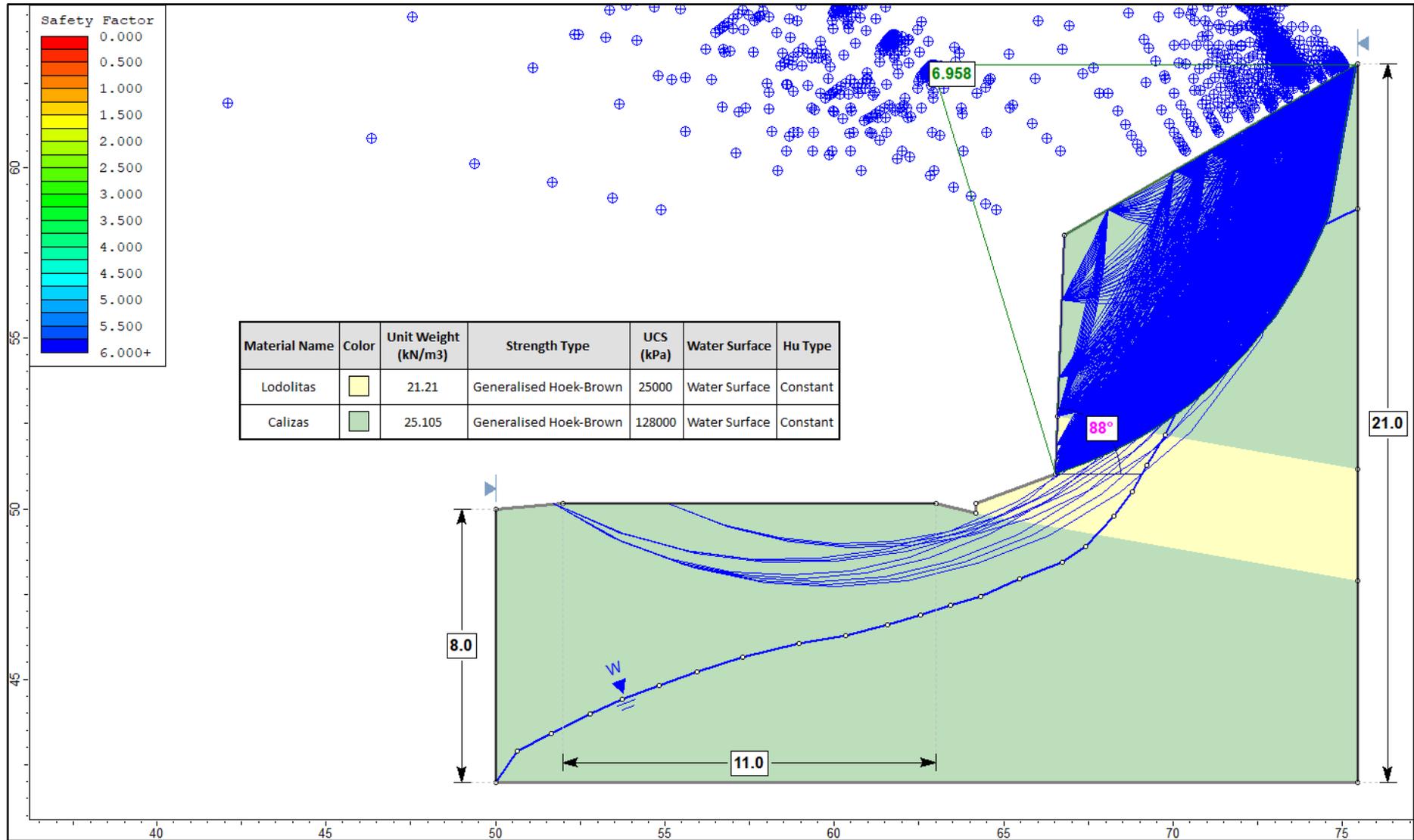


Figura 18. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-01.

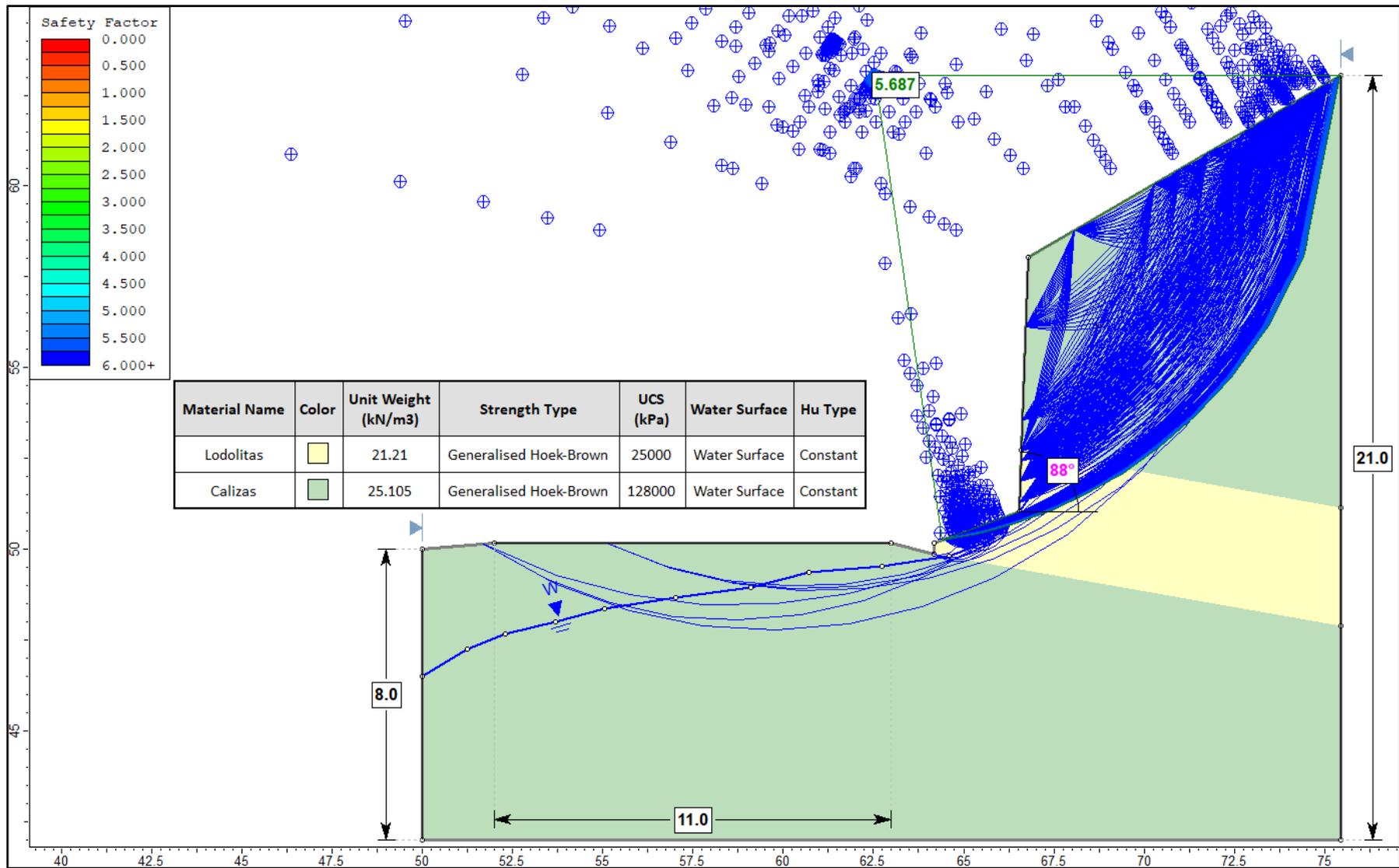


Figura 19. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-01.

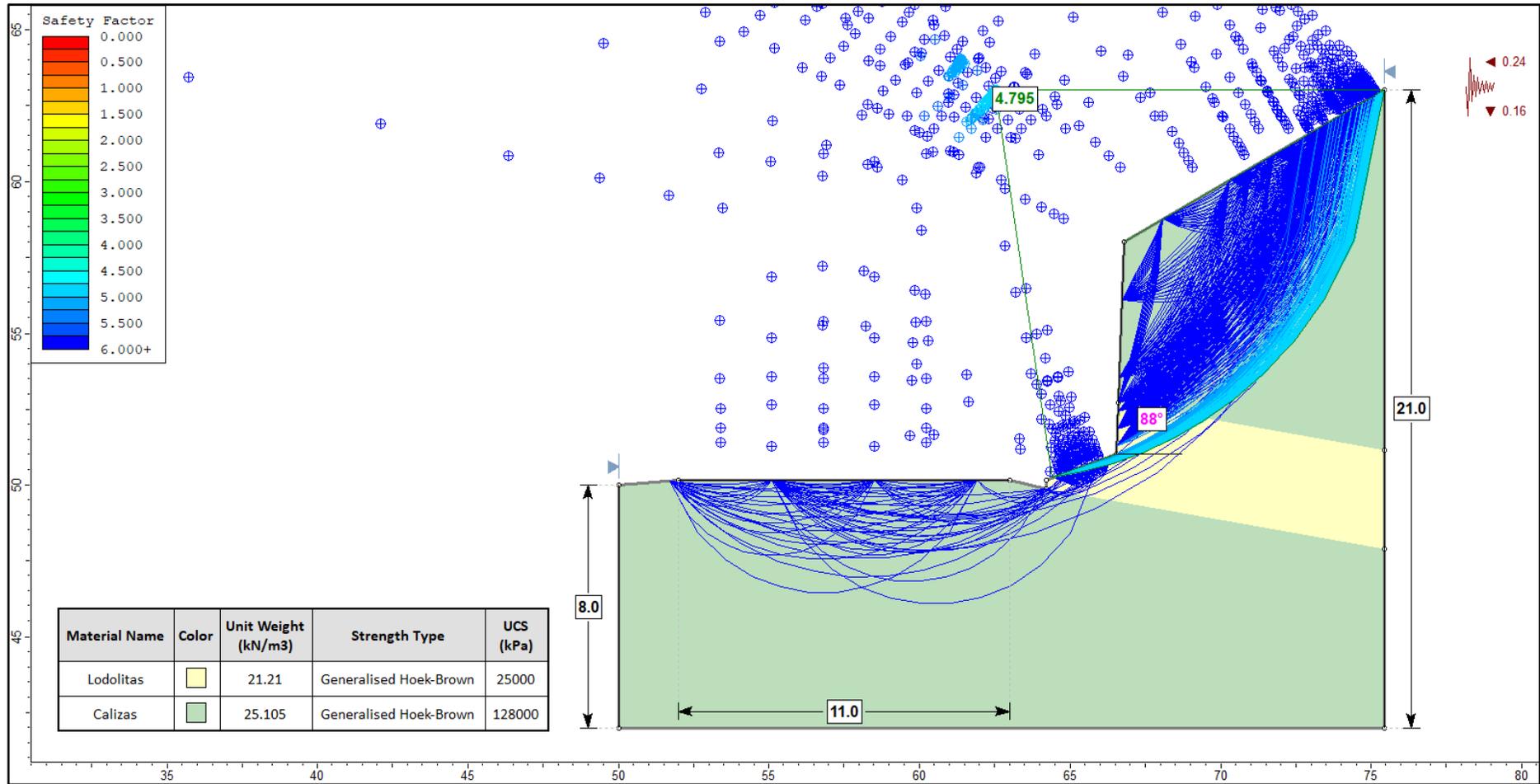


Figura 20. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en la ESTC-01.

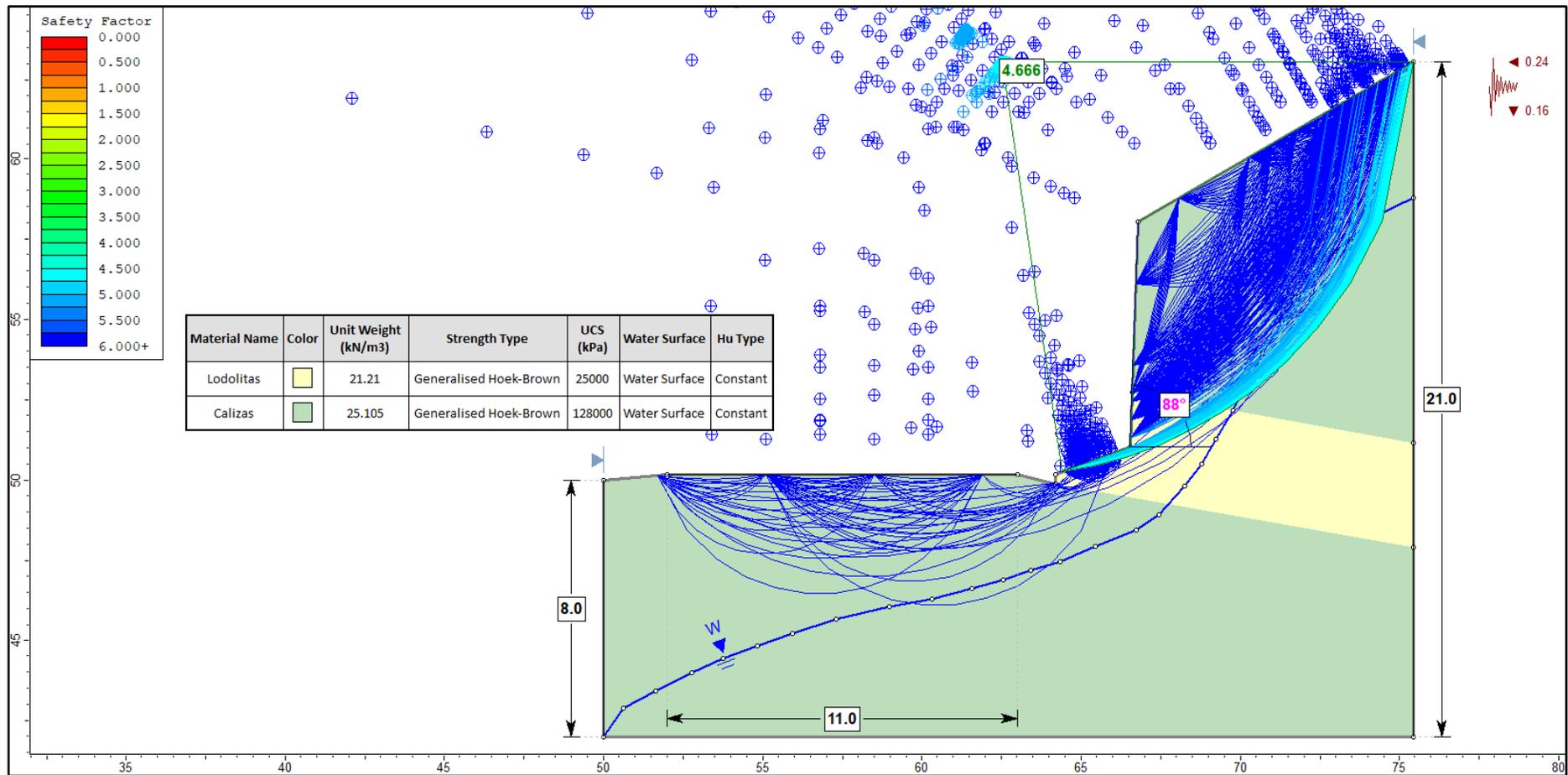


Figura 21. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-01.

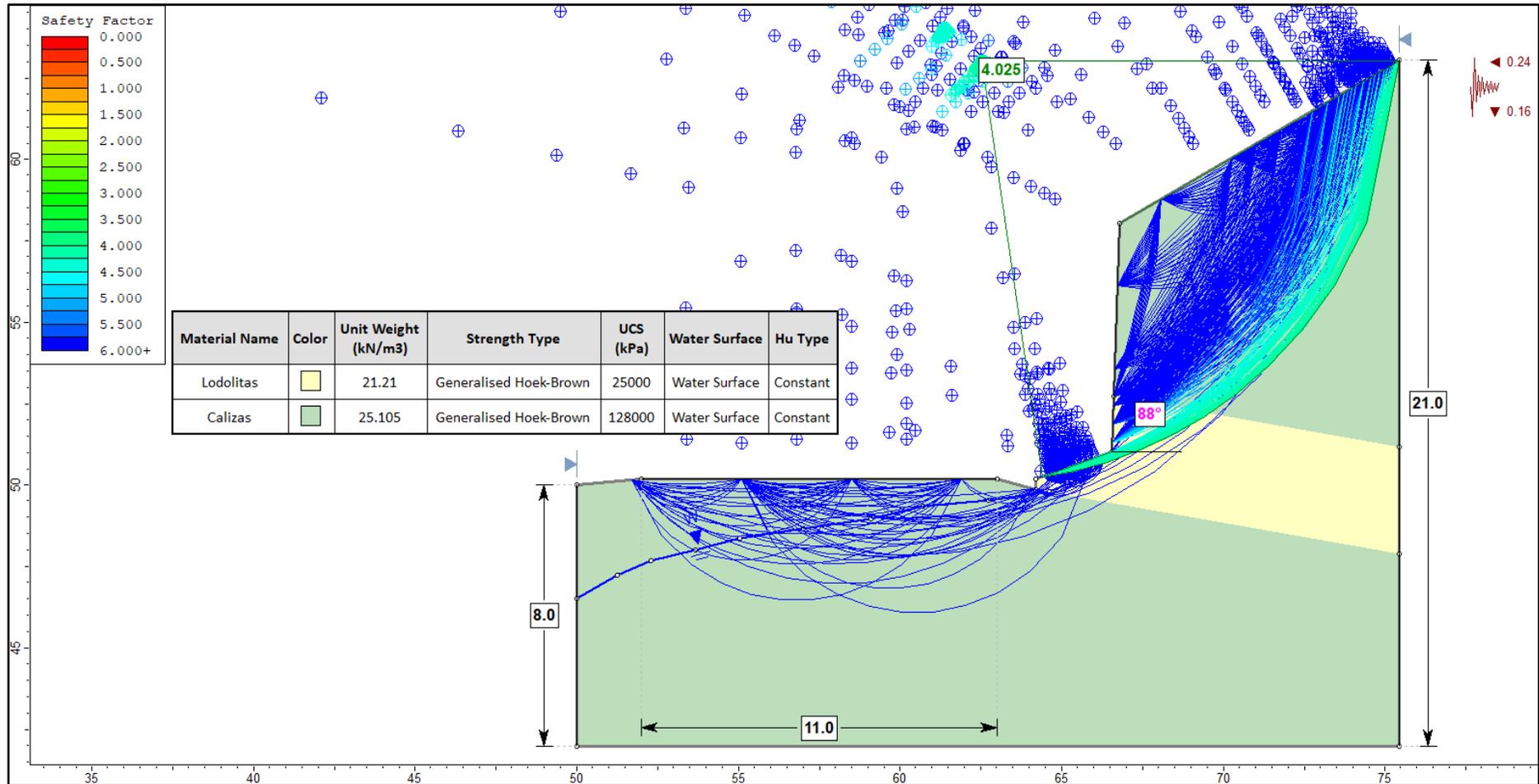


Figura 22. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-01.

3.9.2 Estación de Talud Crítico 02 (ESTC-02)

Esta estación se encuentra ubicado al margen derecho de la carretera entre las progresivas Km 106+080 – Km 106+095, y a su vez, se ubica dentro de la Formación Tablazo (Kit) que consta de calizas margosas, lodolitas y areniscas calcáreas. Presenta un grado de meteorización moderada y un grado de fracturamiento moderado presentando hasta tres familias de discontinuidades. El talud tiene una altura de 16 m con una inclinación de 78°, la cresta mantiene la morfología natural del terreno y se tiene un ancho de carretera de 11 m.



Foto 14. Perfil de la ESTC-02 compuesto por calizas, lodolitas y areniscas.

Tabla 22. Datos del talud y macizo rocoso en la ESTC-02.

MACIZO ROCOSO				
Litología / Formación		Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI
Calizas, lodolitas y areniscas / Fm. Tablazo		Moderado	Medio	Bloq. regular
GEOMETRÍA DEL TALUD				
Altura	Pie	Orientación	Talud	Cabeza
16 m	11 m	D	78	35
		DD	10	10

Para el cálculo de la resistencia a la compresión uniaxial, se utilizó el Martillo de Schmidt (esclerómetro), realizando las medidas en los tres tipos de roca presentes en el talud, además, según el análisis de laboratorio se tiene las densidades para las lodolitas de 20,12 kN/m³, areniscas calcáreas de 22,66 kN/m³ y calizas margosas de 23,25 kN/m³.

Teniendo la información mencionada, se realizó la corrección de las medidas en el gráfico de Miller, obteniendo un valor estimado de la resistencia a la compresión uniaxial (RCU); donde, $R_L = 22$ (ISRM revisada) es de 25 MPa, $R_L = 37$ (ISRM revisada) es de 55 MPa y $R_L = 42$ (ISRM revisada) es de 74 MPa.

Tabla 23. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-02.

LECTURAS	LODOLITAS		ARENISCAS CALCÁREAS		CALIZAS	MARGOSAS
	Medidas	Corregidas	Medidas	Corregidas	Medidas	Corregidas
Lectura 1	15	22	35	36	40	41
Lectura 2	16	23	35	36	40	41
Lectura 3	16	23	35	36	40	41
Lectura 4	15	22	36	37	40	41
Lectura 5	15	22	34	36	40	41
Lectura 6	15	22	35	36	43	43
Lectura 7	16	23	34	36	42	42
Lectura 8	15	22	34	36	42	42
Lectura 9	16	23	38	39	42	42
Lectura 10	15	22	38	39	42	42
Lectura 11	17	21	37	38	41	42
Lectura 12	17	21	36	37	41	42
Lectura 13	16	20	35	36	40	41
Lectura 14	17	21	35	36	39	40
Lectura 15	17	21	35	36	40	41
Lectura 16	17	21	35	36	42	42
Lectura 17	17	21	35	36	42	42
Lectura 18	17	21	37	38	44	44
Lectura 19	16	20	34	36	45	45
Lectura 20	16	20	34	36	44	44
Promedio		22		37		42
RCU		25 MPa		55 MPa		74 MPa

Para el cálculo del RQD se aplica una fórmula, razón por la cual se procedió a calcular, obteniendo el RQD en las lodolitas de 26,74%, el RQD en las areniscas calcáreas de 67,35% y el RQD en las calizas margosas de 77,61%.

Tabla 24. Cálculo del RQD para la ESTC-02.

RQD=100e^{-0,1λ}(0,1λ+1)				
ROCAS	ND	L	λ	RQD
Lodolitas	26	1,0	26,0	26,74%
Areniscas calcáreas	14	1,2	11,7	67,35%
Calizas margosas	16	1,8	8,9	77,61%

En cuanto al cálculo del RMR₈₉, según la valoración de la Tabla 25, las lodolitas se clasifican dentro de la Clase IV, un valor RMR₈₉ de 40 y un índice de calidad de la roca Mala; las areniscas calcáreas (ver Tabla 26) se clasifican dentro de la Clase III, un valor RMR₈₉ de 57 y un índice de calidad de la roca Regular; mientras que las calizas margosas (ver Tabla 27) se clasifican dentro de la Clase II, un valor RMR₈₉ de 64 y un índice de calidad de la roca Buena.

Tabla 25. Cálculo del RMR₈₉ para las lodolitas en la ESTC-02.

RANGO DE VALORES					
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 – 250 (12)	50 – 100 (7)	25 – 50 (4)	5 – 25 (2) 1 – 5 (1) < 1 (0)
RQD	90 – 100 % (20)	75 – 90 % (17)	50 – 75 % (13)	25 – 50 % (8)	< 25 % (3)
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	6 – 20 cm (8)	< 6 cm (5)
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1) > 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1) > 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1) Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2) Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1) Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. Húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4) Agua fluyendo (0)	
VALOR TOTAL RMR	40				

Tabla 26. Cálculo del RMR₈₉ para las areniscas calcáreas en la ESTC-02.

RANGO DE VALORES					
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 – 250 (12)	50 – 100 (7)	25 – 50 (4)	5 – 25 (2) 1 – 5 (1) < 1 (0)
RQD	90 – 100 % (20)	75 – 90 % (17)	50 – 75 % (13)	25 – 50 % (8)	< 25 % (3)
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	6 – 20 cm (8)	< 6 cm (5)
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1) > 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1) > 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1) Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2) Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1) Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. Húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)
VALOR TOTAL RMR			57		

Tabla 27. Cálculo del RMR₈₉ para las calizas margosas en la ESTC-02.

RANGO DE VALORES					
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 – 250 (12)	50 – 100 (7)	25 – 50 (4)	5 – 25 (2) 1 – 5 (1) < 1 (0)
RQD	90 – 100 % (20)	75 – 90 % (17)	50 – 75 % (13)	25 – 50 % (8)	< 25 % (3)
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 – 2 m (15)	0.2 – 0.6 m (10)	6 – 20 cm (8)	< 6 cm (5)
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 – 3 m (4)	3 – 10 m (2)	10 – 20 m (1) > 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 – 1.0 mm (4)	1 – 5 mm (1) > 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1) Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2) Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1) Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. Húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)
VALOR TOTAL RMR			64		

Para el cálculo del GSI se necesita el valor de $JCOND_{89}$, el cual se obtiene mediante la suma de cada valor de la condición de las discontinuidades (ver Tabla 25, Tabla 26 y Tabla 27), mientras que el valor de RQD se extrae de la Tabla 24.

Tabla 28. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.

GSI = 1,5 JCOND₈₉ + RQD/2								
Roca	Valoración de la Condición de las Discontinuidades						RQD	GSI
	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	JCOND ₈₉		
Lodolitas	6	1	1	2	3	13	26,74	32,87
Areniscas calcáreas	6	4	3	4	3	20	67,35	63,68
Calizas margosas	6	5	3	6	3	23	77,61	73,31

Mediante el software RocData v.4 se determinó las propiedades geomecánicas de las lodolitas, el cual proporciona los parámetros de Hoek-Brown ($m_b=0.050$, $s=0.0093$, $a=0,518$), Mohr-Coulomb (cohesión = 0.042 MPa, ángulo de fricción = 26.02°); en las areniscas los parámetros de Hoek-Brown ($m_b=1.270$, $s=0.0024$, $a=0,502$), Mohr-Coulomb (cohesión = 0.375 MPa, ángulo de fricción = 56.31°) y en las calizas los parámetros Hoek-Brown ($m_b=1.486$, $s=0.0117$, $a=0,501$), Mohr-Coulomb (cohesión = 1.245 MPa, ángulo de fricción = 54.17°).

En la Figura 23 se observa una rotura frágil con transición a dúctil, mientras que en las figuras 24 y 25 presentan una rotura frágil. Las lodolitas presentan la resistencia a la tracción igual a -0.007 MPa, una resistencia compresiva uniaxial de 0.076 MPa, una resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso igual a 0.650 MPa y un módulo de deformación de 153.12 MPa. En las areniscas calcáreas se presenta una resistencia a la tracción igual a -0.102 MPa, una resistencia compresiva uniaxial de 2.631 MPa, una resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso igual a 8.402 MPa y un módulo de deformación de 2293.41 MPa. En las calizas se presenta una resistencia a la tracción igual a -0.583 MPa, una resistencia compresiva uniaxial de 7.967 MPa, una resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso igual a 13.283 MPa y un módulo de deformación de 12993.16 MPa.

En el análisis cinemático con el software Dips v.7, se observa una probabilidad de 0% para que exista una rotura planar; mientras que, en el análisis de rotura en cuña existe una probabilidad de 45,38% con intersecciones críticas entre la familia de discontinuidades 1 y 2, con orientación norte.

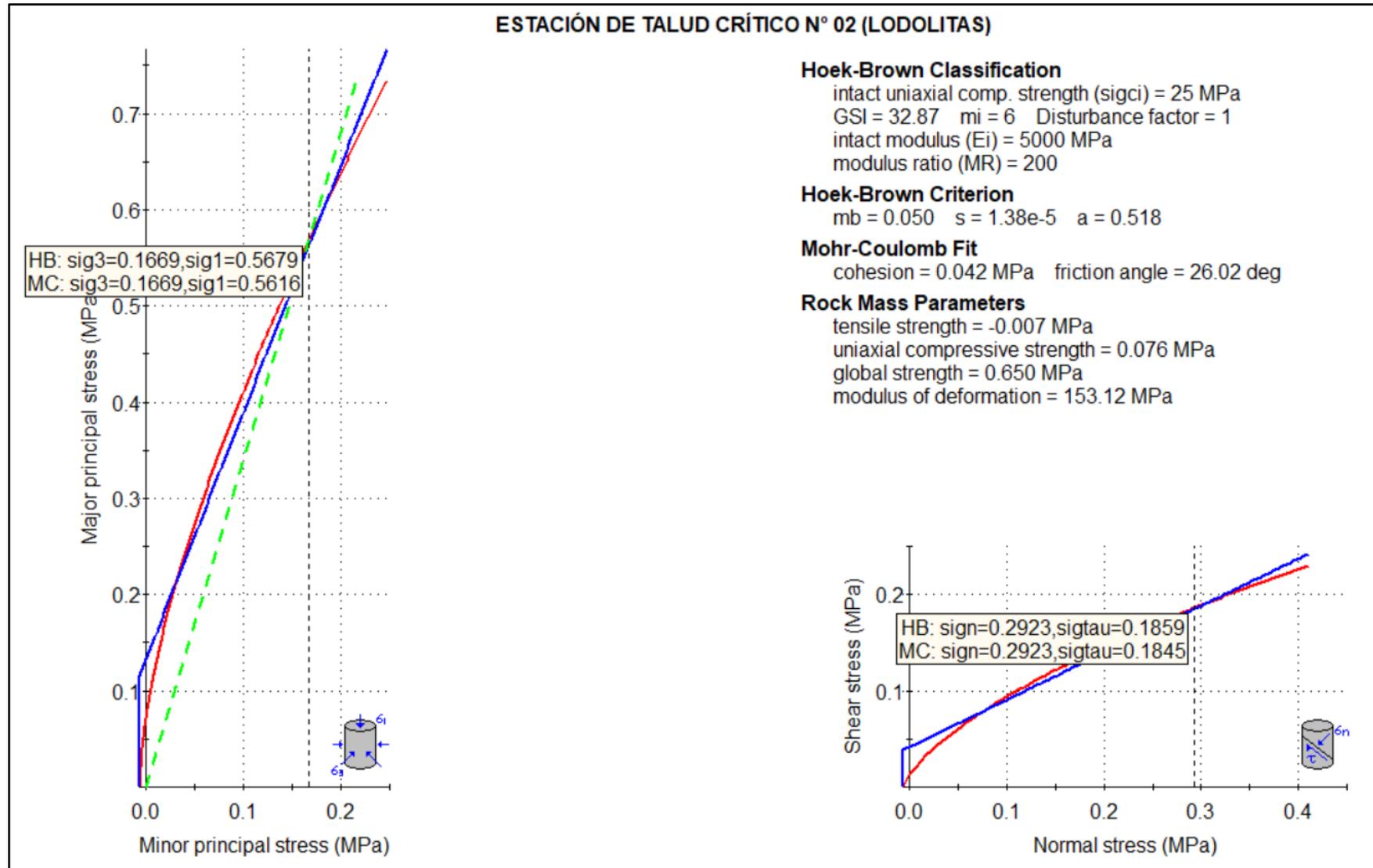


Figura 23. Análisis de las propiedades geomecánicas de las lodolitas en la ESTC-02.

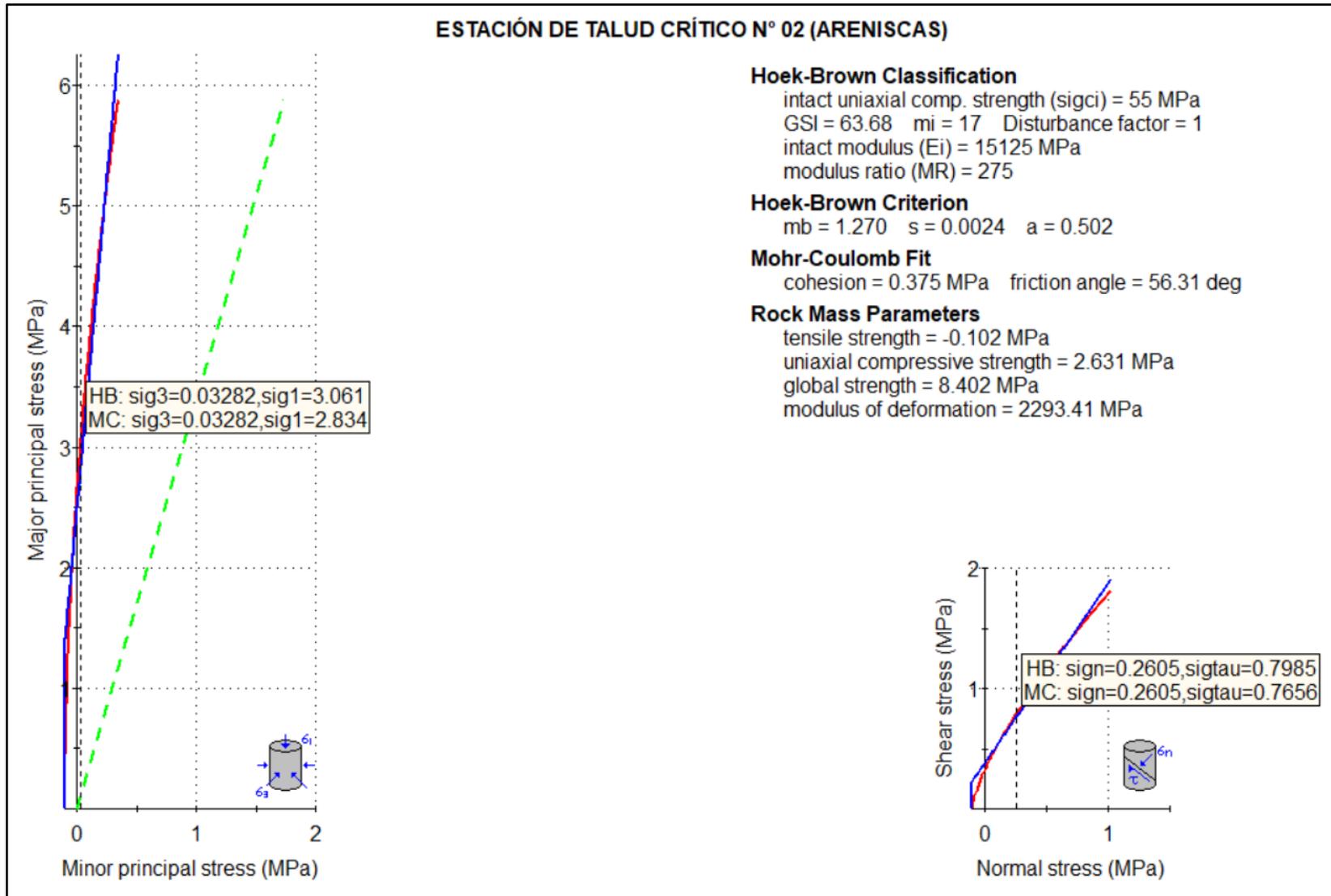


Figura 24. Análisis de las propiedades geomecánicas de las areniscas en la ESTC-02.

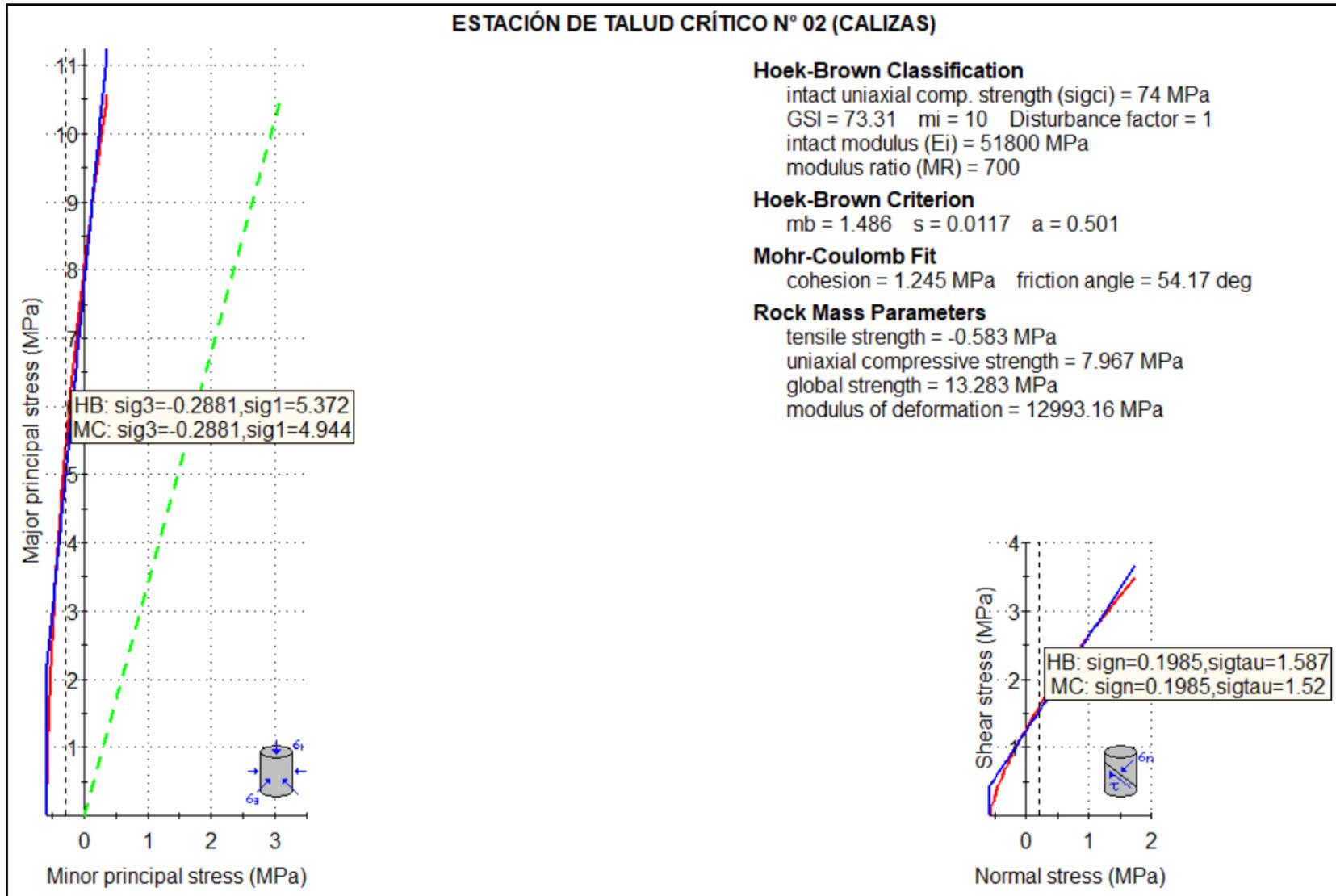


Figura 25. Análisis de las propiedades geomecánicas de las calizas en la ESTC-02.

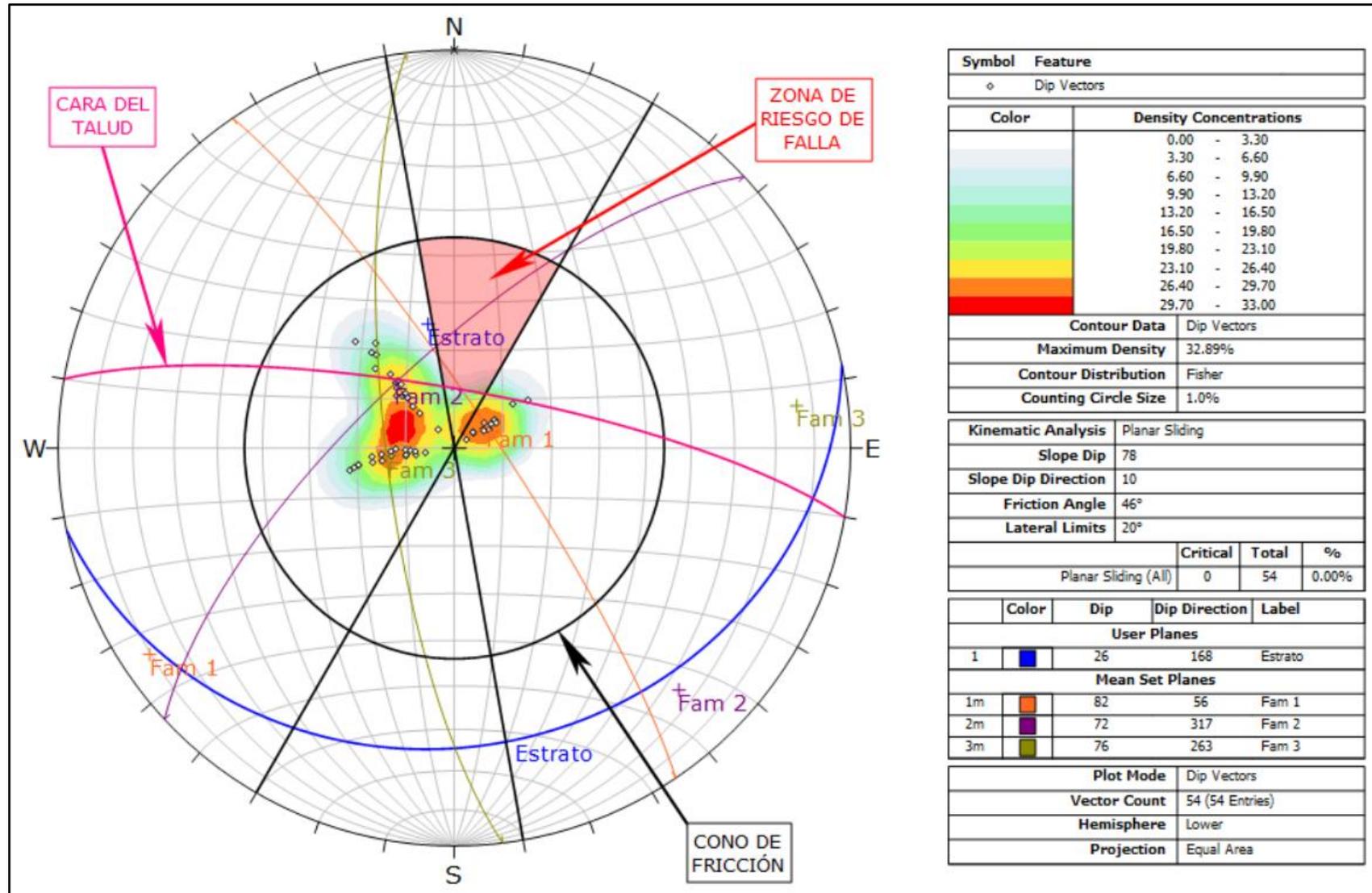


Figura 26. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-02.

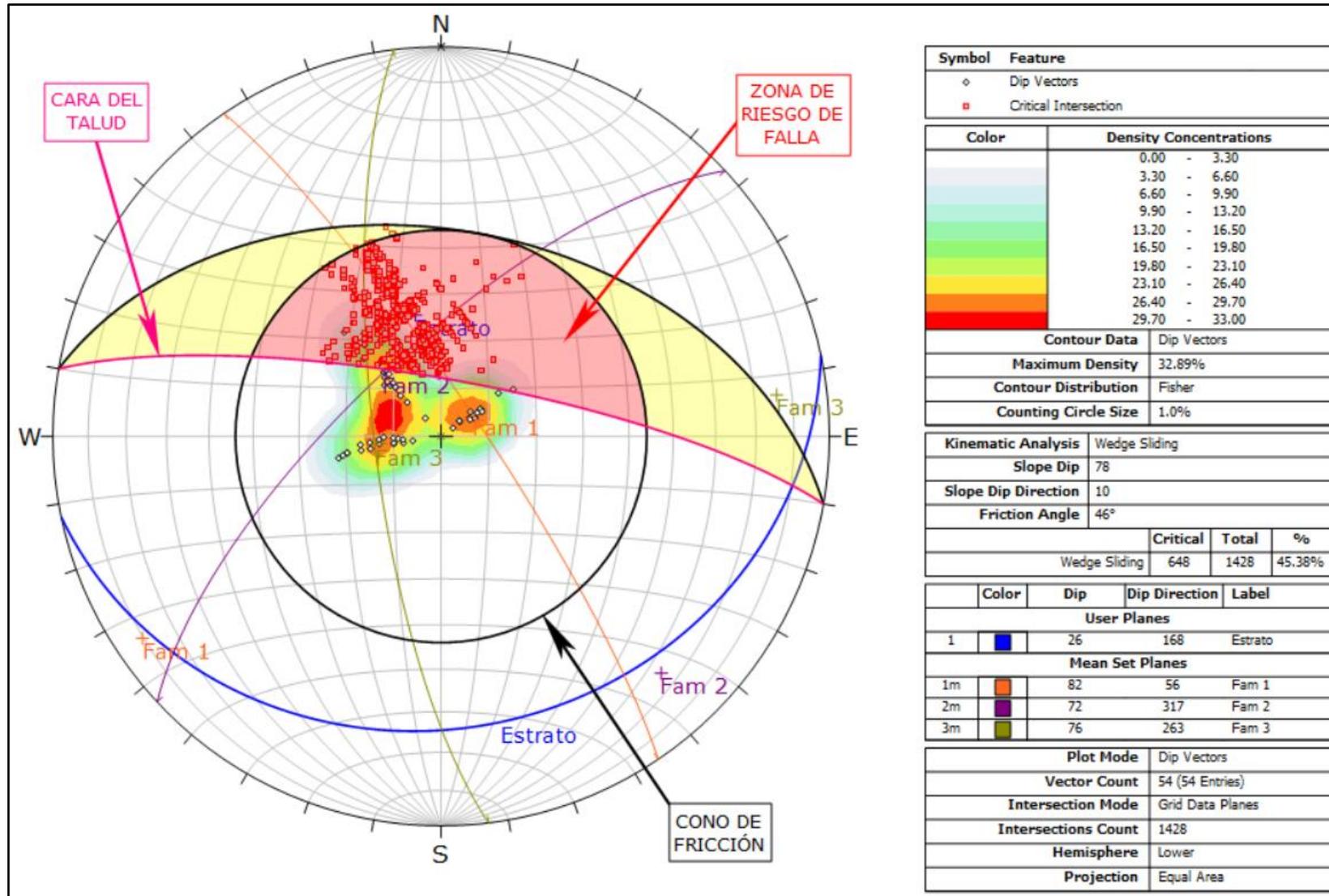


Figura 27. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-02.

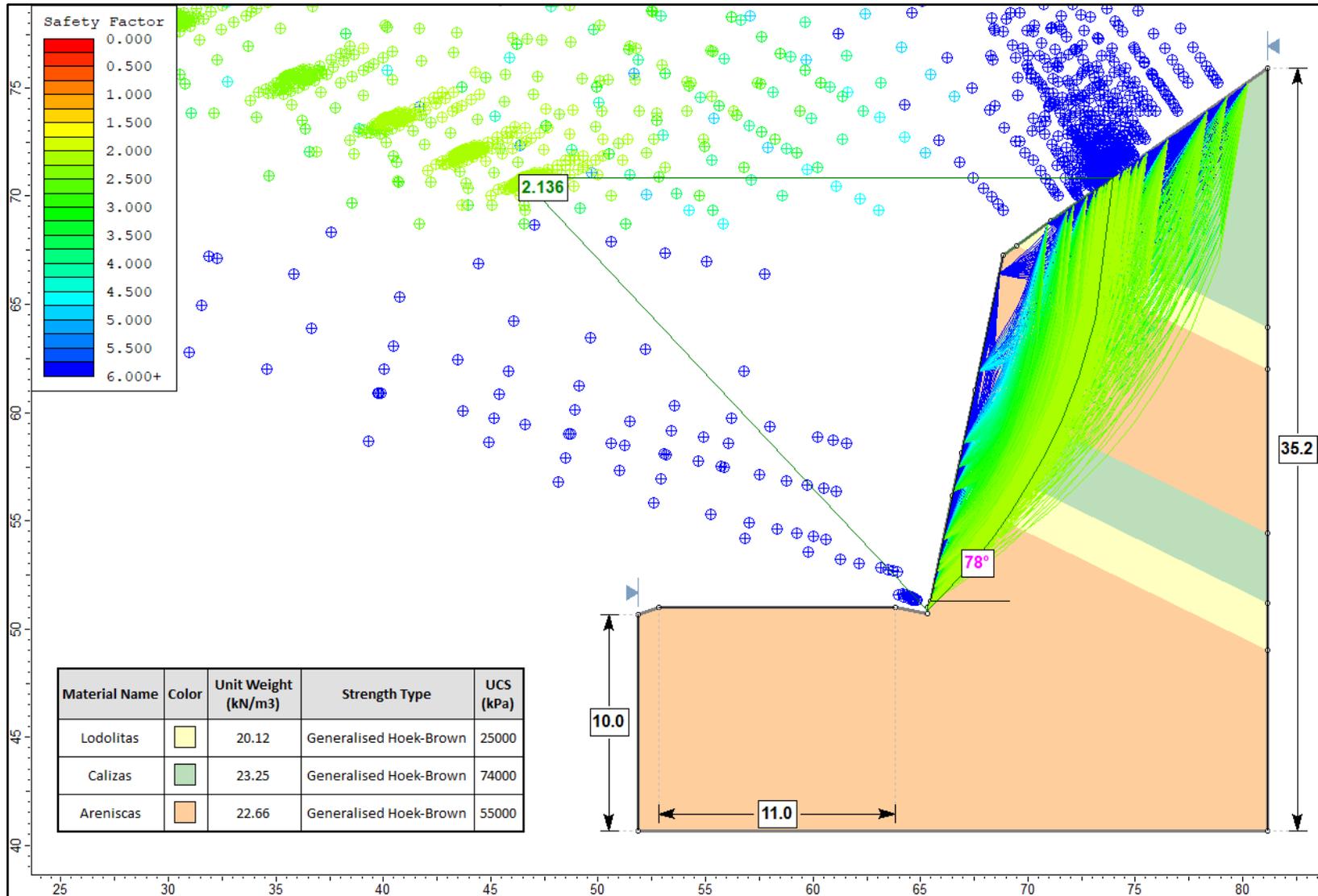


Figura 28. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-02.

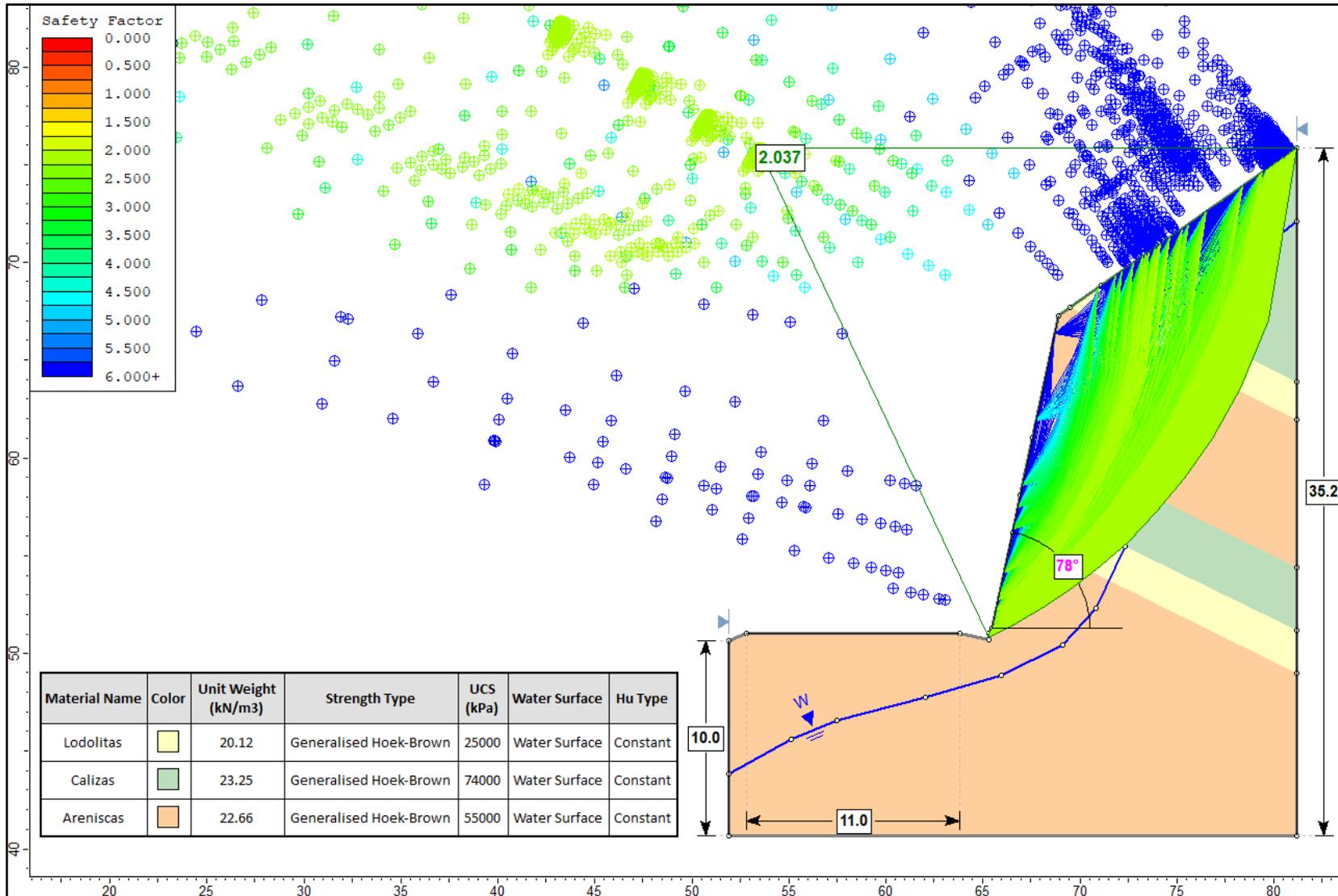


Figura 29. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-02.

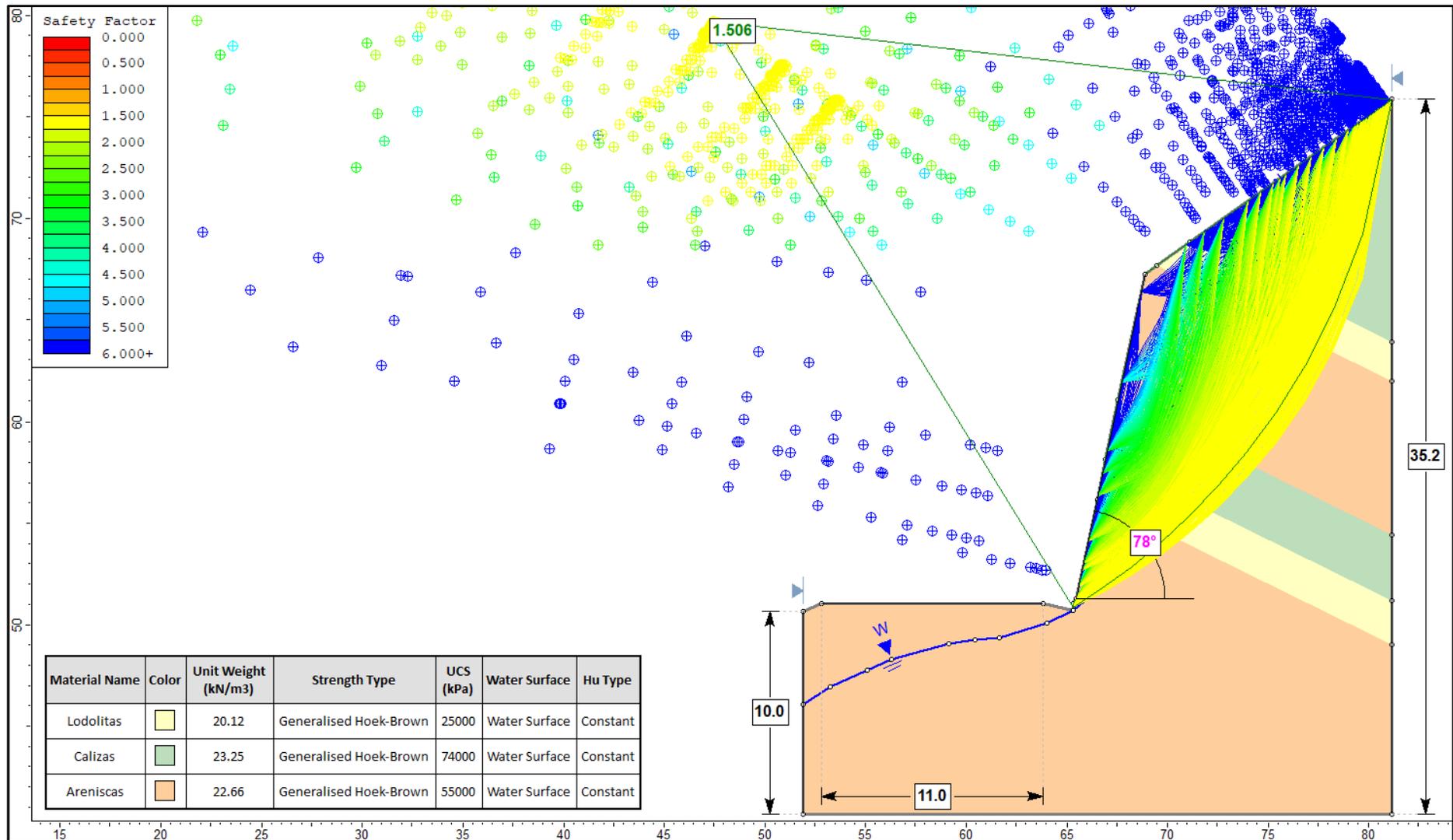


Figura 30. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-02.

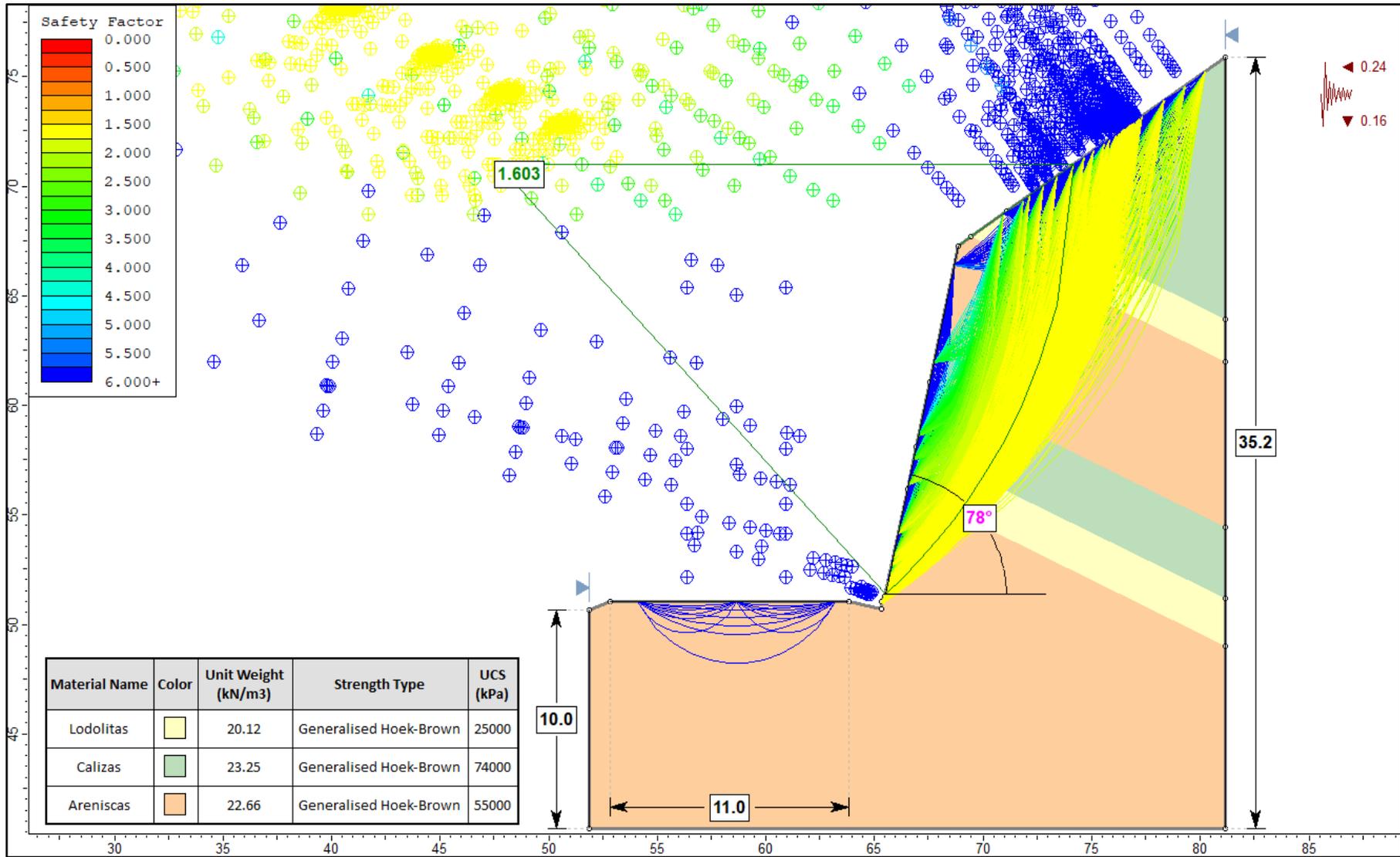


Figura 31. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en la ESTC-02.

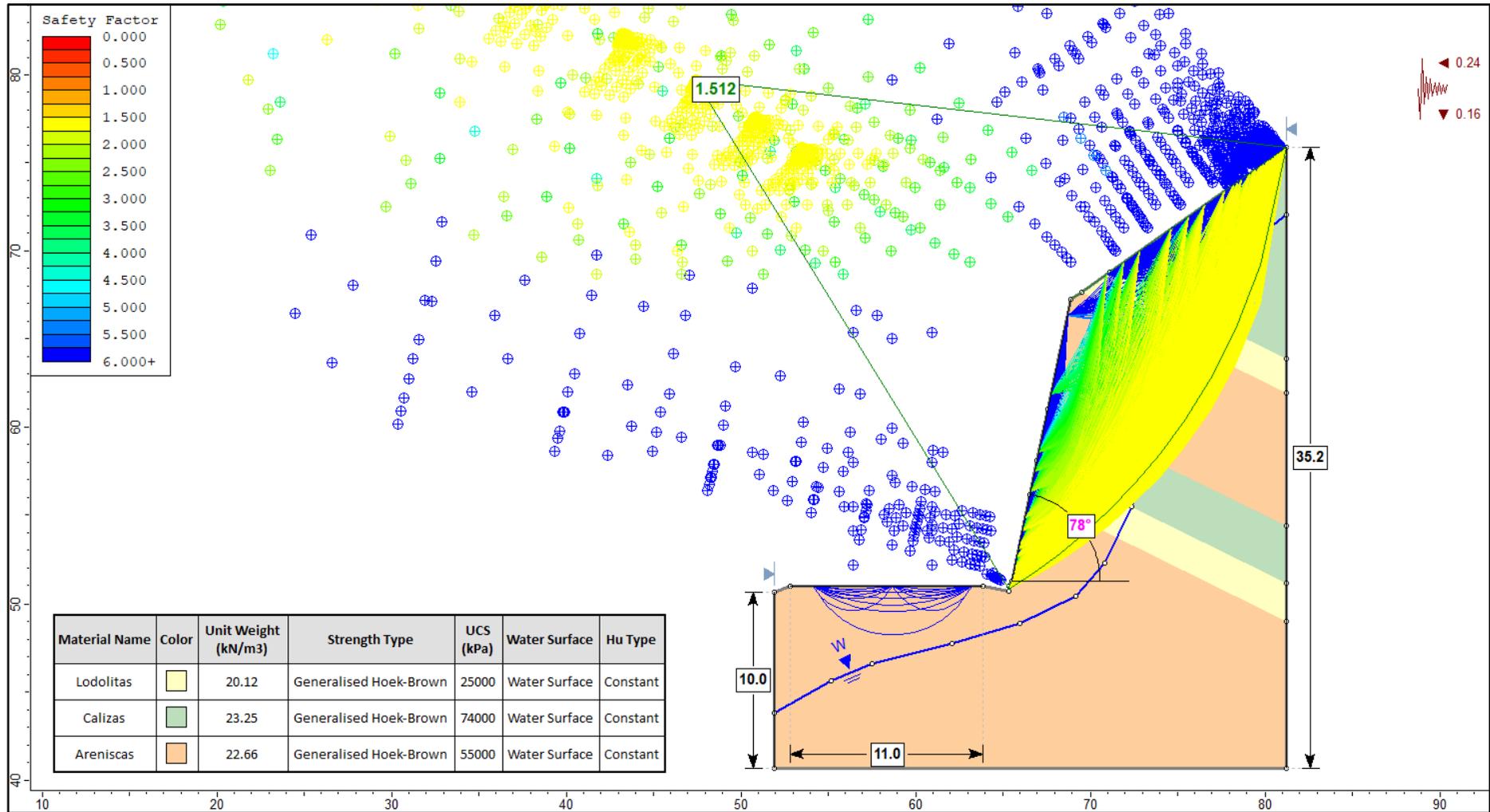


Figura 32. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-02.

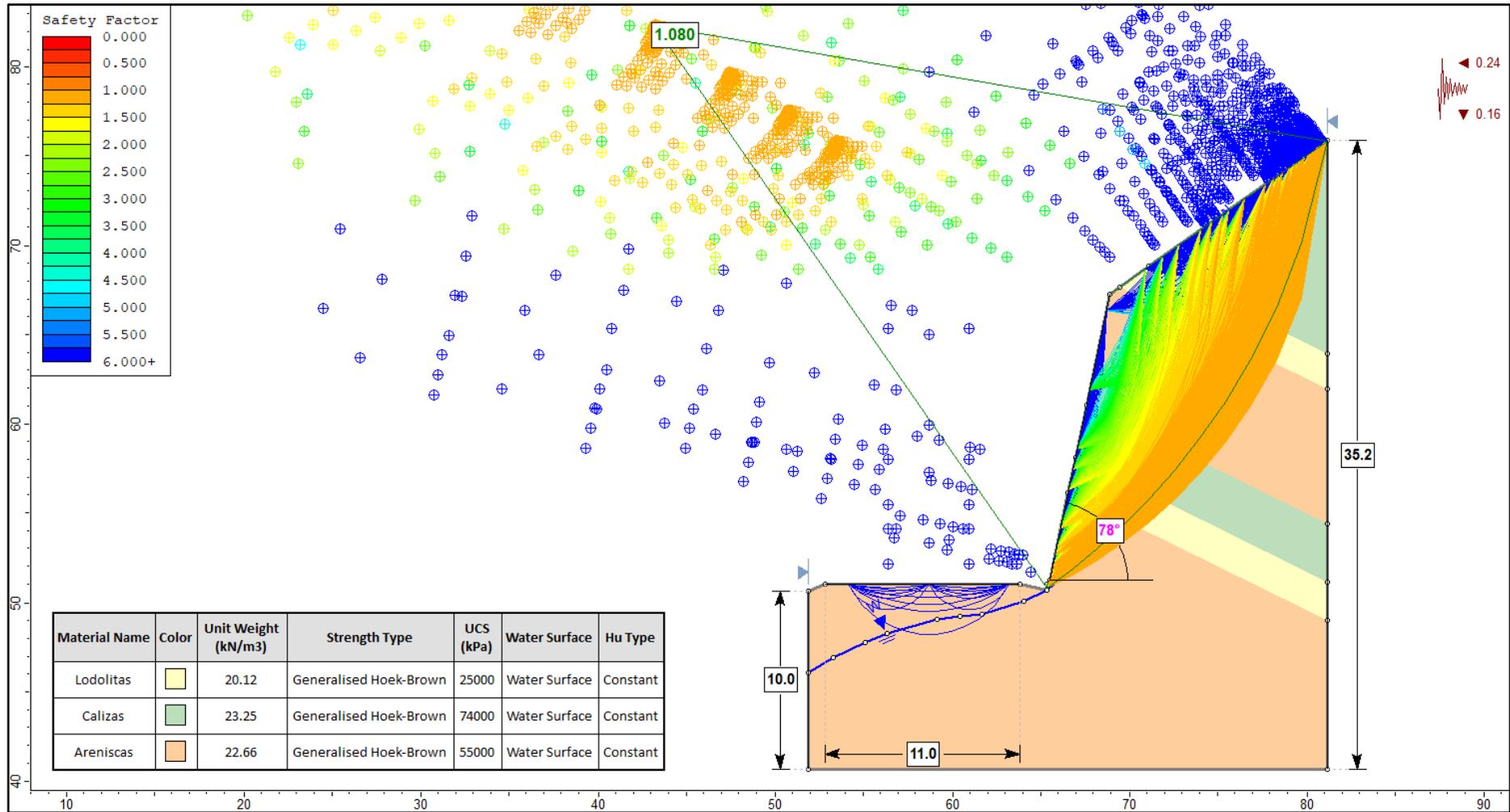


Figura 33. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-02.

3.9.3 Estación de Talud Crítico 03 (ESTC-03)

Esta estación se encuentra ubicado al margen derecho de la carretera entre las progresivas Km 106+539 – Km 106+554, y a su vez, se ubica dentro de la Formación Tablazo (Kit) que consta de calizas margosas, lodolitas y areniscas calcáreas. Presenta un grado de meteorización moderado y un grado de fracturamiento moderado presentando hasta tres familias de discontinuidades. El talud tiene una altura de 19 m con una inclinación de 67°, la cresta mantiene la morfología natural del terreno y se tiene un ancho de carretera de 11 m.



Foto 15. Perfil de la ESTC-03 compuesto por calizas, lodolitas y areniscas.

Tabla 29. Ubicación y datos del macizo rocoso en la ESTC-03.

MACIZO ROCOSO				
Litología / Formación		Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI
Calizas, lodolitas y areniscas / Fm. Tablazo		Moderado	Medio	Bloq. regular
GEOMETRÍA DEL TALUD				
Altura	Pie	Orientación	Talud	Cabeza
19 m	11 m	D	67	25
		DD	339	339

Para el cálculo de la resistencia a la compresión uniaxial, se utilizó el Martillo de Schmidt (esclerómetro), realizando las medidas en los tres tipos de roca presentes en el talud, además, según el análisis de laboratorio se obtuvo las densidades para las calizas margosas de 23,43 kN/m³, lodolitas de 20,49 kN/m³ y areniscas calcáreas de 21,59 kN/m³.

Teniendo la información mencionada, se realizó la corrección de las medidas en el gráfico de Miller, obteniendo un valor estimado de la resistencia a la compresión uniaxial (RCU); donde, $R_L = 51$ (ISRM revisada) es de 117 MPa, $R_L = 21$ (ISRM revisada) es de 25 MPa y $R_L = 41$ (ISRM revisada) es de 62 MPa.

Tabla 30. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-03.

LECTURAS	CALIZAS MARGOSAS		LODOLITAS		ARENISCAS CALCÁREAS	
	Medidas	Corregidas	Medidas	Corregidas	Medidas	Corregidas
Lectura 1	54	54	16	20	40	41
Lectura 2	53	53	16	20	39	40
Lectura 3	53	53	17	21	39	40
Lectura 4	55	55	18	22	40	41
Lectura 5	55	55	18	22	40	41
Lectura 6	54	54	18	22	40	41
Lectura 7	53	53	16	20	41	42
Lectura 8	52	52	17	21	39	40
Lectura 9	52	52	18	22	41	42
Lectura 10	52	52	17	21	41	42
Lectura 11	51	50	16	20	39	40
Lectura 12	50	49	18	22	40	41
Lectura 13	51	50	18	22	40	41
Lectura 14	50	49	18	22	39	40
Lectura 15	51	50	17	21	41	42
Lectura 16	51	50	17	21	41	42
Lectura 17	49	49	16	20	41	42
Lectura 18	49	49	18	22	40	41
Lectura 19	50	49	18	22	41	42
Lectura 20	51	50	17	21	40	41
Promedio		51		21		41
RCU	117 MPa		25 MPa		62 MPa	

Para el cálculo del RQD se aplica una fórmula, razón por la cual se procedió a calcular, obteniendo distintos valores tales como, el RQD en las calizas margosas de 78,34%, el RQD en las lodolitas de 27,13% y el RQD en las areniscas calcáreas de 66,26%.

Tabla 31. Cálculo del RQD para la ESTC-03.

RQD=100e^{-0,1λ}(0,1λ+1)				
Rocas	ND	L	λ	RQD
Calizas margosas	20	2,3	8,7	78,34
Lodolitas	31	1,2	25,8	27,13
Areniscas calcáreas	12	1,0	12,0	66,26

En cuanto al cálculo del RMR₈₉, según la valoración de la Tabla 32, las calizas se clasifican dentro de la Clase II, un valor RMR₈₉ de 73 y un índice de calidad de la roca Buena; las lodolitas (ver Tabla 33) se clasifican dentro de la Clase IV, un valor RMR₈₉ de 38 y un índice de calidad de la roca Mala; mientras que las areniscas (ver Tabla 34) se clasifican dentro de la Clase III, un valor RMR₈₉ de 58 y un índice de calidad de la roca Regular.

Tabla 32. Cálculo del RMR₈₉ para las calizas margosas en la ESTC-03.

RANGO DE VALORES					
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 - 250 (12)	50 - 100 (7)	25 - 50 (4)	5 - 25 (2) 1 - 5 (1) < 1 (0)
RQD	90 - 100 % (20)	75 - 90 % (17)	50 - 75 % (13)	25 - 50 % (8)	< 25 % (3)
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 - 2 m (15)	0.2 - 0.6 m (10)	6 - 20 cm (8)	< 6 cm (5)
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 - 3 m (4)	3 - 10 m (2)	10 - 20 m (1) > 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 - 1.0 mm (4)	1 - 5 mm (1) > 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1) Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2) Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1) Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)
VALOR TOTAL RMR	73				

Tabla 33. Cálculo del RMR₈₉ para las lodolitas en la ESTC-03.

RANGO DE VALORES					
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 - 250 (12)	50 - 100 (7)	25 - 50 (4)	5 - 25 (2) 1 - 5 (1) < 1 (0)
RQD	90 - 100 % (20)	75 - 90 % (17)	50 - 75 % (13)	25 - 50 % (8)	< 25 % (3)
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 - 2 m (15)	0.2 - 0.6 m (10)	6 - 20 cm (8)	< 6 cm (5)
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 - 3 m (4)	3 - 10 m (2)	10 - 20 m (1) > 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 - 1.0 mm (4)	1 - 5 mm (1) > 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1) Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2) Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1) Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)
VALOR TOTAL RMR	38				

Tabla 34. Cálculo del RMR₈₉ para las areniscas calcáreas en la ESTC-03.

RANGO DE VALORES					
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 - 250 (12)	50 - 100 (7)	25 - 50 (4)	5 - 25 (2) 1 - 5 (1) < 1 (0)
RQD	90 - 100 % (20)	75 - 90 % (17)	50 - 75 % (13)	25 - 50 % (8)	< 25 % (3)
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 - 2 m (15)	0.2 - 0.6 m (10)	6 - 20 cm (8)	< 6 cm (5)
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 - 3 m (4)	3 - 10 m (2)	10 - 20 m (1) > 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 - 1.0 mm (4)	1 - 5 mm (1) > 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1) Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2) Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1) Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)
VALOR TOTAL RMR	58				

Para el cálculo del GSI se necesita el valor de $JCOND_{89}$, el cual se obtiene mediante la suma de cada valor de la condición de las discontinuidades (ver Tabla 32, Tabla 33 y Tabla 34), mientras que el valor de RQD se extrae de la Tabla 31.

Tabla 35. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.

GSI = 1,5 JCOND₈₉ + RQD/2								
Roca	Valoración de la Condición de las Discontinuidades						RQD	GSI
	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	JCOND ₈₉		
Calizas margosas	6,00	4,00	3,00	6,00	5,00	24,00	78,34	75,37
Lodolitas	4,00	1,00	1,00	2,00	3,00	11,00	27,13	30,07
Areniscas calcáreas	4,00	4,00	3,00	4,00	3,00	18,00	66,26	60,13

Con el software RocData v.4, se determinó las propiedades geomecánicas de las calizas, el cual proporciona los parámetros de Hoek-Brown ($m_b=1.722$, $s=0.0165$, $a=0,501$) y Mohr-Coulomb (cohesión = 2.343 MPa, ángulo de fricción = 54.93°); en las lodolitas los parámetros de Hoek-Brown ($m_b=0.041$, $s=0.0215$, $a=0,522$) y Mohr-Coulomb (cohesión = 0.040 MPa, ángulo de fricción = 22.93°) y en las areniscas los parámetros Hoek-Brown ($m_b=0.985$, $s=0.0013$, $a=0,503$) y Mohr-Coulomb (cohesión = 0.337 MPa, ángulo de fricción = 54.96°).

Las calizas y areniscas muestran la envolvente de tensiones principales encima de la línea de Mogi, lo que indica una rotura frágil; mientras que, en las lodolitas se observa una transición de rotura frágil a dúctil. Las calizas tienen resistencia a la tracción de -1.121 MPa, resistencia compresiva uniaxial de 14.970 MPa, resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso de 23.095 MPa y módulo de deformación de 22457.32 MPa. Las lodolitas tienen resistencia a la tracción de -0.005 MPa, resistencia compresiva uniaxial de 0.057 MPa, resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso de 0.568 MPa y módulo de deformación de 141.38 MPa. Las areniscas tienen resistencia a la tracción de -0.082 MPa, resistencia compresiva uniaxial de 2.194 MPa, resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso de 8.255 MPa y módulo de deformación de 2093.51 MPa.

En el análisis cinemático con el software Dips v.7 se observa una probabilidad de 0% para que exista una rotura planar; mientras que, en el análisis de rotura en cuña existe una probabilidad de 25,08% con intersecciones críticas entre la familia de discontinuidades 2 y 3, con orientación noroeste.

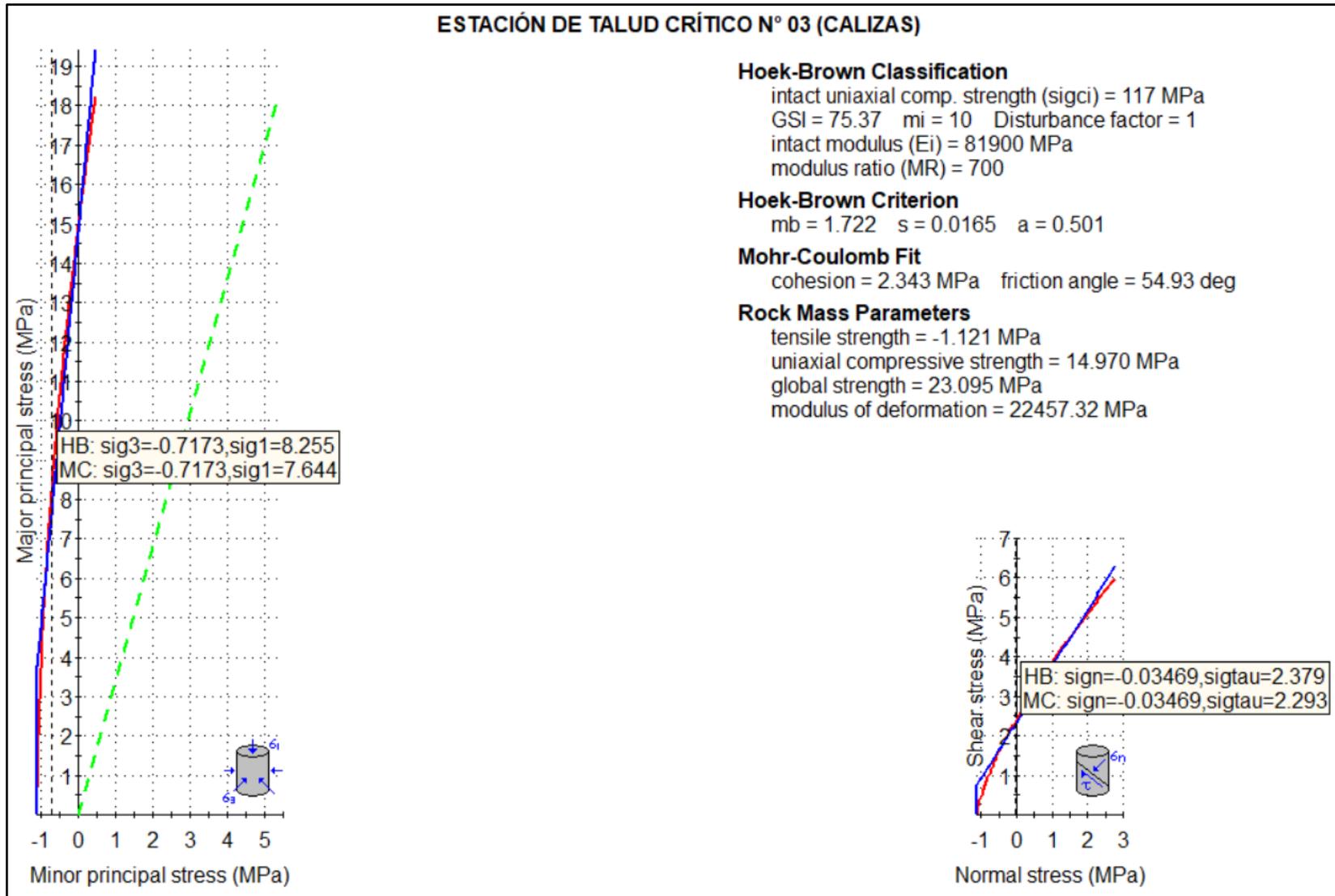


Figura 34. Análisis de las propiedades geomecánicas de las calizas en la ESTC-03.

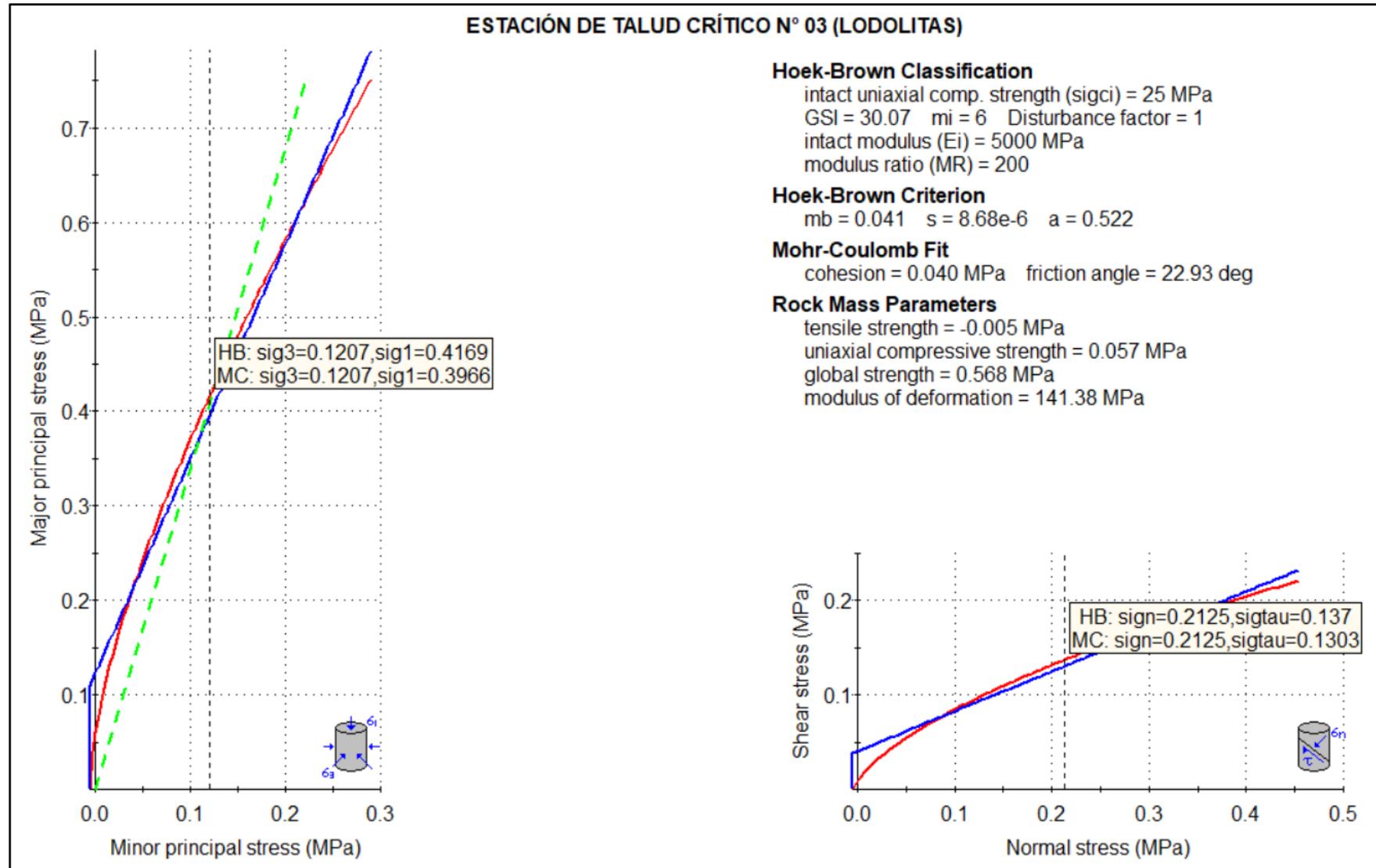


Figura 35. Análisis de las propiedades geomecánicas de las lodolitas en la ESTC-03.

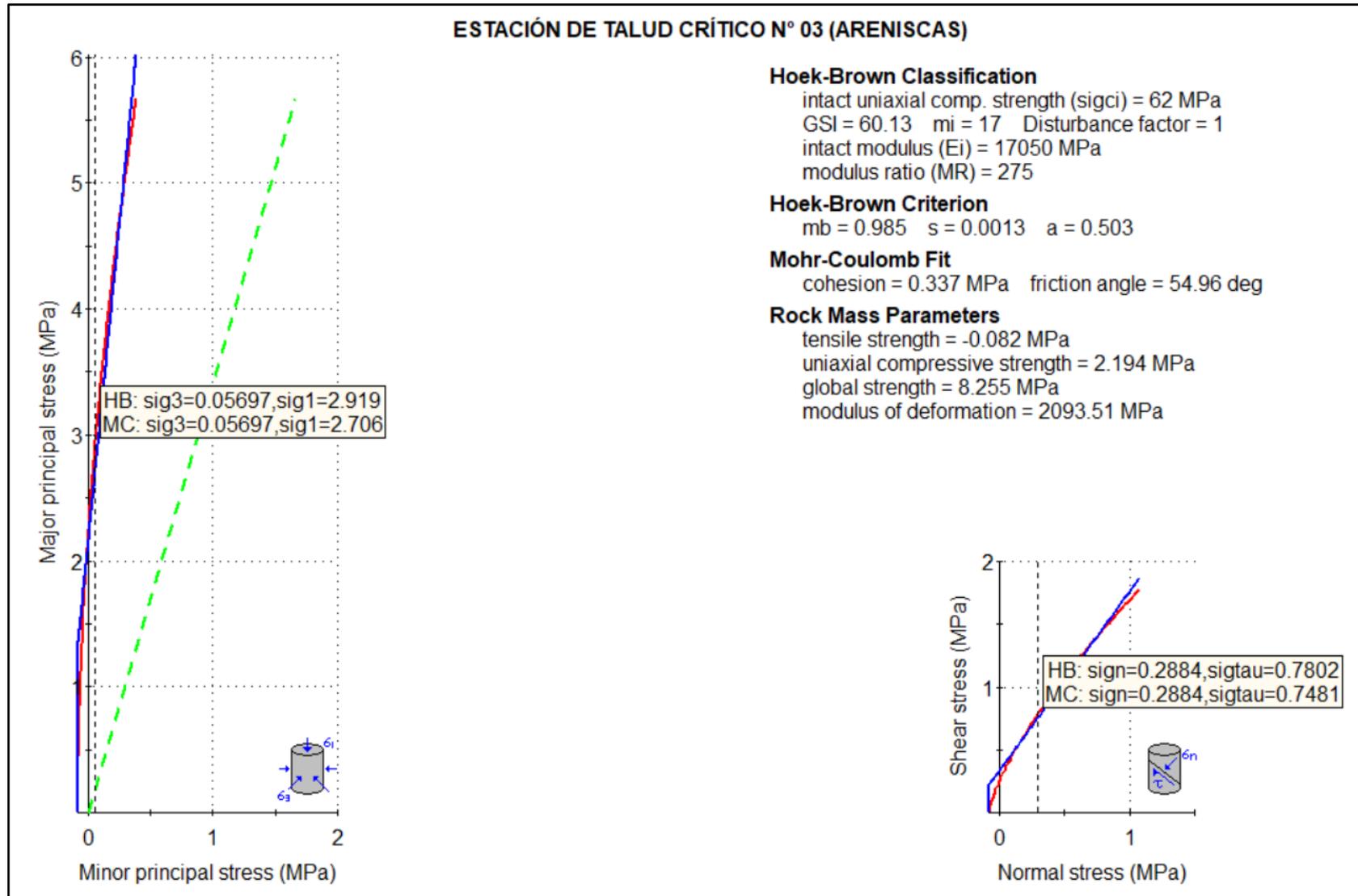


Figura 36. Análisis de las propiedades geomecánicas de las areniscas en la ESTC-03.

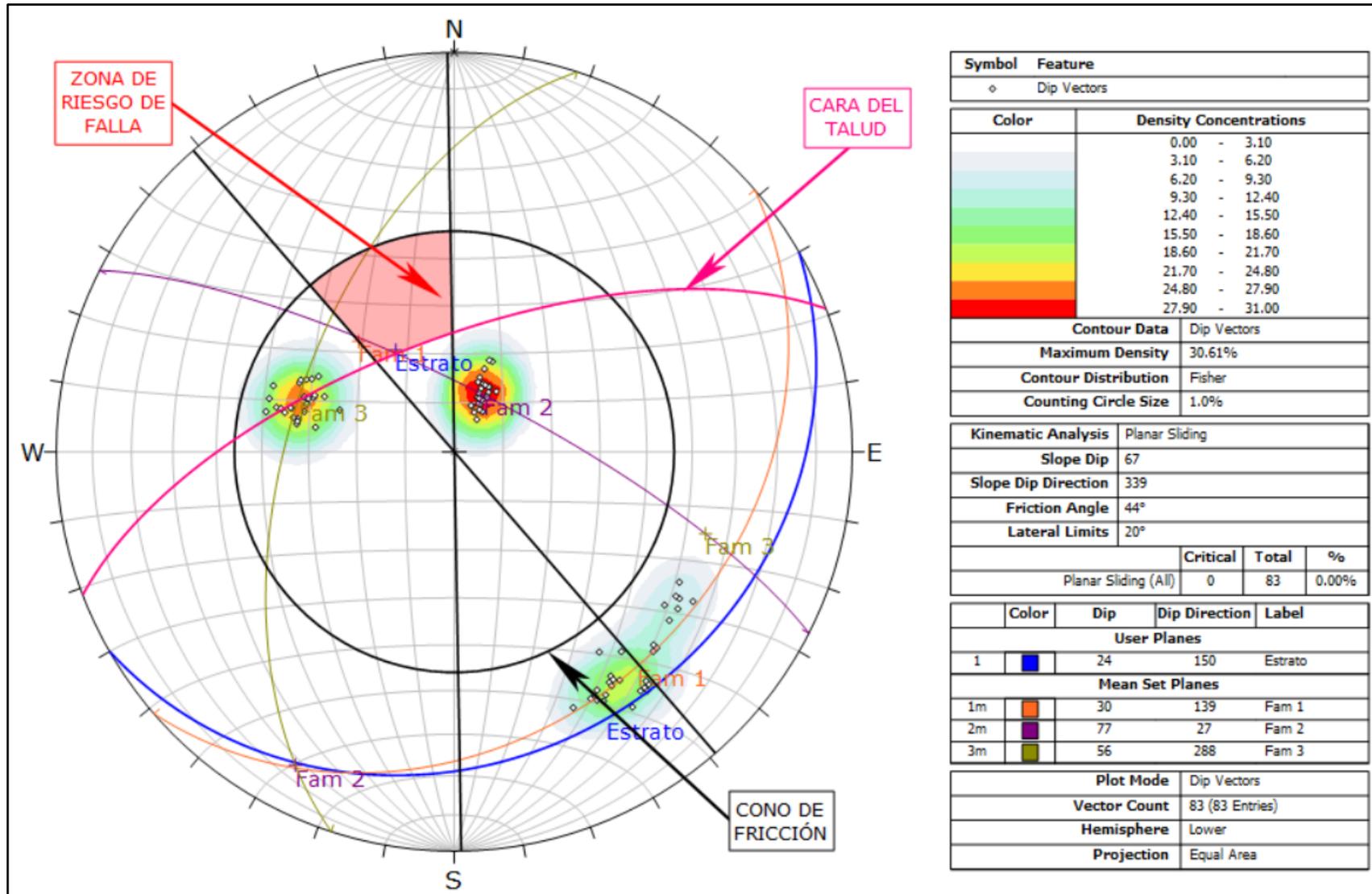


Figura 37. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-03.

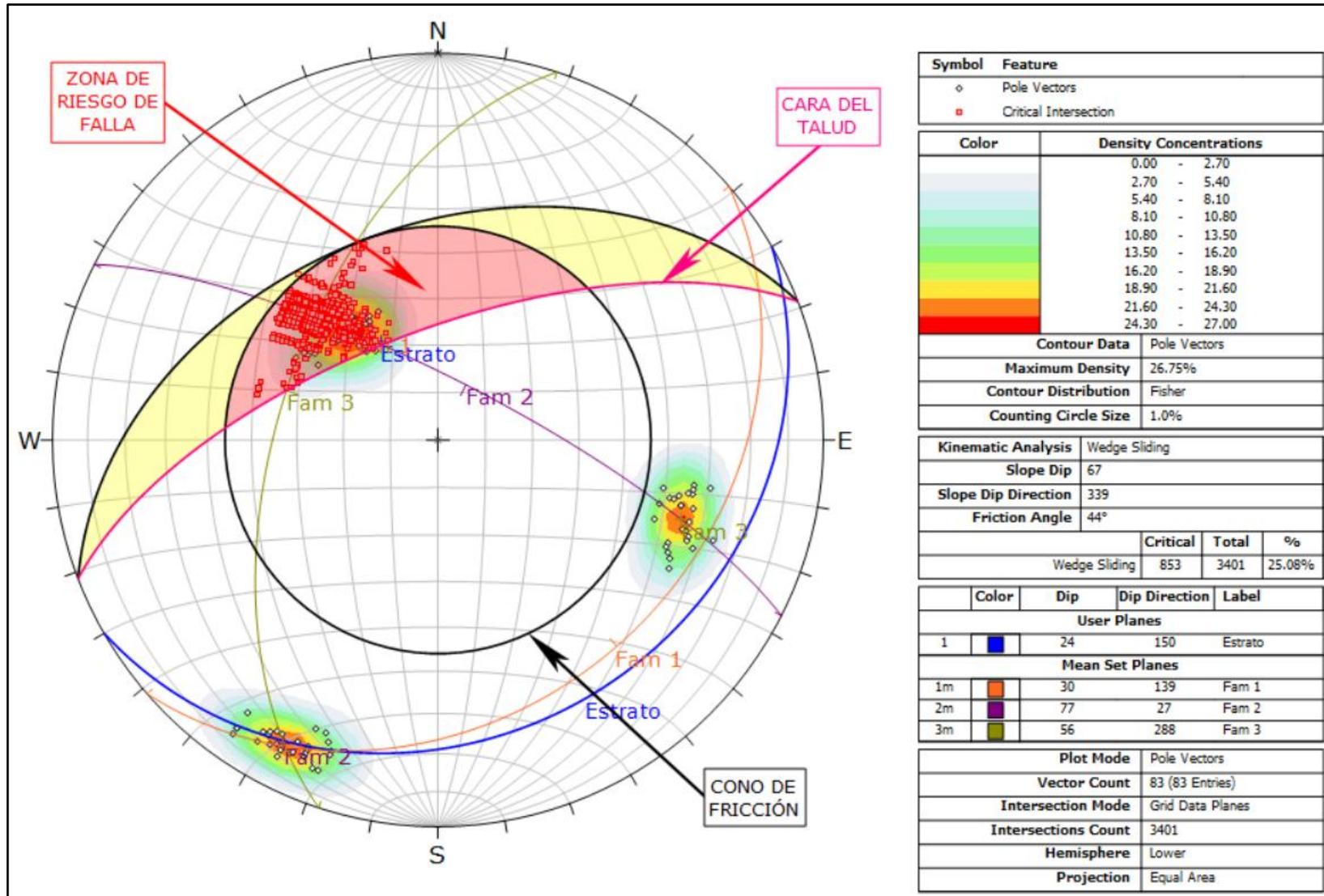


Figura 38. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-03.

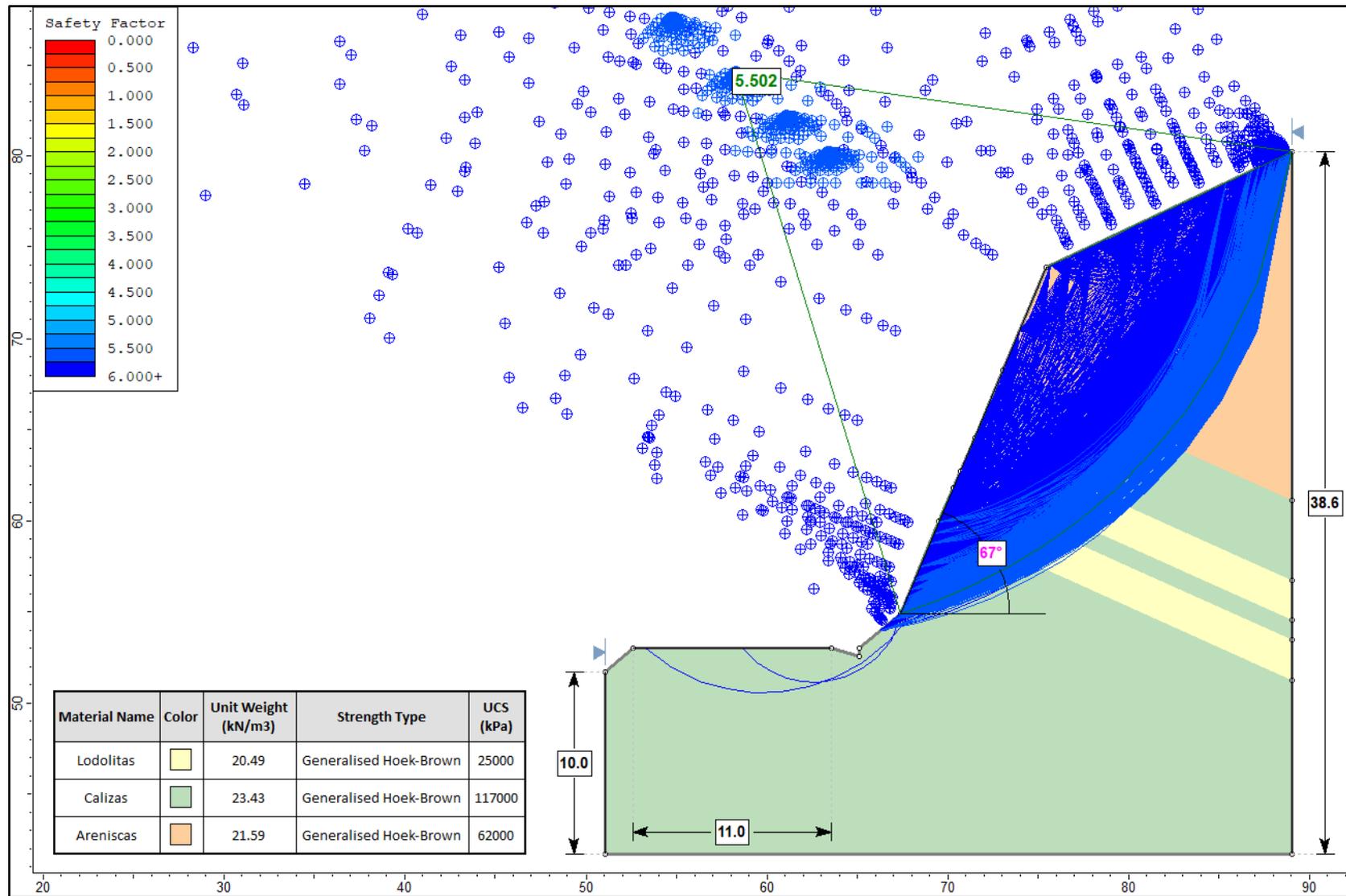


Figura 39. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-03.

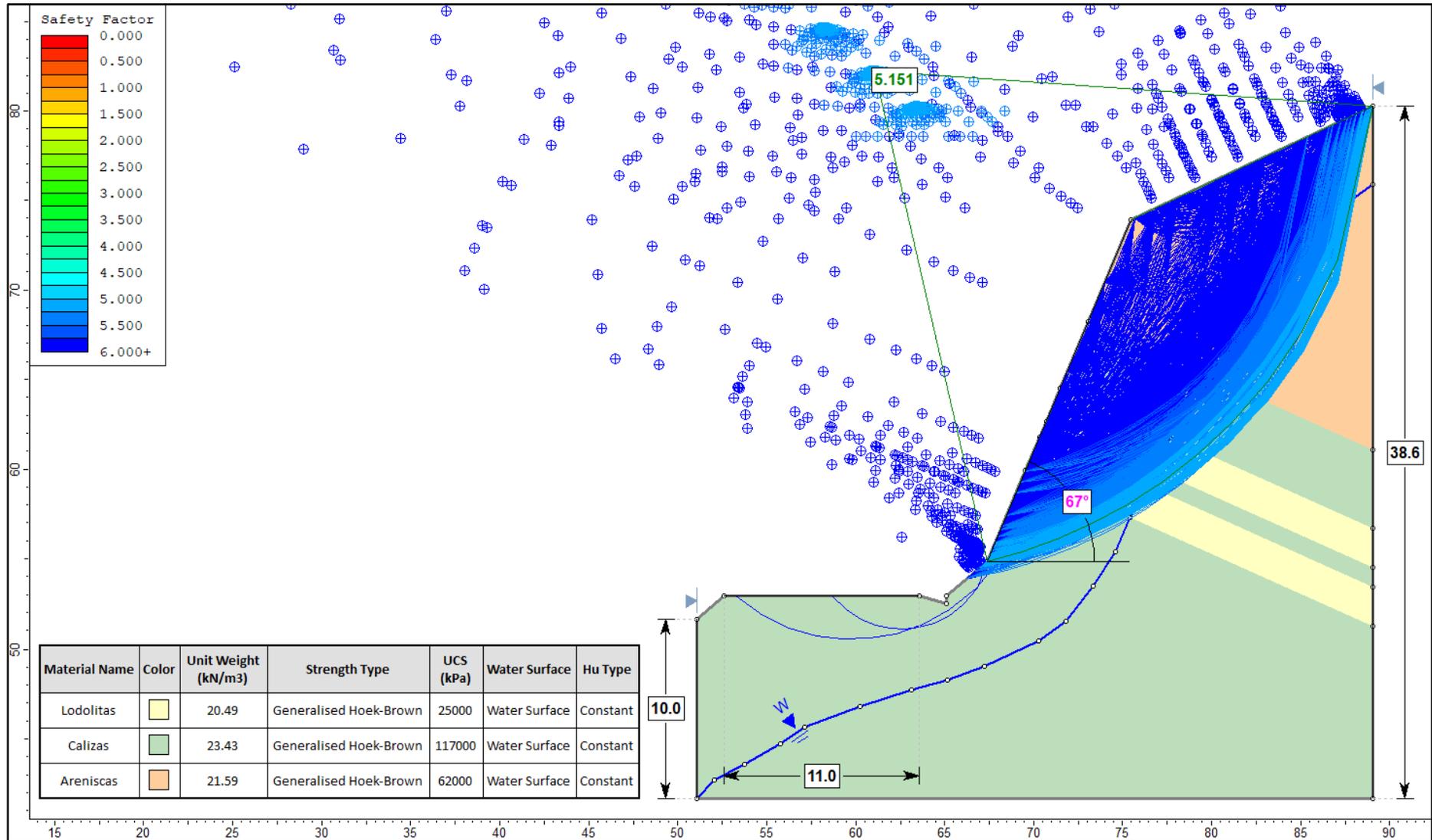


Figura 40. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-03.

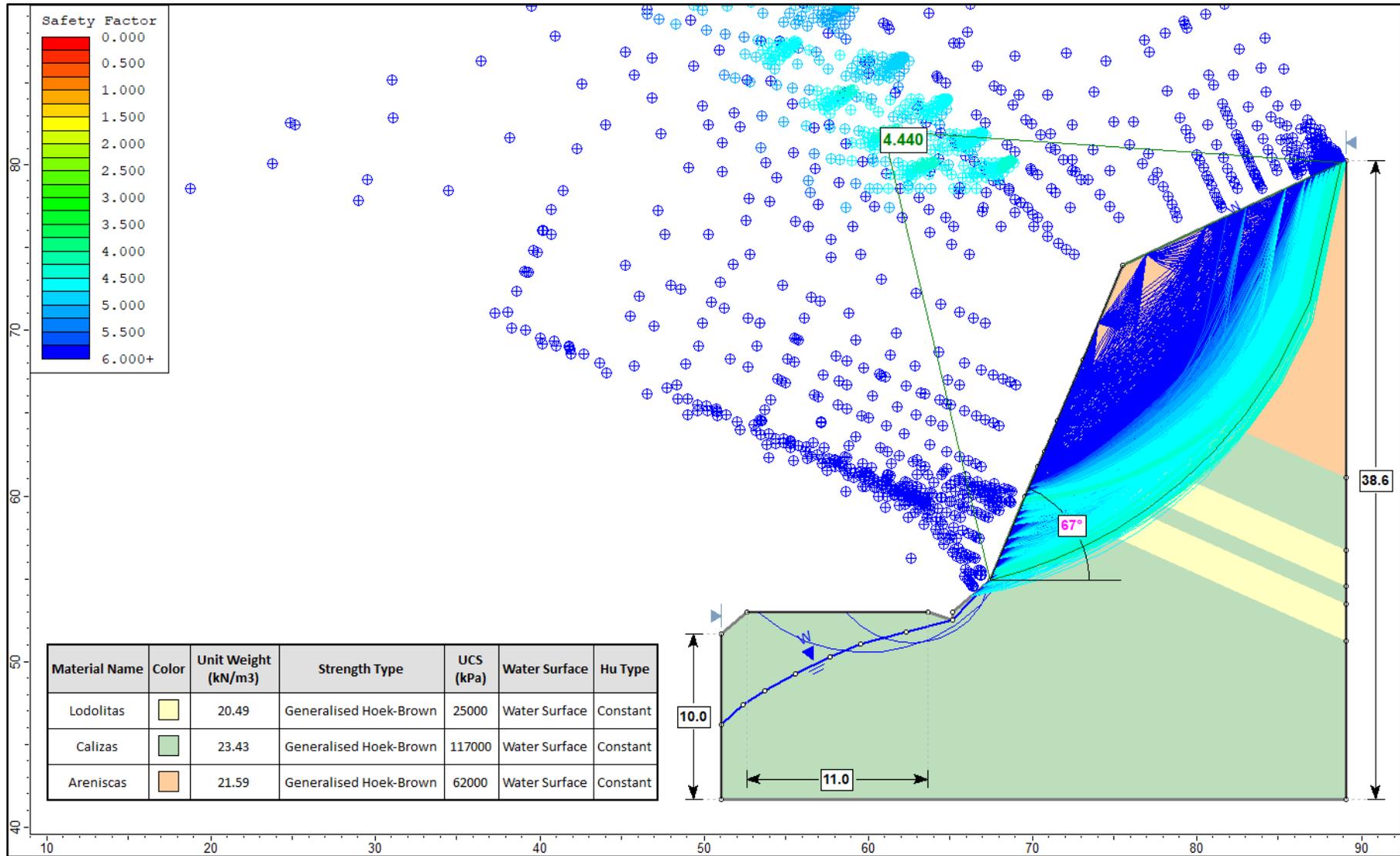


Figura 41. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-03.

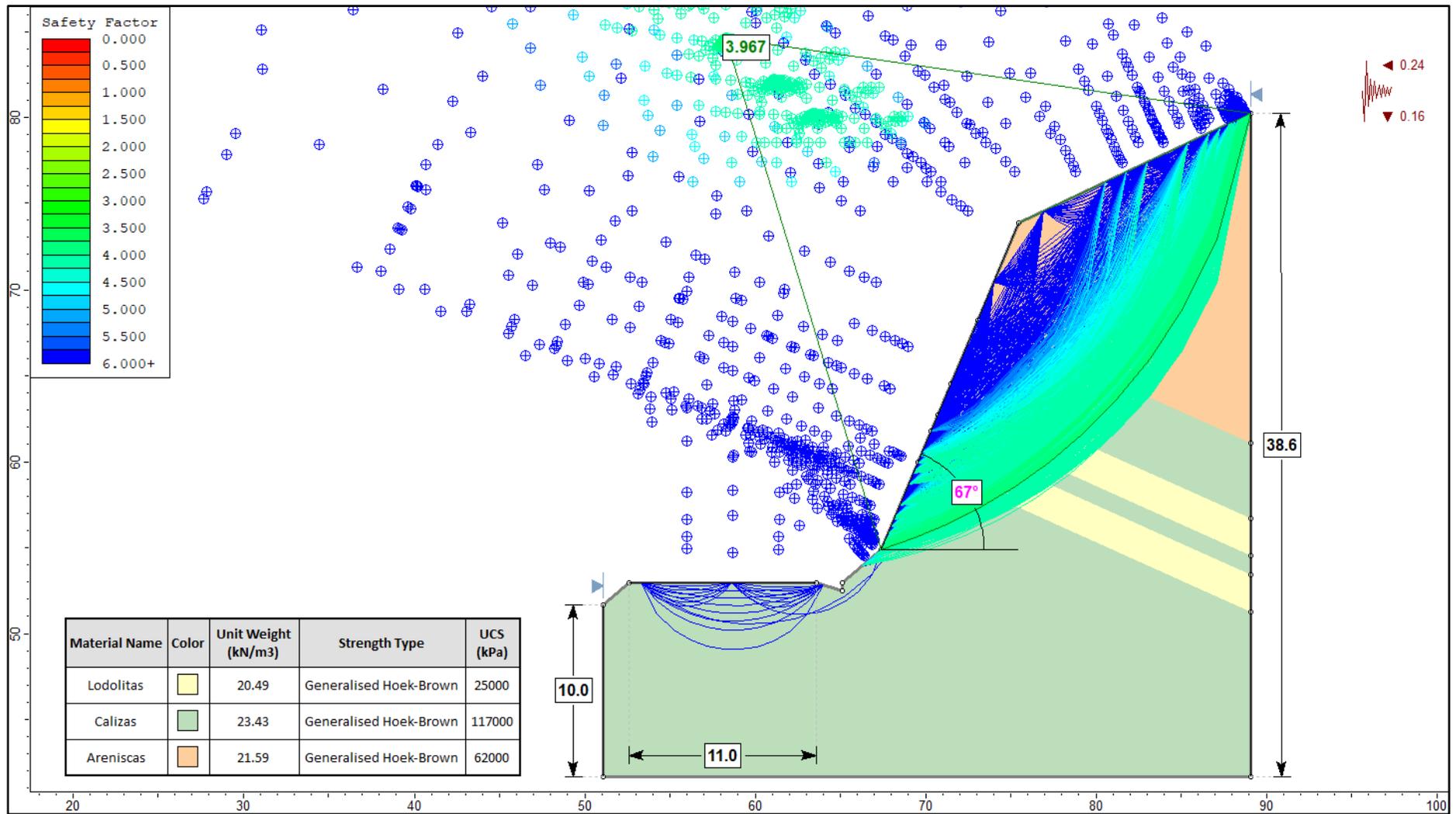


Figura 42. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en ESTC-03.

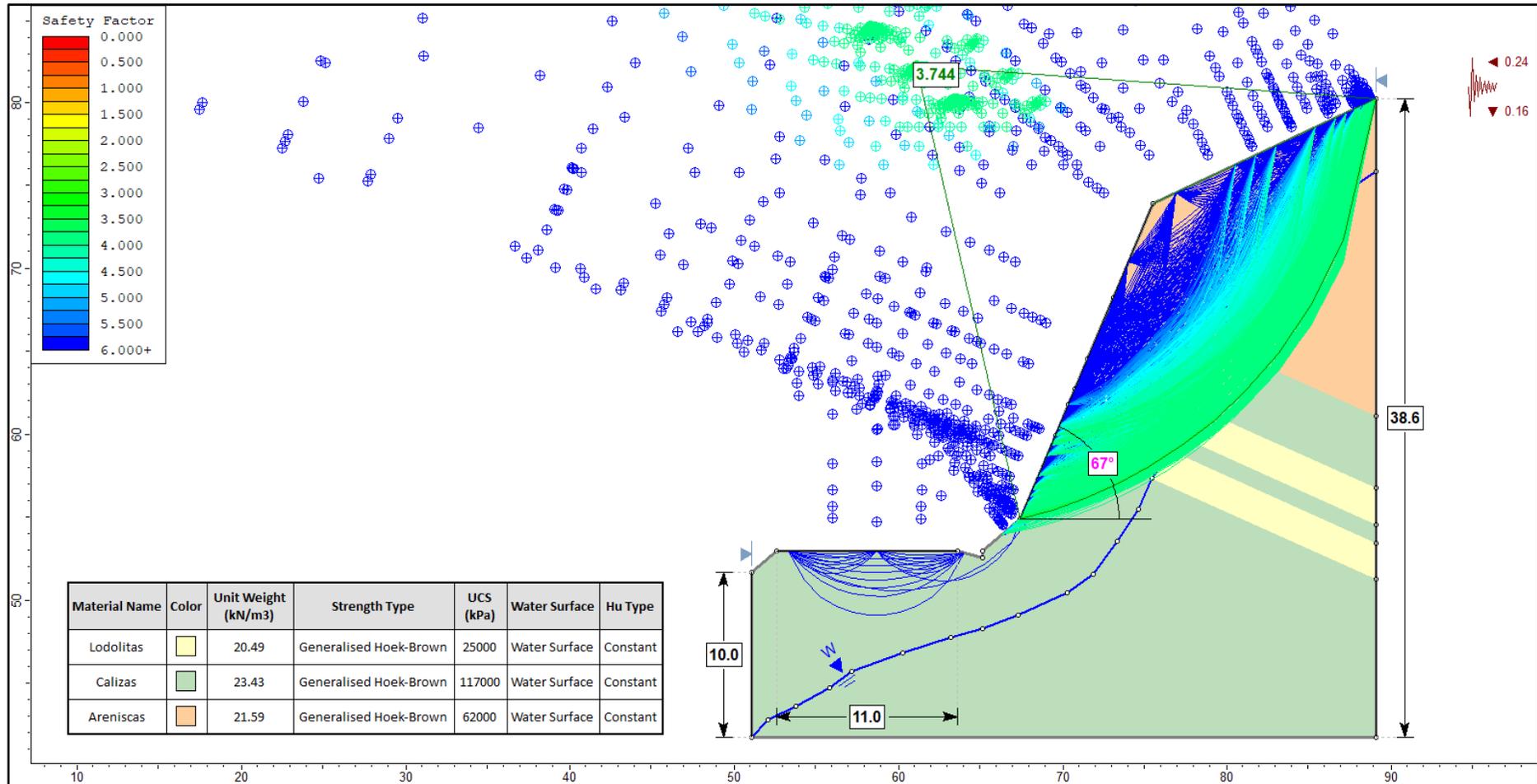


Figura 43. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-03.

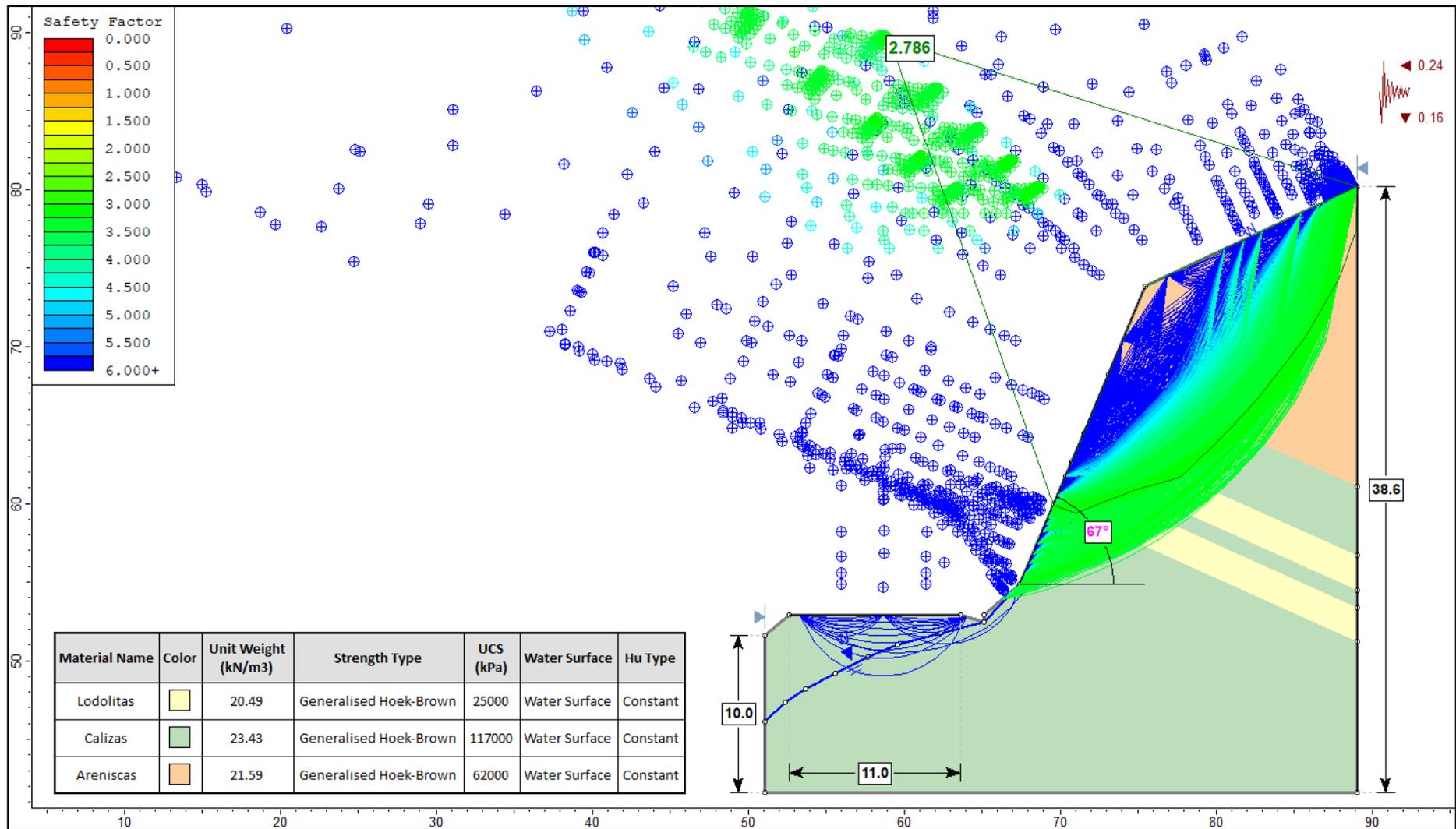


Figura 44. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-03.

3.9.4 Estación de Talud Crítico 04 (ESTC-04)

Esta estación se encuentra ubicado al margen derecho de la carretera entre las progresivas Km 108+520 – Km 108+530, y a su vez, se ubica dentro de la Formación Paja (Kip) que consta de lodolitas y margas. Presenta un grado de meteorización leve y un grado de fracturamiento alto presentando hasta tres familias de discontinuidades. El talud tiene una altura de 7 m con una inclinación de 86°, la cresta mantiene la morfología natural del terreno y se tiene un ancho de carretera de 12 m.



Foto 16. Perfil de la ESTC-04 compuesto por lodolitas y margas.

Tabla 36. Datos del talud y macizo rocoso en la ESTC-04.

MACIZO ROCOSO				
Litología / Formación		Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI
Lodolitas y margas / Fm. Tablazo		Leve	Alto	Bloq. y capas
GEOMETRÍA DEL TALUD				
Altura	Pie	Orientación	Talud	Cabeza
7 m	12 m	D	86	25
		DD	81	81

Para el cálculo de la resistencia a la compresión uniaxial, se utilizó el Martillo de Schmidt (esclerómetro), realizando las medidas en los dos tipos de roca presentes en el talud, además, según el análisis de laboratorio se tiene las densidades para las lodolitas de 18,94 kN/m³ y margas de 23,18 kN/m³.

Teniendo la información mencionada, se realizó la corrección de las medidas en el gráfico de Miller, obteniendo un valor estimado de la resistencia a la compresión uniaxial (RCU); donde, $R_L = 20$ (ISRM revisada) es de 22 MPa y $R_L = 39$ (ISRM revisada) es de 63 MPa. Obteniendo así una resistencia compresión uniaxial del talud (RCU_{TALUD}) de 43 MPa.

Tabla 37. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-04.

LECTURAS	LODOLITAS		MARGAS	
	Medidas	Corregidas	Medidas	Corregidas
Lectura 1	26	31	22	25
Lectura 2	26	31	27	30
Lectura 3	25	30	52	51
Lectura 4	27	32	45	45
Lectura 5	27	32	51	50
Lectura 6	27	32	43	43
Lectura 7	26	31	40	41
Lectura 8	25	30	39	40
Lectura 9	26	31	42	42
Lectura 10	11	11	25	28
Lectura 11	10	10	27	30
Lectura 12	11	11	30	32
Lectura 13	11	11	28	30
Lectura 14	12	12	33	35
Lectura 15	12	12	50	47
Lectura 16	11	11	48	46
Lectura 17	10	10	51	48
Lectura 18	11	11	45	43
Lectura 19	10	10	40	40
Lectura 20	11	11	27	30
Promedio		20		39
RCU		22 MPa		63 MPa
RCU_{TALUD}			43 MPa	

Para el cálculo del RQD se aplica una fórmula, en ese sentido, se procedió a calcular en las lodolitas y margas; obteniendo un valor RQD del talud de 31,79%.

Tabla 38. Cálculo del RQD para la ESTC-04.

$RQD=100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda+1)$				
ROCAS	ND	L	λ	RQD
Lodolitas y margas	99	4,2	23,6	31,79%

En cuanto al cálculo del RMR₈₉, según la valoración de la Tabla 39, el macizo rocoso se clasifica dentro de la Clase III, un valor RMR₈₉ de 41 y un índice de calidad de la roca Regular.

Tabla 39. Cálculo de RMR₈₉ para la ESTC-04.

RANGO DE VALORES					
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 - 250 (12)	50 - 100 (7)	25 - 50 (4)	5 - 25 (2) 1 - 5 (1) < 1 (0)
RQD	90 - 100 % (20)	75 - 90 % (17)	50 - 75 % (13)	25 - 50 % (8)	< 25 % (3)
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 - 2 m (15)	0.2 - 0.6 m (10)	6 - 20 cm (8)	< 6 cm (5)
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 - 3 m (4)	3 - 10 m (2)	10 - 20 m (1) > 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 - 1.0 mm (4)	1 - 5 mm (1) > 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1) Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2) Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1) Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4) Agua fluyendo (0)	
VALOR TOTAL RMR	41				

Para el cálculo del GSI se necesita el valor de $JCOND_{89}$, el cual se obtiene mediante la suma de cada valor de la condición de las discontinuidades (ver Tabla 39), mientras que el valor de RQD es extrae de la Tabla 38.

Tabla 40. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.

$GSI = 1,5 JCOND_{89} + RQD/2$								
Roca	Valoración de la Condición de las Discontinuidades						RQD	GSI
	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	$JCOND_{89}$		
Lodolitas y margas	2	4	1	2	5	14	31,79	36,90

Mediante el software RocData v.4 se determinó las propiedades geomecánicas del macizo rocoso del talud, el cual nos proporciona los siguientes parámetros de Hoek-Brown ($m_b=0.055$, $s= 0.0183$, $a=0.514$) y Mohr-Coulomb (cohesión = 0.050 MPa, ángulo de fricción = 36.06°).

En la Figura 45 se observa que la envolvente de tensiones principales queda encima de la línea de Mogi, lo que indica una rotura frágil. Además, el macizo rocoso presenta una resistencia a la tracción igual a -0.021 MPa, una resistencia compresiva uniaxial de 0.193 MPa, una resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso igual a 1.223 MPa y un módulo de deformación de 340.39 MPa.

En el análisis cinemático con el software Dips v.7 podemos observar que hay una probabilidad de 0% para que exista una rotura planar; mientras que, en el análisis de rotura en cuña existe una probabilidad de 10,46% con intersecciones críticas entre la familia de discontinuidades 2 y 3, con orientación norte.

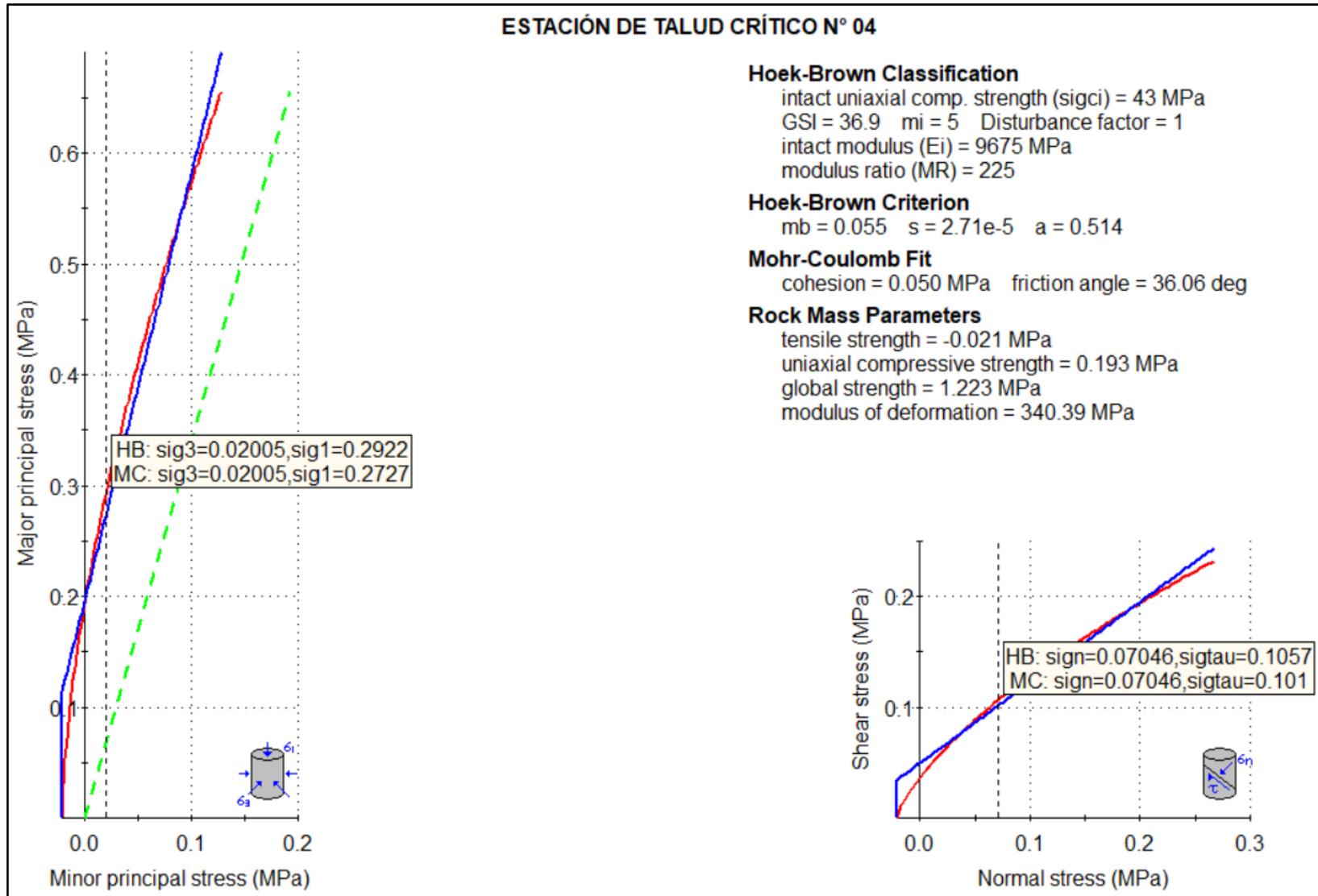


Figura 45. Análisis de las propiedades geomecánicas en la ESTC-04.

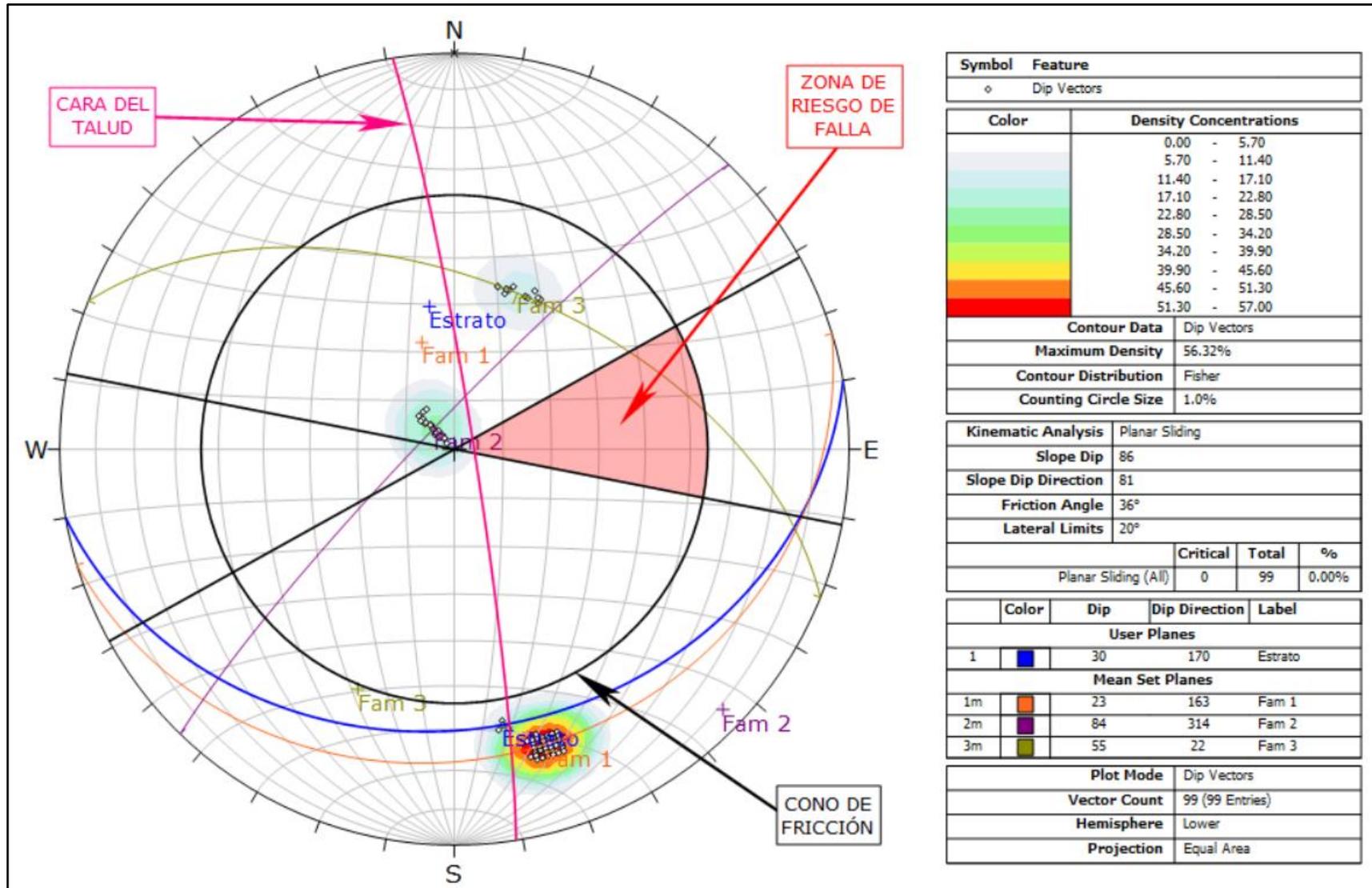


Figura 46. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-04.

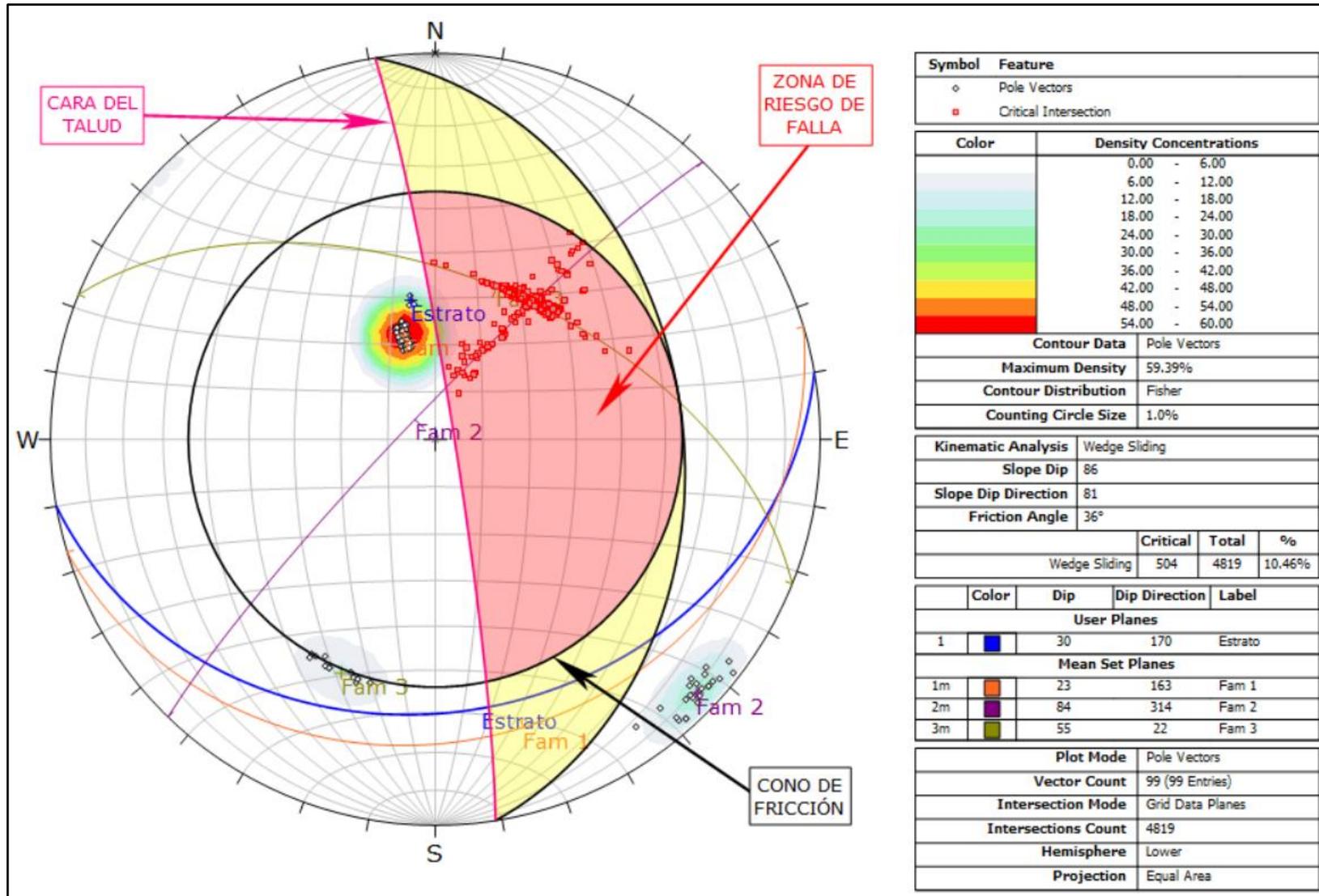


Figura 47. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-04.

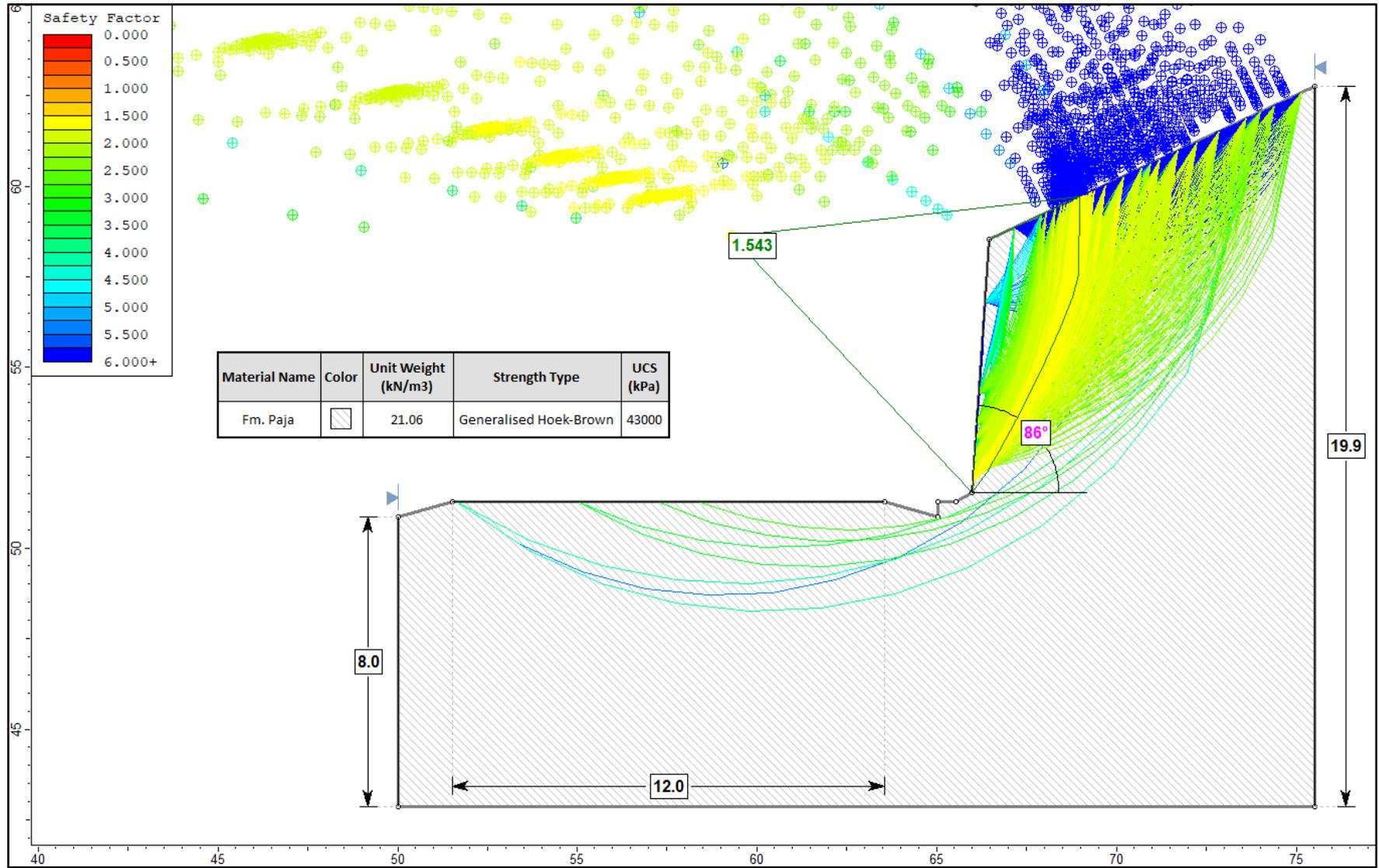


Figura 48. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-04.

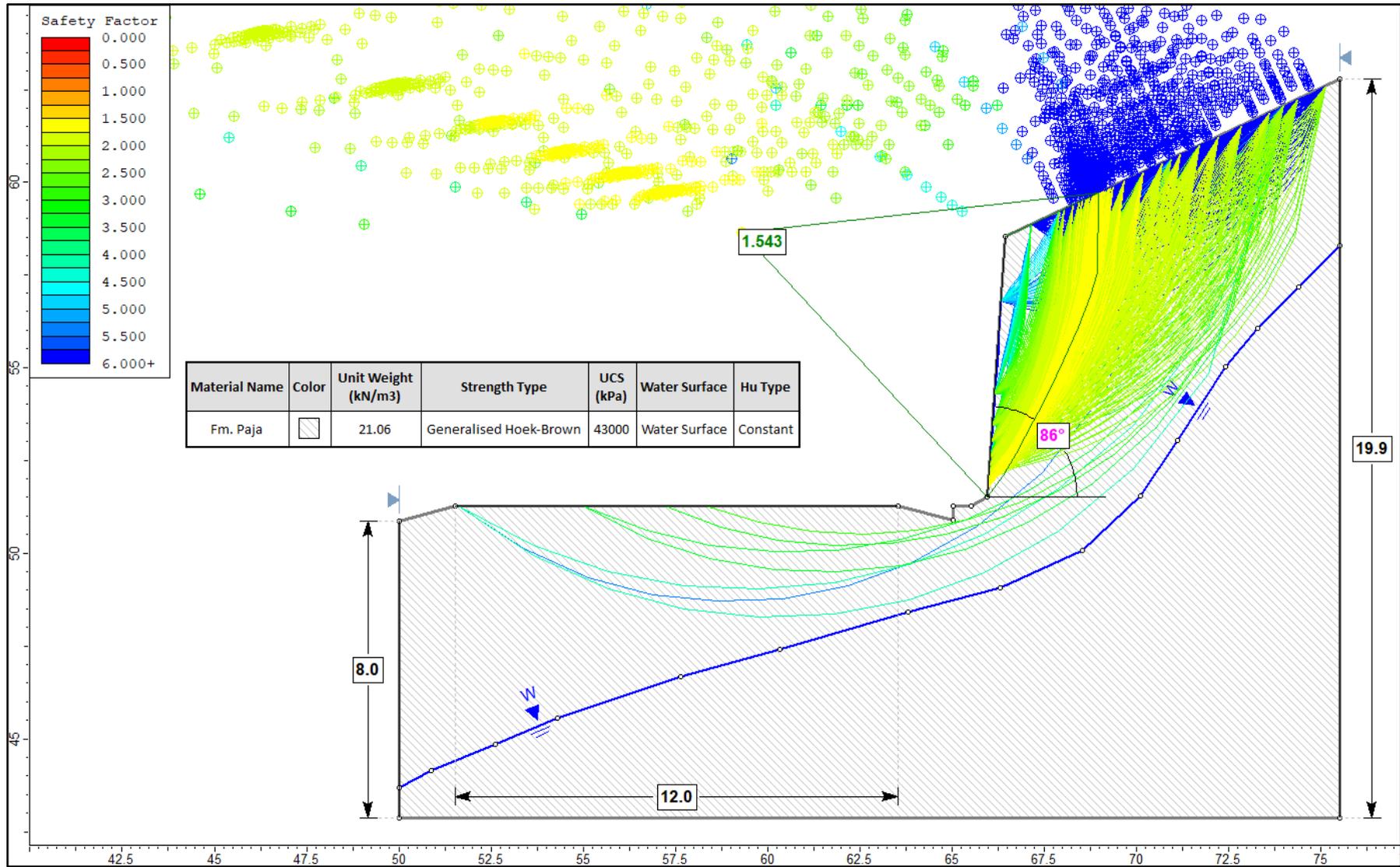


Figura 49. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-04.

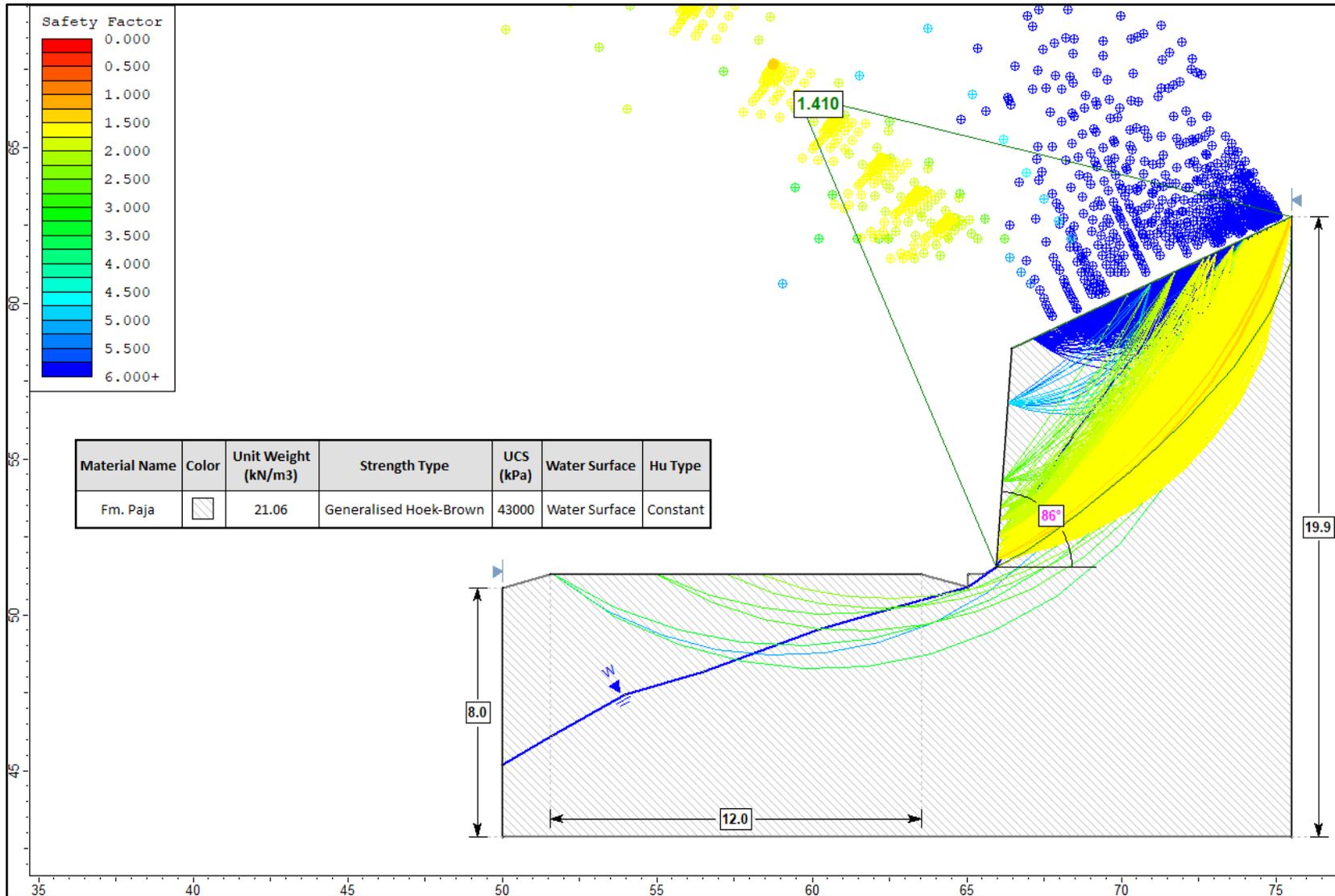


Figura 50. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-04.

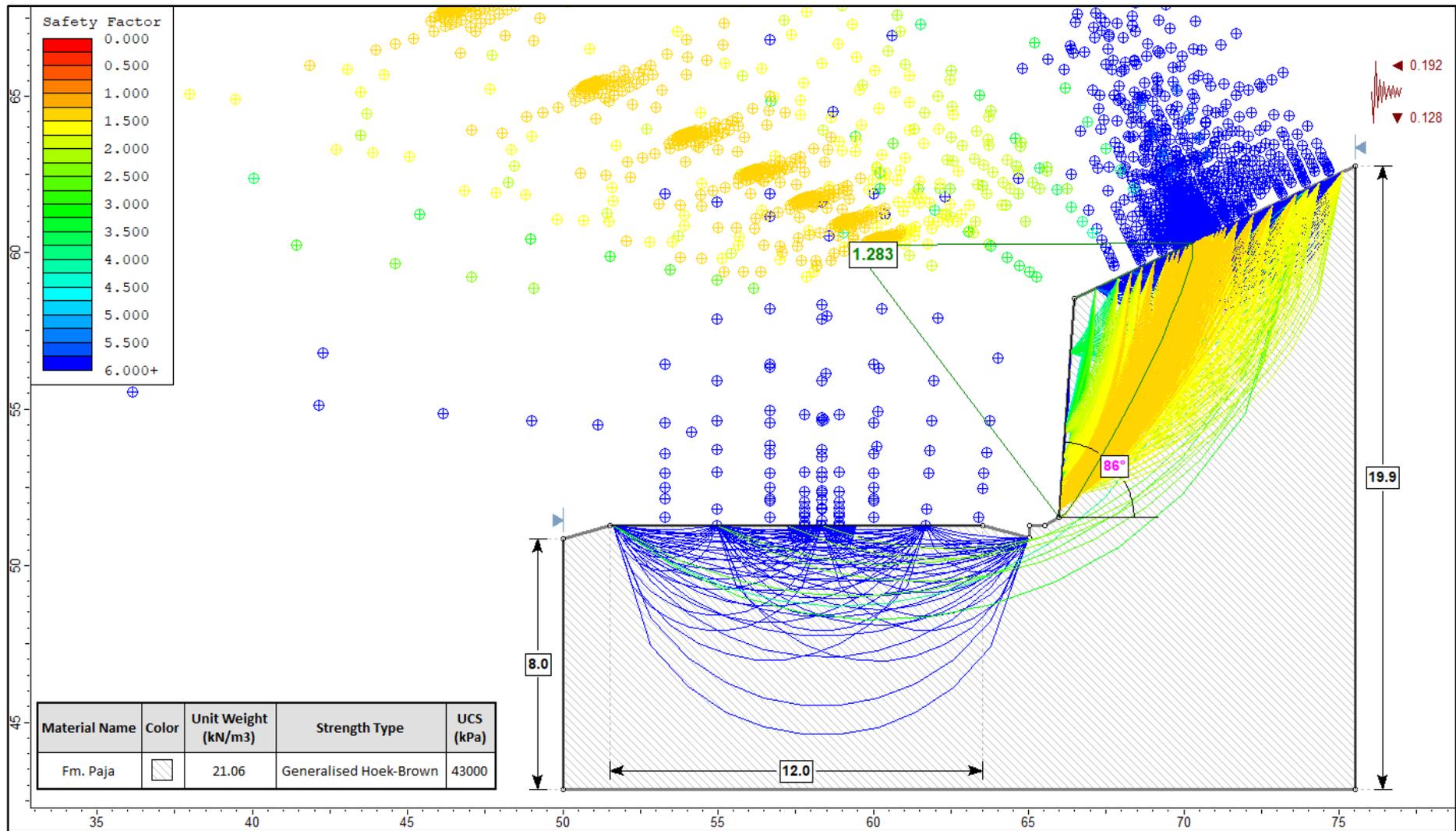


Figura 51. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en la ESTC-04.

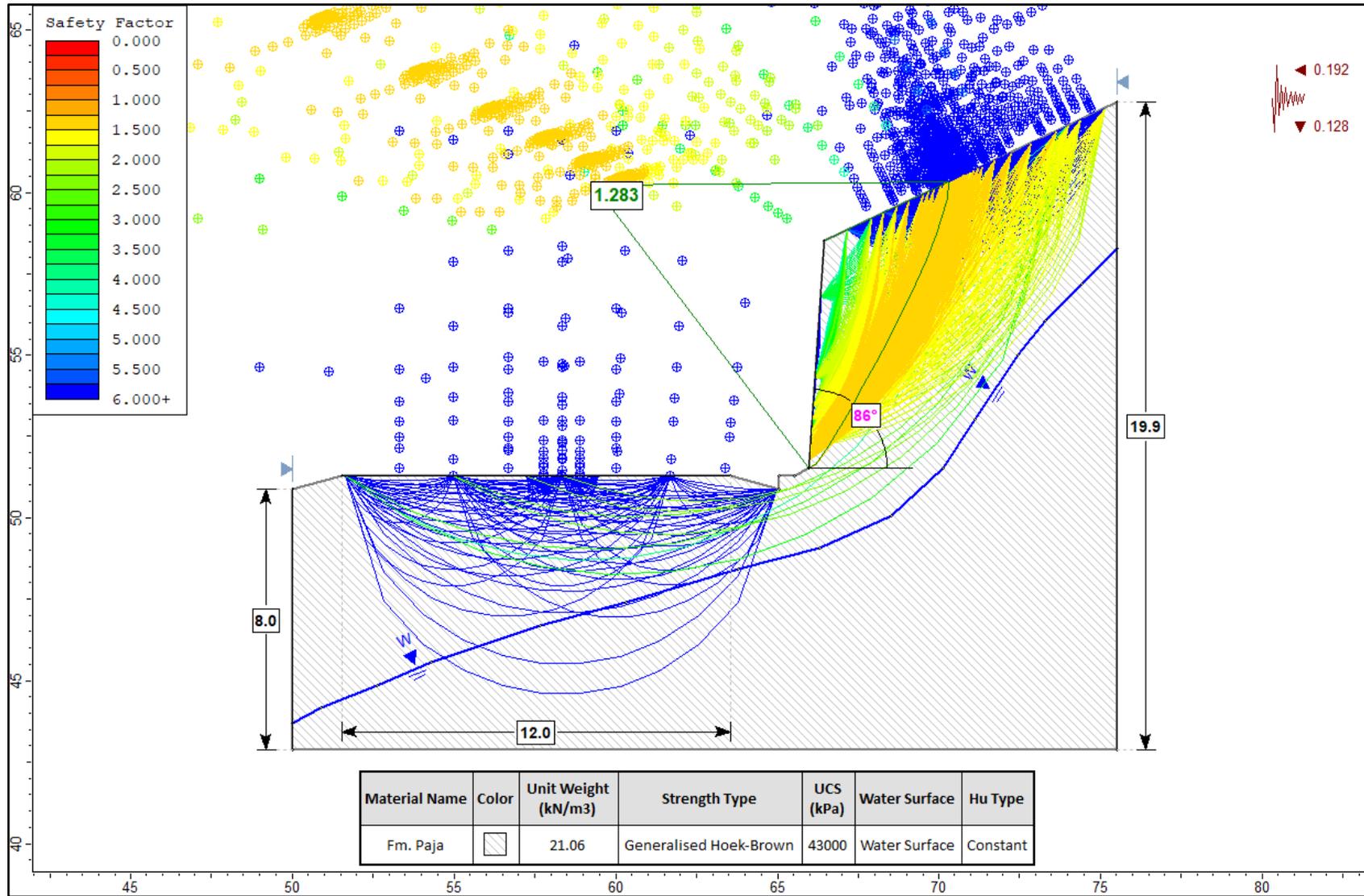


Figura 52. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-04.

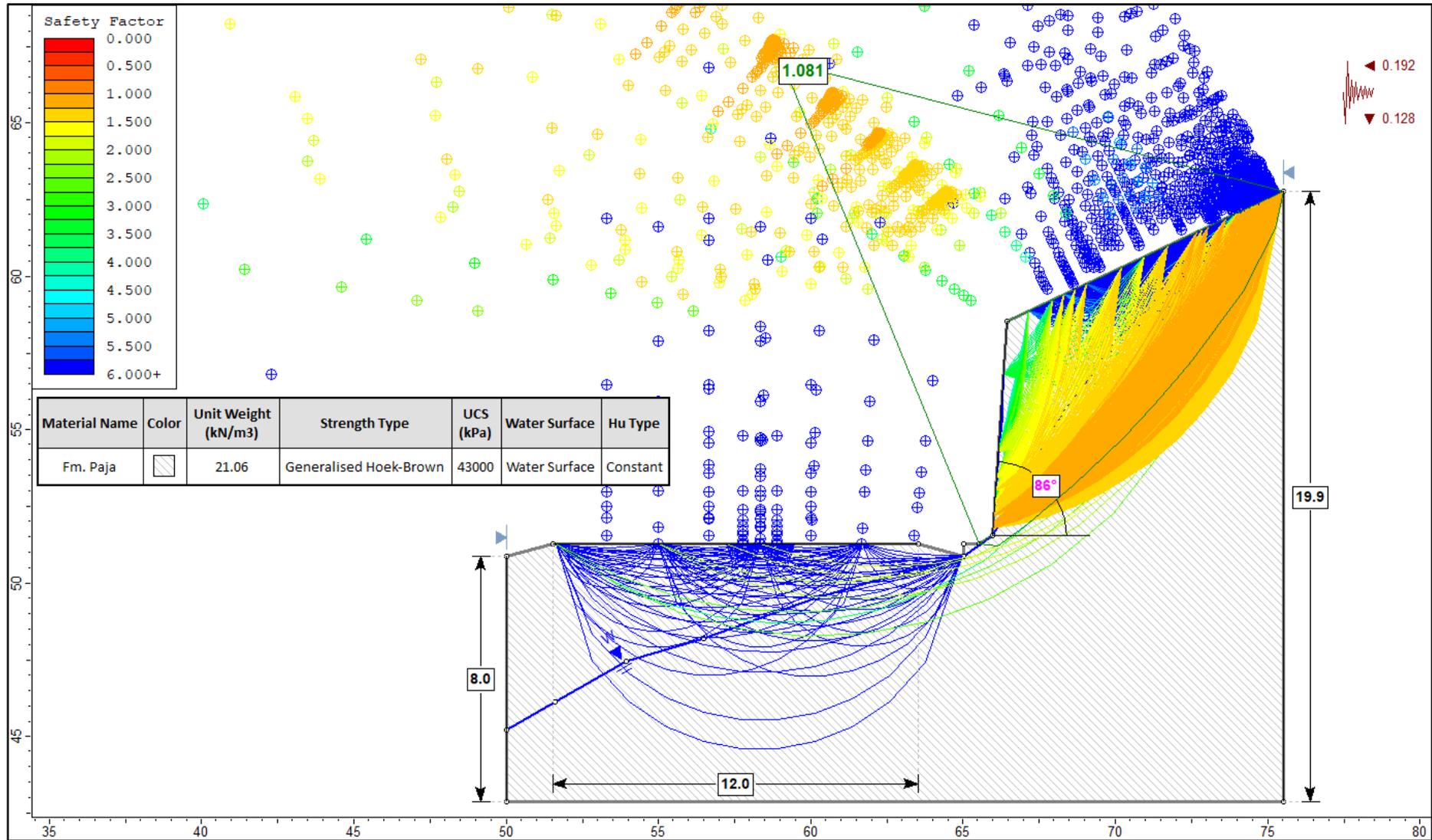


Figura 53. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-04.

3.9.5 Estación de Talud Crítico 05 (ESTC-05)

Esta estación se encuentra ubicado al margen derecho de la carretera entre las progresivas Km 108+972 – Km 108+803, y a su vez, se ubica dentro de la Formación Paja (Kip) que consta de lodolitas y margas. Presenta un grado de meteorización leve y un grado de fracturamiento alto. El talud tiene una altura de 7 m con una inclinación de 85°, la cresta mantiene la morfología natural del terreno y se tiene un ancho de carretera de 16 m.



Foto 17. Perfil de la ESTC-05 compuesto por lodolitas y margas.

Tabla 41. Datos del talud y macizo rocoso en la ESTC-05.

MACIZO ROCOSO				
Litología / Formación	Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	
Lodolitas y margas / Fm. Tablazo	Leve	Alto	Bloq. y capas	
GEOMETRÍA DEL TALUD				
Altura	Pie	Orientación	Talud	Cabeza
7 m	15 m	D	85	30
		DD	52	52

Para el cálculo de la resistencia a la compresión uniaxial, se utilizó el Martillo de Schmidt (esclerómetro), realizando las medidas en los dos tipos de roca presentes en el talud, además, según el análisis de laboratorio se tiene las densidades para las lodolitas de 19,26 kN/m³ y margas de 23,92 kN/m³.

Teniendo la información mencionada, se realizó la corrección de las medidas en el gráfico de Miller, obteniendo un valor estimado de la resistencia a la compresión uniaxial (RCU); donde, $R_L = 20$ (ISRM revisada) es de 22 MPa y $R_L = 38$ (ISRM revisada) es de 65 MPa. Obteniendo así un resultado final de la resistencia a la compresión uniaxial del talud (RCU_{TALUD}) de 43 MPa.

Tabla 42. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-05.

LECTURAS	LODOLITAS		MARGAS	
	Medidas	Corregidas	Medidas	Corregidas
Lectura 1	26	31	40	41
Lectura 2	22	28	37	38
Lectura 3	25	30	38	39
Lectura 4	24	29	36	37
Lectura 5	25	30	36	37
Lectura 6	23	28	39	40
Lectura 7	26	31	33	35
Lectura 8	21	27	34	36
Lectura 9	24	29	32	34
Lectura 10	20	26	35	36
Lectura 11	12	12	36	37
Lectura 12	11	11	35	36
Lectura 13	11	11	37	38
Lectura 14	11	11	36	37
Lectura 15	10	10	39	39
Lectura 16	10	10	40	40
Lectura 17	11	11	41	40
Lectura 18	11	11	40	40
Lectura 19	11	11	42	41
Lectura 20	10	10	40	40
Promedio		20		38
RCU		22 MPa		65 MPa
RCU_{TALUD}		43 MPa		

Para el cálculo del RQD se aplica una fórmula, en ese sentido, se procedió a calcular en las lodolitas y margas; obteniendo un valor RQD del talud de 26,55%.

Tabla 43. Cálculo del RQD para la ESTC-05.

$RQD=100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda+1)$				
ROCAS	ND	L	λ	RQD
Lodolitas y margas	86	3,3	26,1	26,55%

En cuanto al cálculo del RMR_{89} , según la valoración de la Tabla 44, el macizo rocoso se clasifica dentro de la Clase III, un valor RMR_{89} de 41 y un índice de calidad de la roca Regular.

Tabla 44. Cálculo de RMR_{89} para la ESTC-05.

RANGO DE VALORES					
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 - 250 (12)	50 - 100 (7)	25 - 50 (4)	5 - 25 (2) 1 - 5 (1) < 1 (0)
RQD	90 - 100 % (20)	75 - 90 % (17)	50 - 75 % (13)	25 - 50 % (8)	< 25 % (3)
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 - 2 m (15)	0.2 - 0.6 m (10)	6 - 20 cm (8)	< 6 cm (5)
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 - 3 m (4)	3 - 10 m (2)	10 - 20 m (1) > 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 - 1.0 mm (4)	1 - 5 mm (1) > 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1) Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2) Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1) Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4) Agua fluyendo (0)	
VALOR TOTAL RMR	41				

Para el cálculo del GSI se necesita el valor de $JCOND_{89}$, el cual se obtiene mediante la suma de cada valor de la condición de las discontinuidades (ver Tabla 44), mientras que el valor de RQD se extrae de la Tabla 43.

Tabla 45. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.

GSI = 1,5 JCOND₈₉ + RQD/2								
Roca	Valoración de la Condición de las Discontinuidades						RQD	GSI
	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	JCOND ₈₉		
Lodolitas y margas	2	4	1	2	5	14	26,55	34,28

Mediante el software RocData v.4 se determinó las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, el cual proporciona los siguientes parámetros de Hoek-Brown ($m_b=0.046$, $s=0.0118$, $a=0.517$) y Mohr-Coulomb (cohesión = 0.042 MPa, ángulo de fricción = 34.22°).

Se observa que la envolvente de tensiones principales queda encima de la línea de Mogi, lo que indica una rotura frágil. Además, el macizo rocoso presenta una resistencia a la tracción igual a -0.016 MPa, una resistencia compresiva uniaxial de 0.150 MPa, una resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso igual a 1.086 MPa y un módulo de deformación de 310.01 MPa.

En el análisis cinemático con el software Dips v.7 se observa que hay una probabilidad de 8,14% para que exista una rotura planar entre el talud y la familia de discontinuidades 3, además tiene una orientación noreste; existe también una probabilidad de 19,70% para que exista una rotura en cuña, con intersecciones críticas entre la familia de discontinuidades 2 y 3 con una ligera inclinación noroeste.

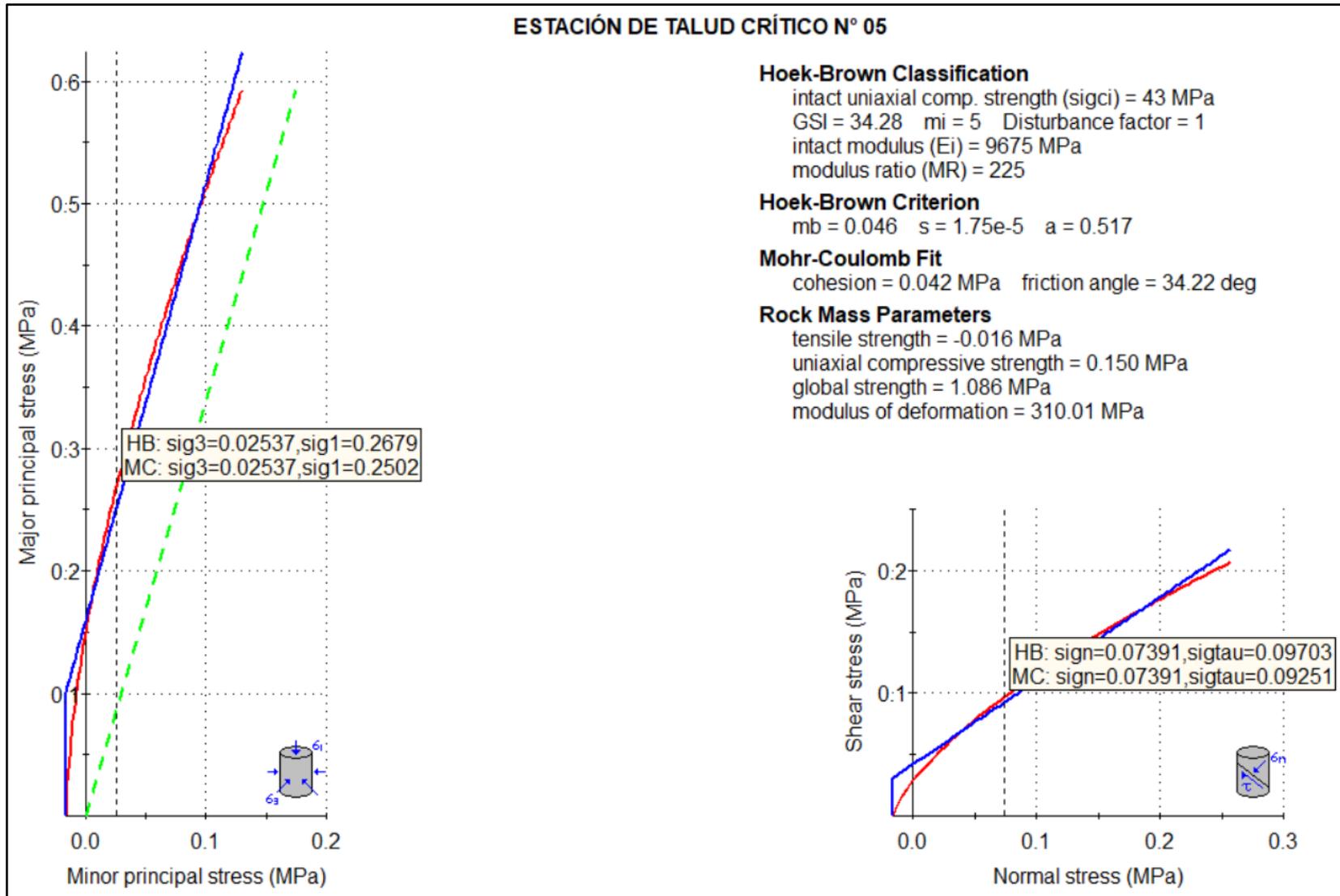


Figura 54. Análisis de las propiedades geomecánicas en la ESTC-05.

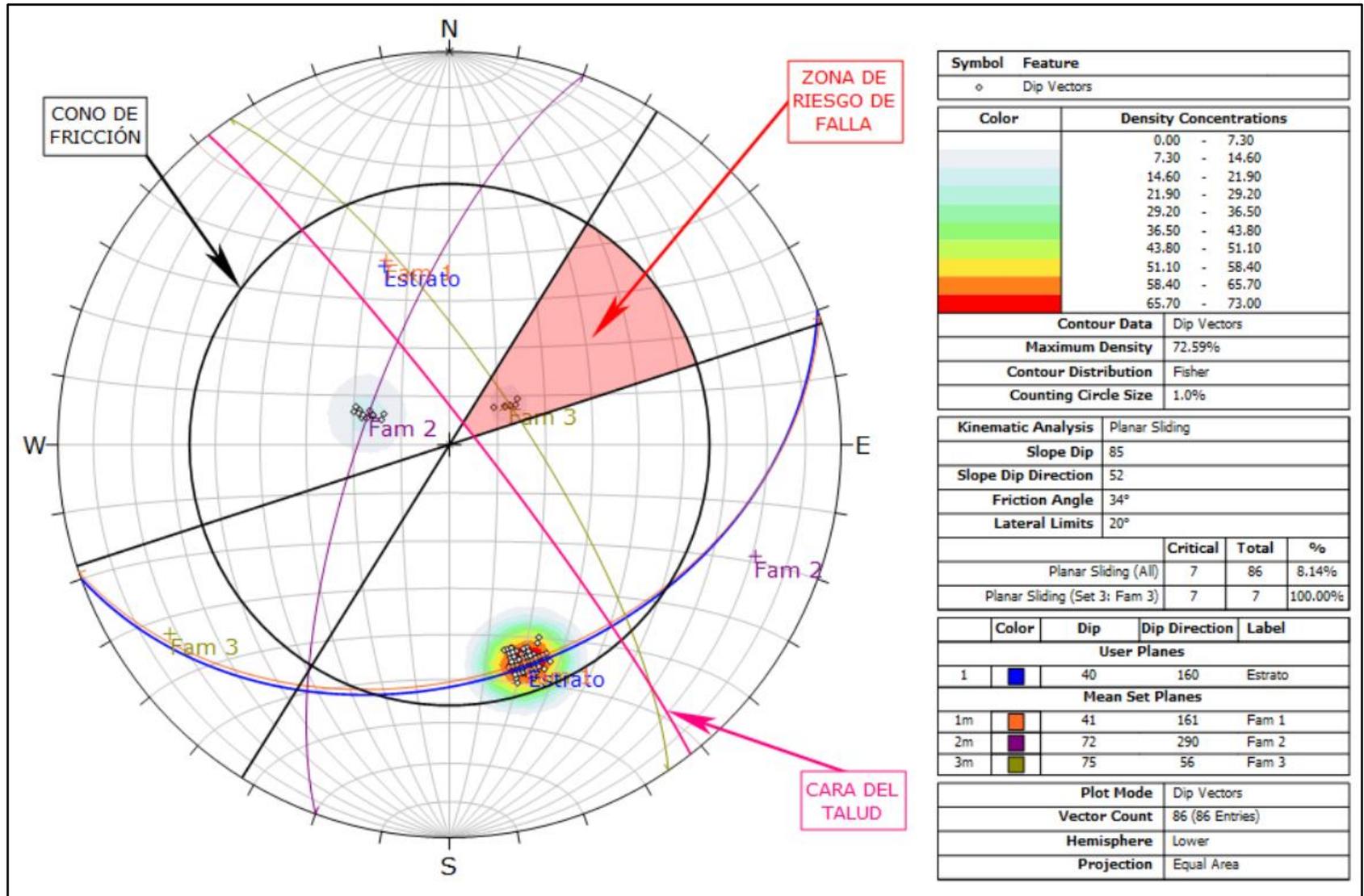


Figura 55. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-05.

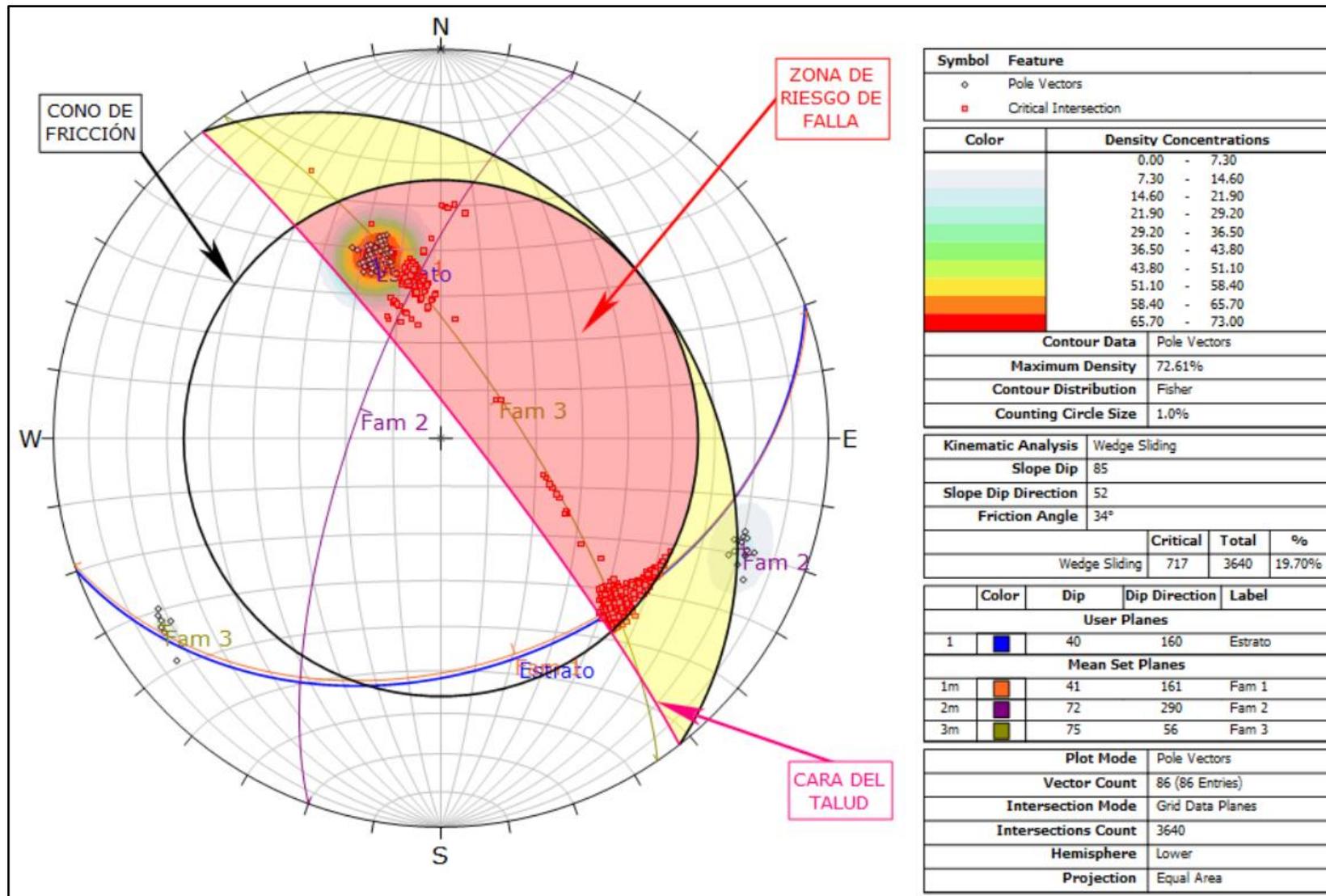


Figura 56. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-05.

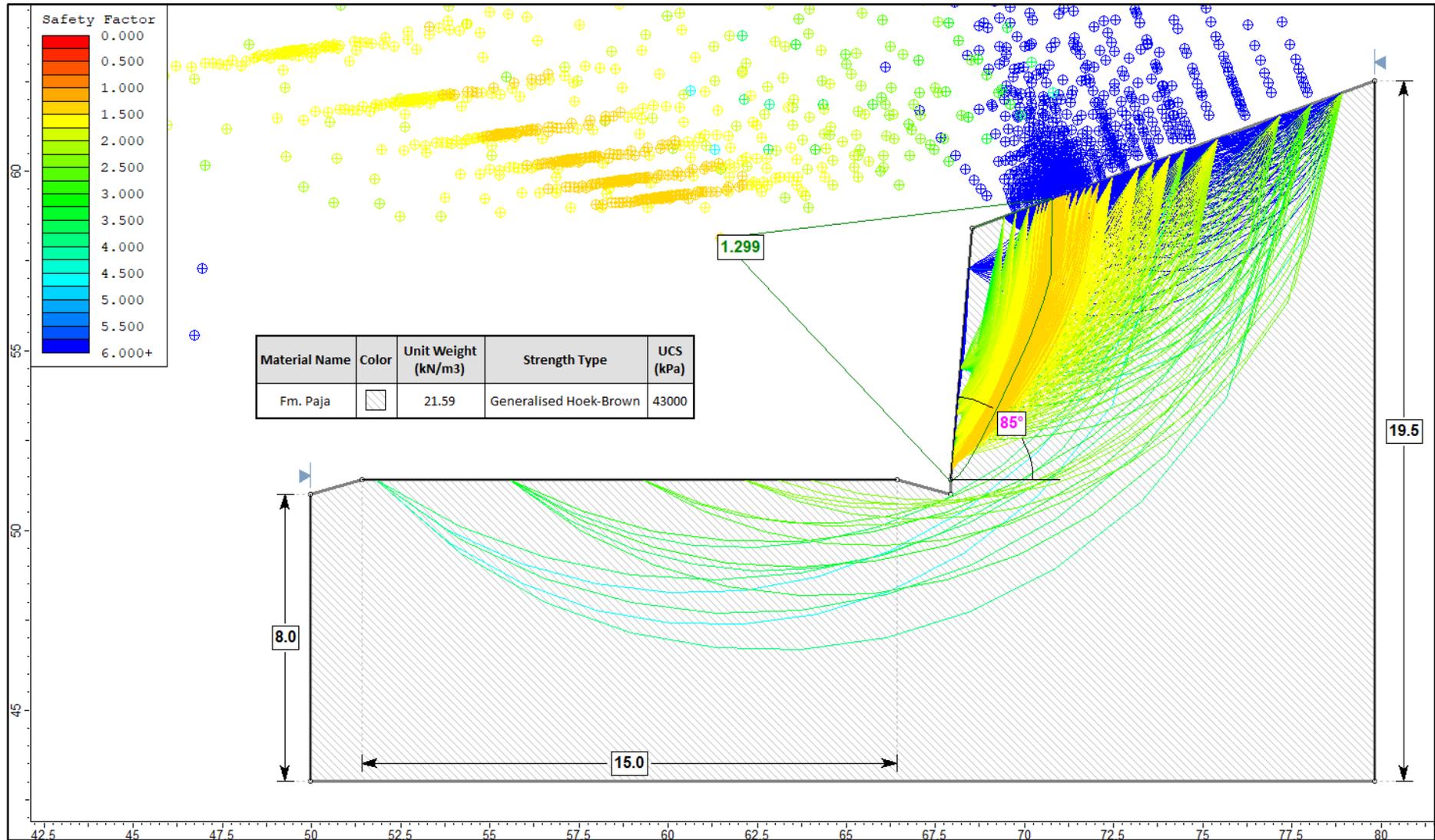


Figura 57. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-05.

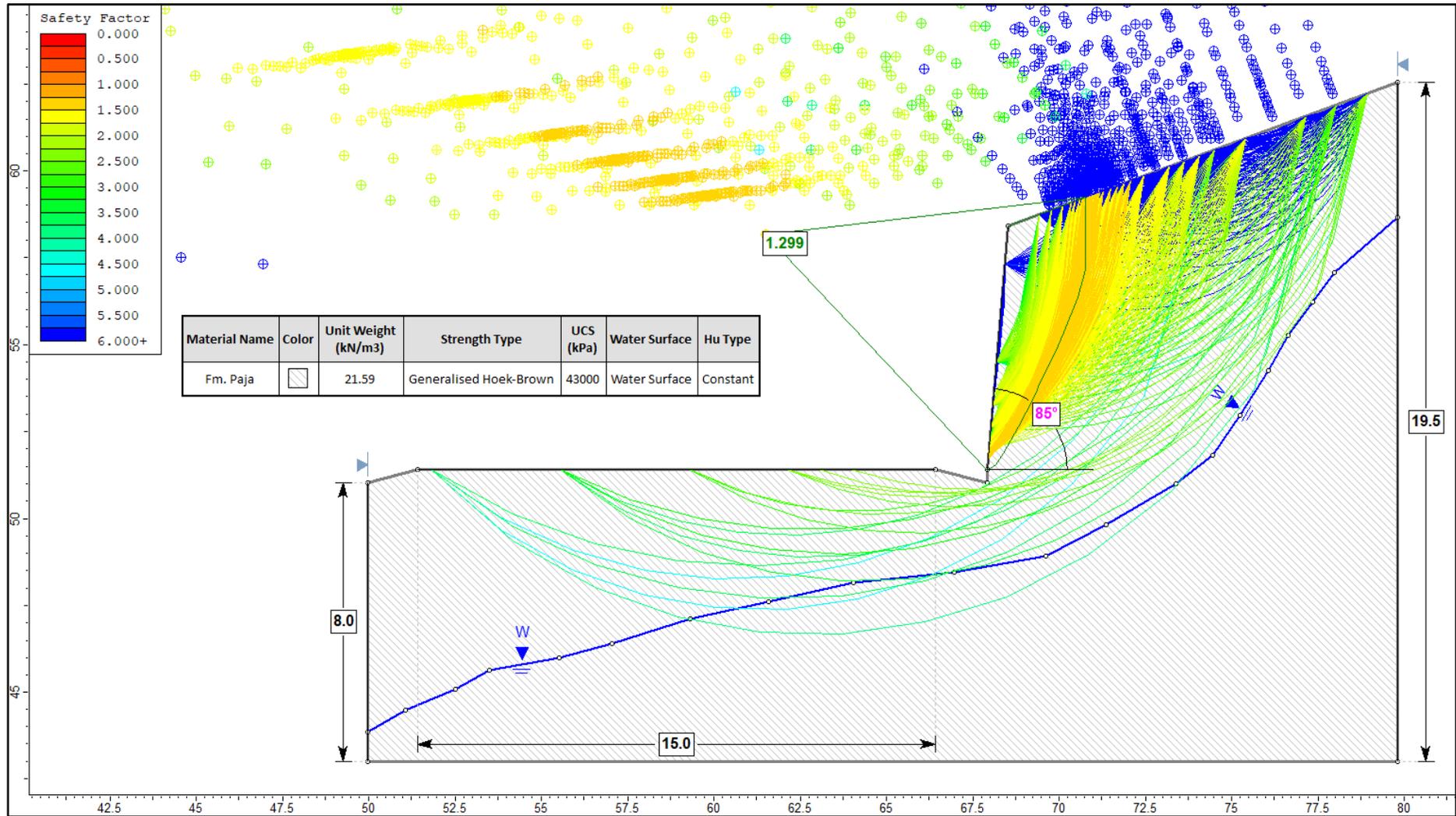


Figura 58. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-05.

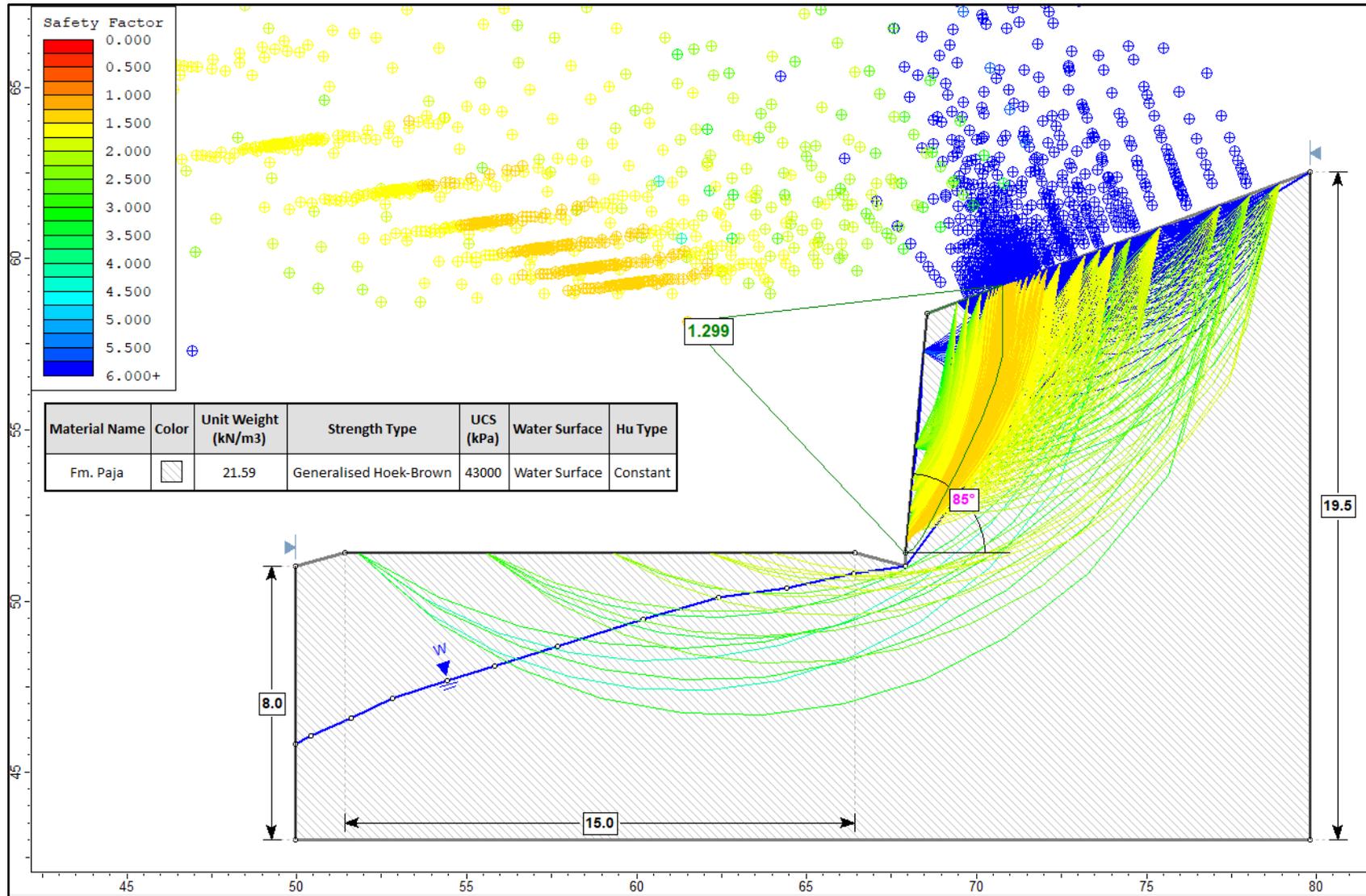


Figura 59. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-05.

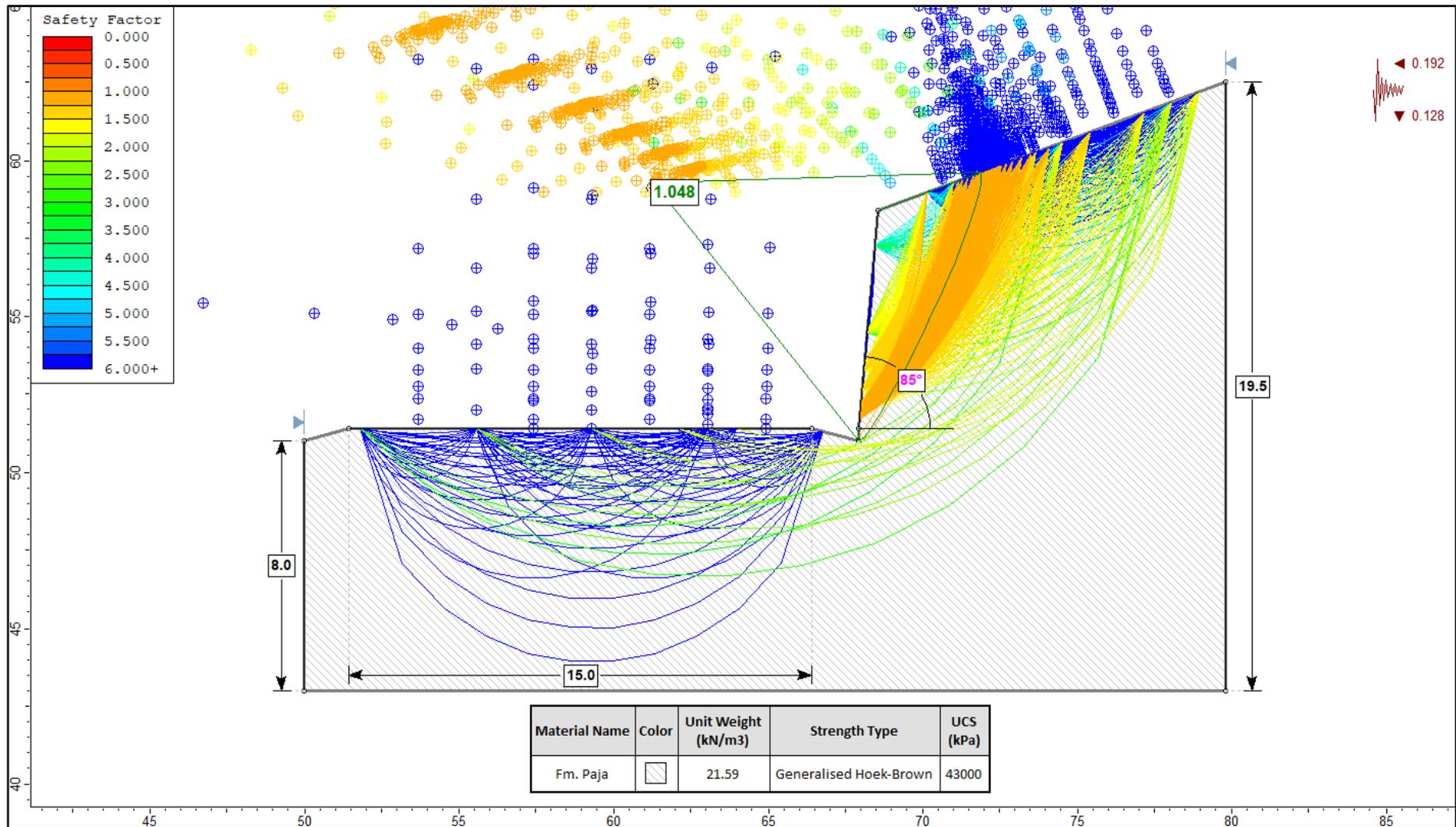


Figura 60. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en la ESTC-05.

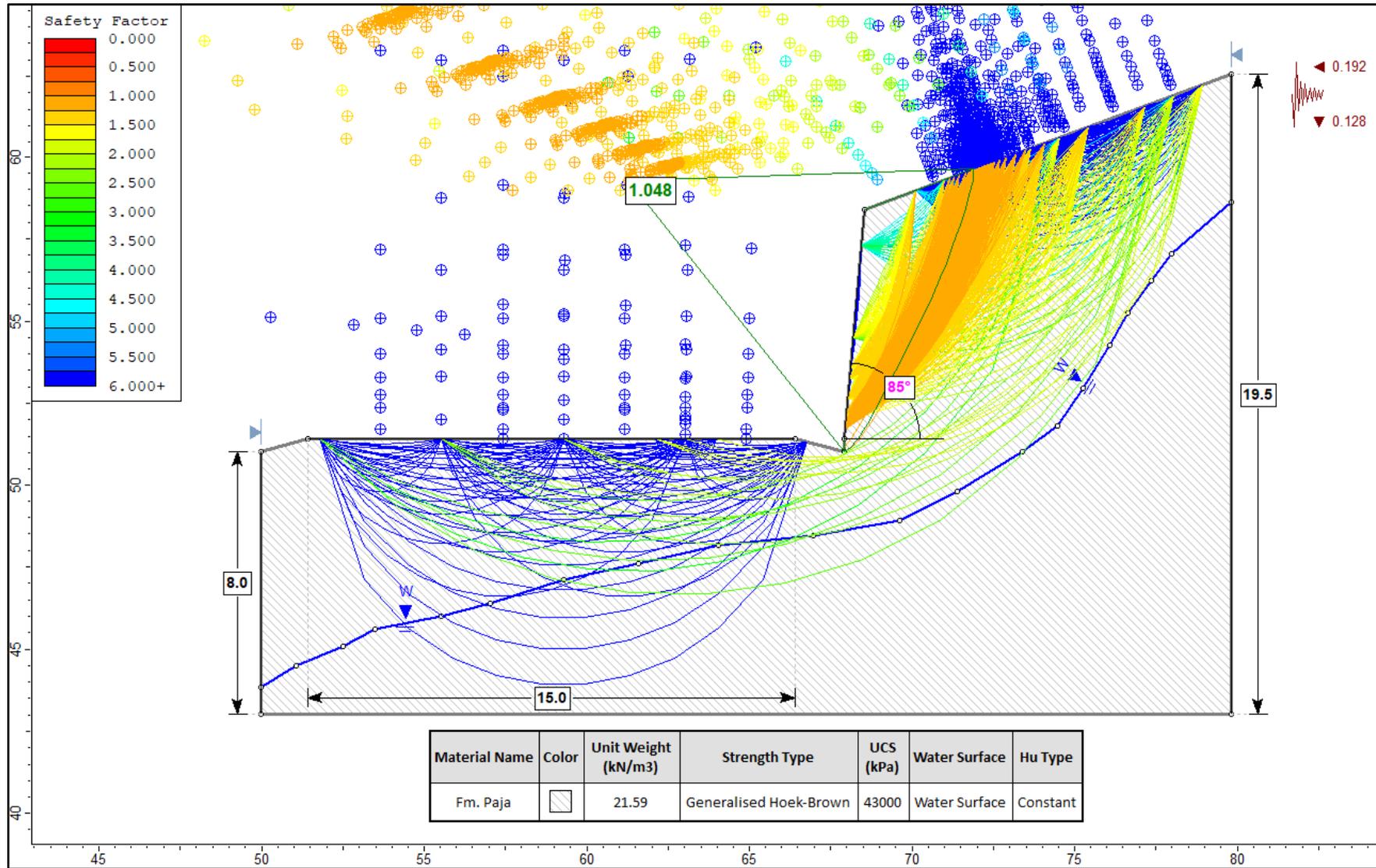


Figura 61. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-05.

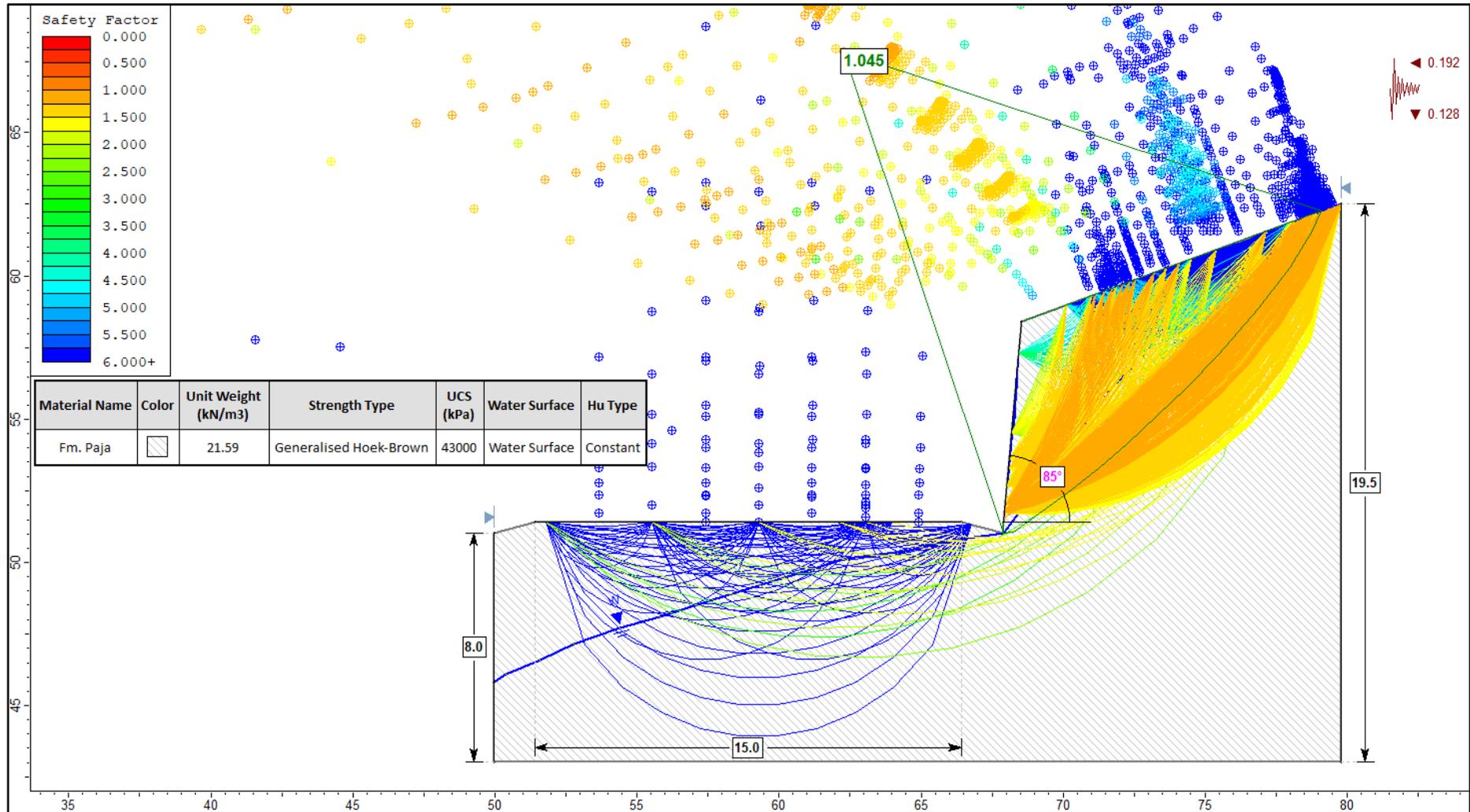


Figura 62. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-05.

3.9.6 Estación de Talud Crítico 06 (ESTC-06)

Esta estación se encuentra ubicado al margen derecho de la carretera entre las progresivas Km 117+330 – Km 117+350, y a su vez, se ubica dentro de la Formación Tablazo (Kit) que consta de areniscas calcáreas. Presenta un grado de meteorización moderado y un grado de fracturamiento moderado presentando hasta tres familias de discontinuidades. El talud tiene una altura de 20 m con una inclinación de 85°, la cresta mantiene la morfología natural del terreno y se tiene un ancho de carretera de 12 m.

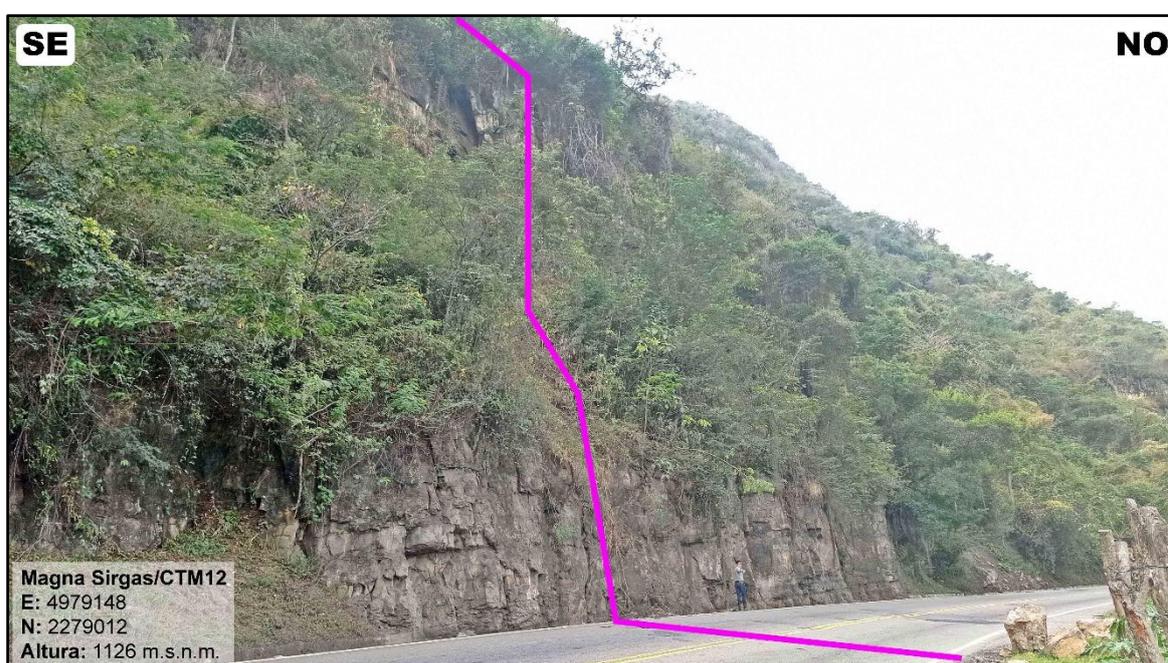


Foto 18. Perfil de la ESTC-06 compuesto por areniscas calcáreas.

Tabla 46. Datos del talud y macizo rocoso en la ESTC-06.

MACIZO ROCOSO					
Litología / Formación		Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	
Areniscas calcáreas / Fm. Tablazo		Ligera	Medio	Bloq. regular	
GEOMETRÍA DEL TALUD					
Altura	Pie	Orientación	Talud	Cabeza	
20 m	12 m	D	85	45	
		DD	335	335	

Para el cálculo de la resistencia a la compresión uniaxial, se utilizó el Martillo de Schmidt (esclerómetro), realizando las medidas en la roca presente en el talud, además, según el análisis de laboratorio se tiene la densidad para las areniscas calcáreas de 25,53 kN/m³.

Teniendo la información mencionada, se realizó la corrección de las medidas en el gráfico de Miller, obteniendo un valor estimado de la resistencia a la compresión uniaxial (RCU); donde, $R_L = 46$ (ISRM revisada) es de 113 MPa. Obteniendo así un resultado final de la resistencia a la compresión uniaxial del talud (RCU_{TALUD}) de 113 MPa.

Tabla 47. Medidas con el Martillo de Schmidt para la ESTC-06.

LECTURAS	ARENISCAS CALCÁREAS	
	Medidas	Corregidas
Lectura 1	51	50
Lectura 2	54	53
Lectura 3	48	48
Lectura 4	44	44
Lectura 5	54	53
Lectura 6	54	53
Lectura 7	54	53
Lectura 8	54	53
Lectura 9	52	51
Lectura 10	41	42
Lectura 11	47	47
Lectura 12	52	51
Lectura 13	51	50
Lectura 14	54	53
Lectura 15	54	53
Lectura 16	40	41
Lectura 17	35	36
Lectura 18	28	30
Lectura 19	32	34
Lectura 20	30	32
Promedio		46
RCU		113 MPa

Para el cálculo del RQD se aplica una fórmula, en ese sentido, se procedió a calcular en las areniscas calcáreas; obteniendo un valor RQD del talud de 87,81%.

Tabla 48. Cálculo del RQD para la ESTC-06.

$RQD=100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda+1)$				
ROCAS	ND	L	λ	RQD
Areniscas calcáreas	30	5,0	6,0	87,81%

En cuanto al cálculo del RMR₈₉, según la valoración de la Tabla 49, el macizo rocoso se clasifica dentro de la Clase II, un valor RMR₈₉ de 71 y un índice de calidad de la roca Buena.

Tabla 49. Cálculo de RMR₈₉ para la ESTC-06.

RANGO DE VALORES					
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	> 250 (15)	100 - 250 (12)	50 - 100 (7)	25 - 50 (4)	5 - 25 (2) 1 - 5 (1) < 1 (0)
RQD	90 - 100 % (20)	75 - 90 % (17)	50 - 75 % (13)	25 - 50 % (8)	< 25 % (3)
Espaciamiento	> 2 m (20)	0.6 - 2 m (15)	0.2 - 0.6 m (10)	6 - 20 cm (8)	< 6 cm (5)
Estado de las discontinuidades	Persistencia	< 1 m (6)	1 - 3 m (4)	3 - 10 m (2)	10 - 20 m (1) > 20 m (0)
	Abertura	Cerrada (6)	< 0.1 mm (5)	0.1 - 1.0 mm (4)	1 - 5 mm (1) > 5 mm (0)
	Rugosidad	Muy rugosa (6)	Rugosa (5)	Lig. Rugosa (3)	Ondulada (1) Suave (0)
	Relleno	Ninguno (6)	Duro < 5 mm (4)	Duro > 5 mm (2)	Blando < 5 mm (2) Blando > 5 mm (0)
	Alteración	Inalterada (6)	Lig. Alterada (5)	Mod. Alterada (3)	Muy alterada (1) Descompuesta (0)
Flujo de agua en las discontinuidades	Secas (15)	Lig. húmedas (10)	Húmedas (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)
VALOR TOTAL RMR	71				

Para el cálculo del GSI se necesita el valor de $JCOND_{89}$, el cual se obtiene mediante la suma de cada valor de la condición de las discontinuidades (ver Tabla 49), mientras que el valor de RQD se extrae de la Tabla 48.

Tabla 50. Cálculo del GSI en función de la condición de las discontinuidades y el RQD.

$GSI = 1,5 JCOND_{89} + RQD/2$								
Roca	Valoración de la Condición de las Discontinuidades						RQD	GSI
	Persistencia	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	$JCOND_{89}$		
Areniscas calcáreas	4	4	5	4	5	22	87,81	76,91

Mediante el software RocData v.4 se determinó las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, el cual nos proporciona los siguientes parámetros de Hoek-Brown ($m=3.267$, $s=0.0213$, $a=0.501$) y Mohr-Coulomb (cohesión = 2.064 MPa, ángulo de fricción = 60.70°).

Se observa que la envolvente de tensiones principales queda encima de la línea de Mogi, lo que indica una rotura frágil. Además, el macizo rocoso presenta una resistencia a la tracción igual a -0.737 MPa, una resistencia compresiva uniaxial de 16.448 MPa, una resistencia compresiva triaxial o global del macizo rocoso igual a 29.623 MPa y un módulo de deformación de 9063.03 MPa.

En el análisis cinemático con el software Dips v.7 se observa que hay una probabilidad de 0% para que exista una rotura planar; mientras que, en el análisis de rotura en cuña existe una probabilidad de 55,43% con intersecciones críticas entre la familia de discontinuidades 1 y 2, con orientación noroeste y las familias de discontinuidades 2 y 3, con orientación noreste.

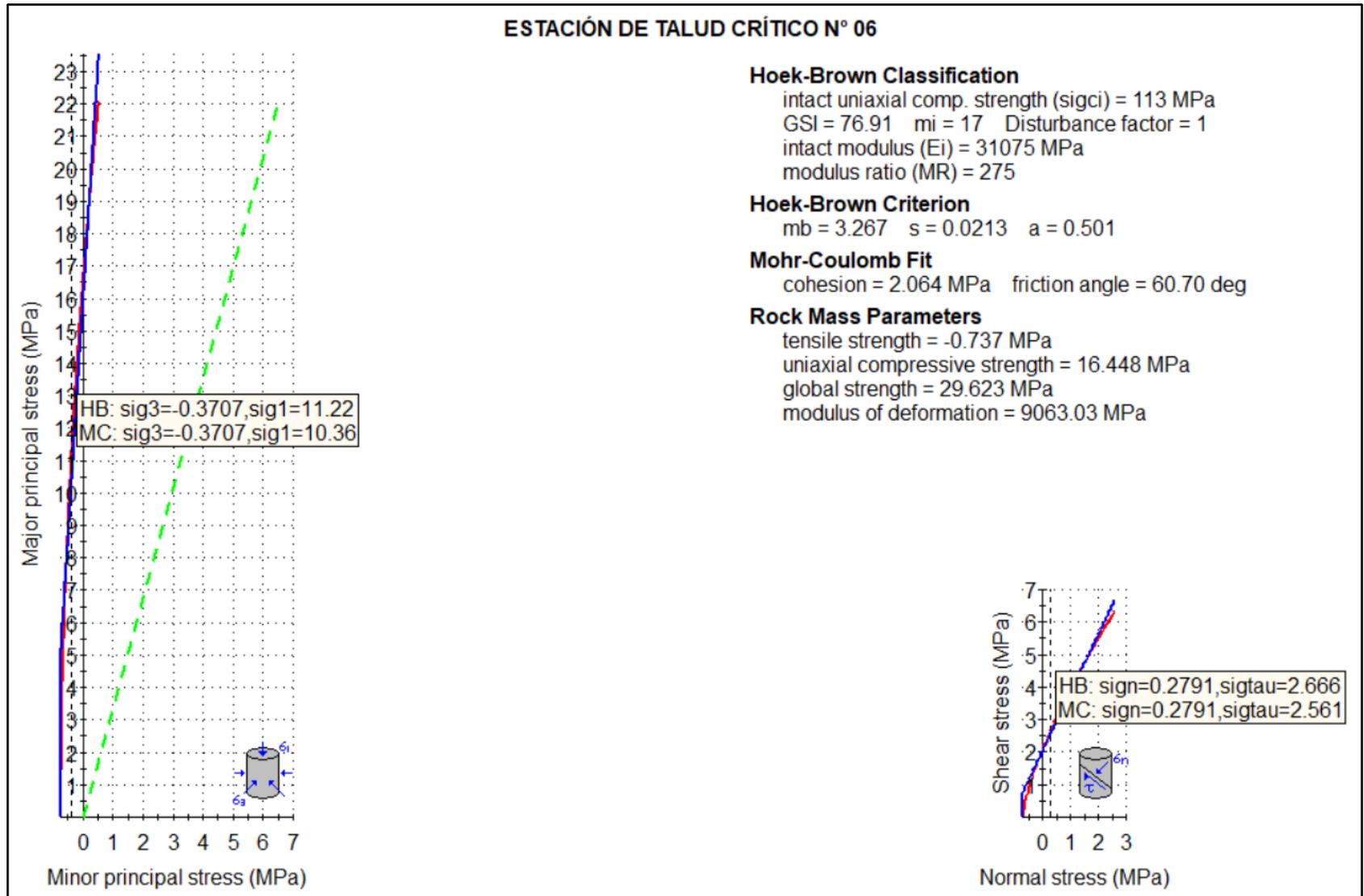


Figura 63. Análisis de las propiedades geomecánicas en la ESTC-06.

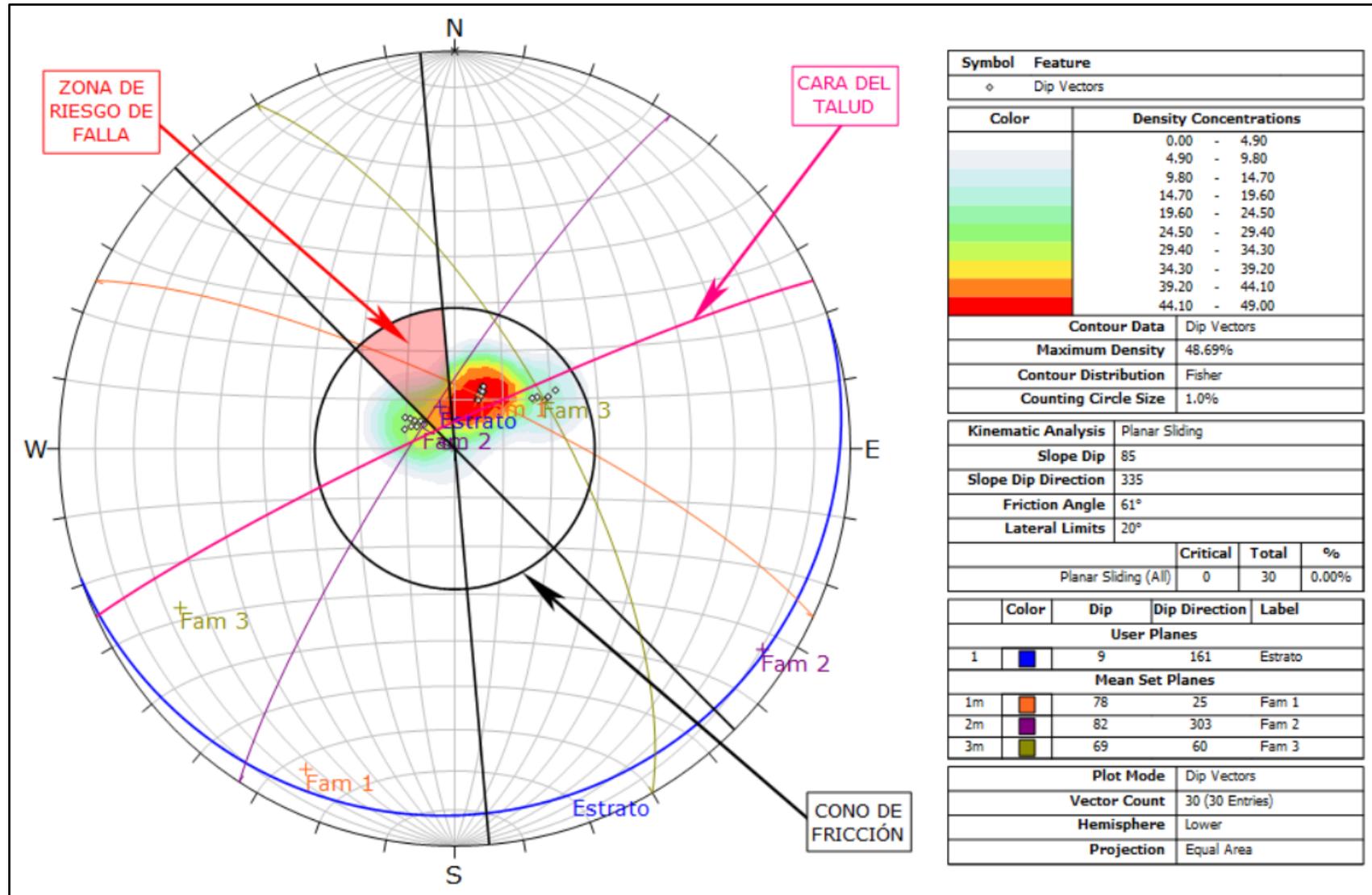


Figura 64. Análisis cinemático de probabilidad de rotura planar en la ESTC-06.

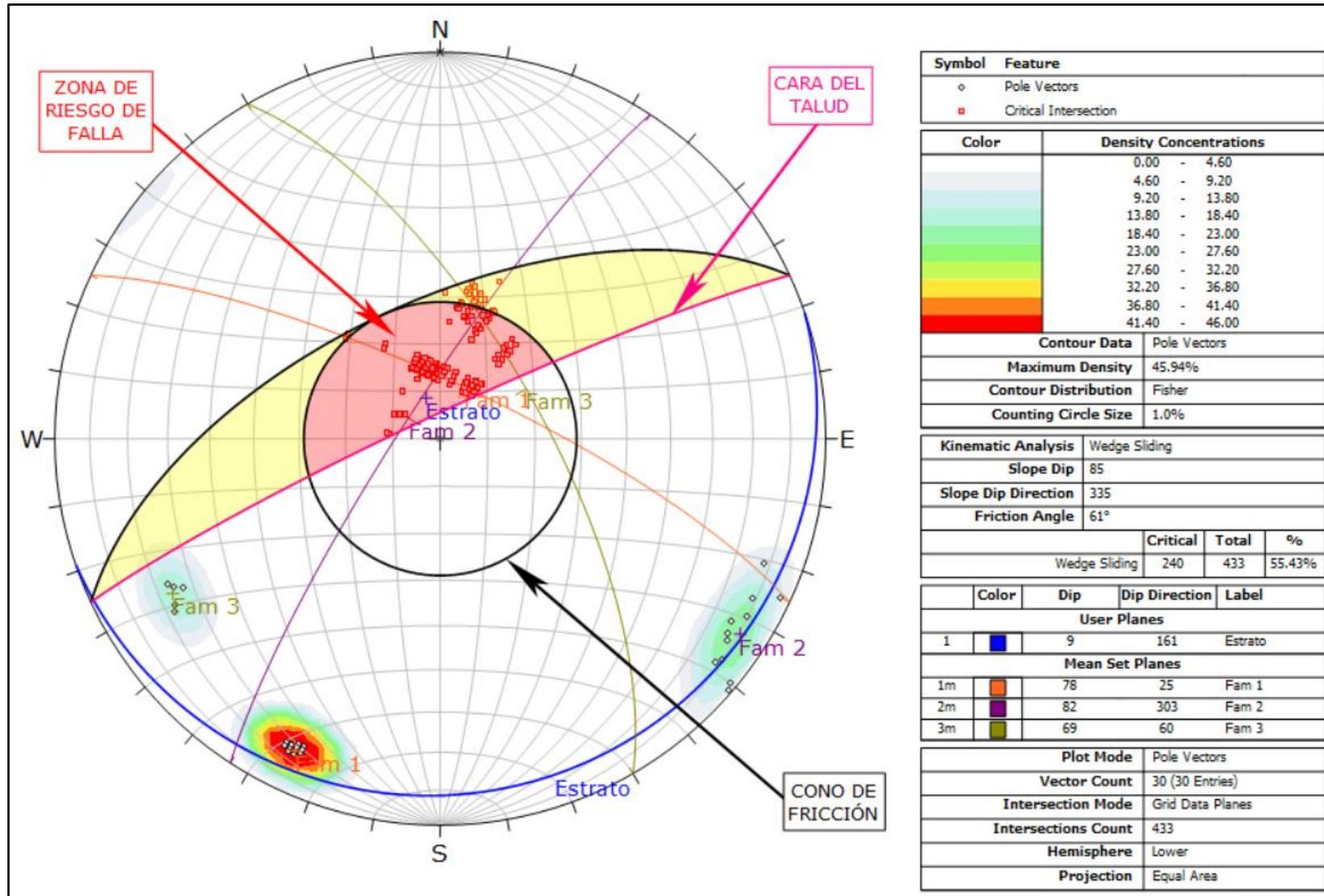


Figura 65. Análisis cinemático de probabilidad de rotura en cuña en la ESTC-06.

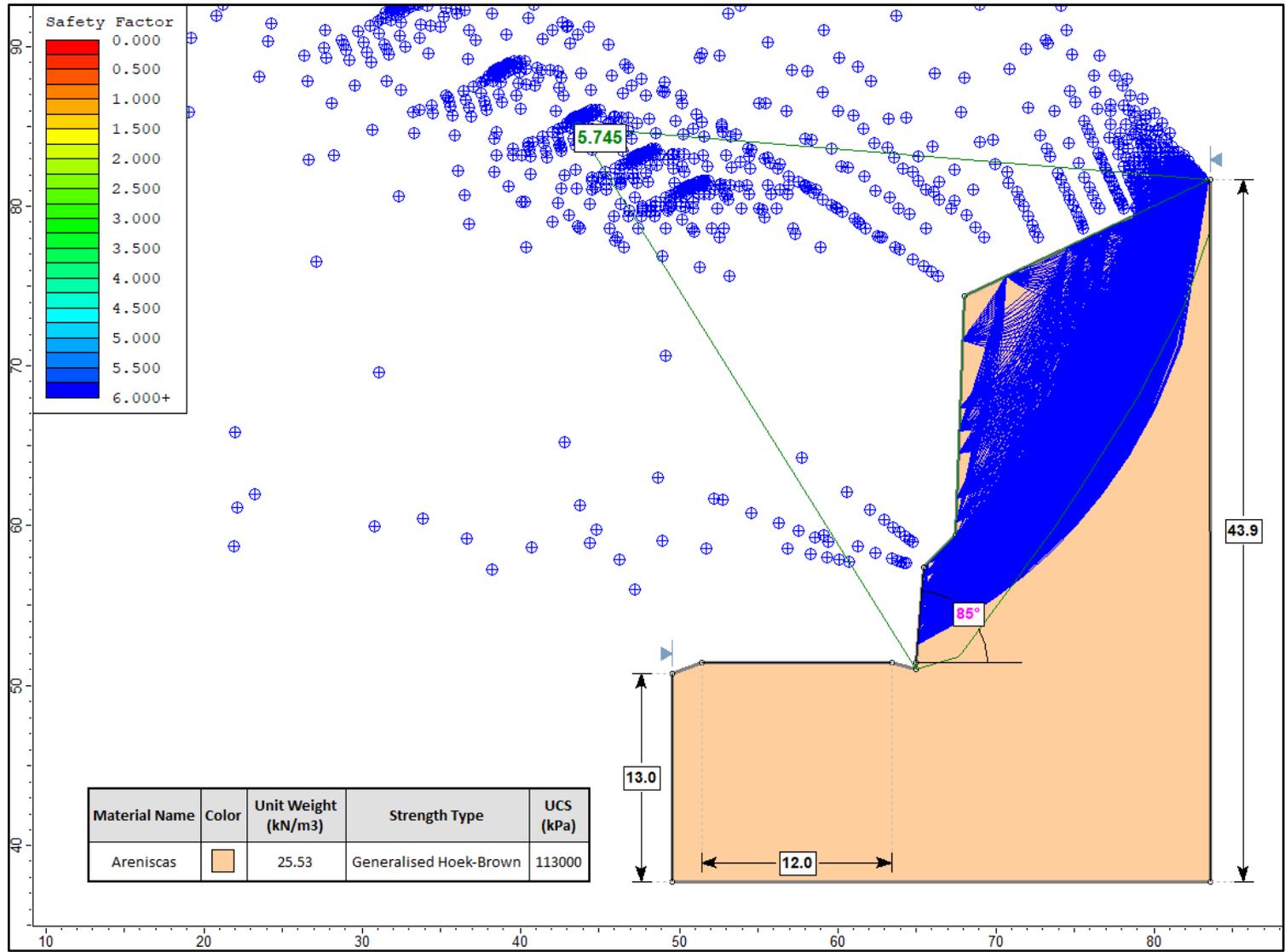


Figura 66. Análisis del Factor de Seguridad en condiciones normales en la ESTC-06.

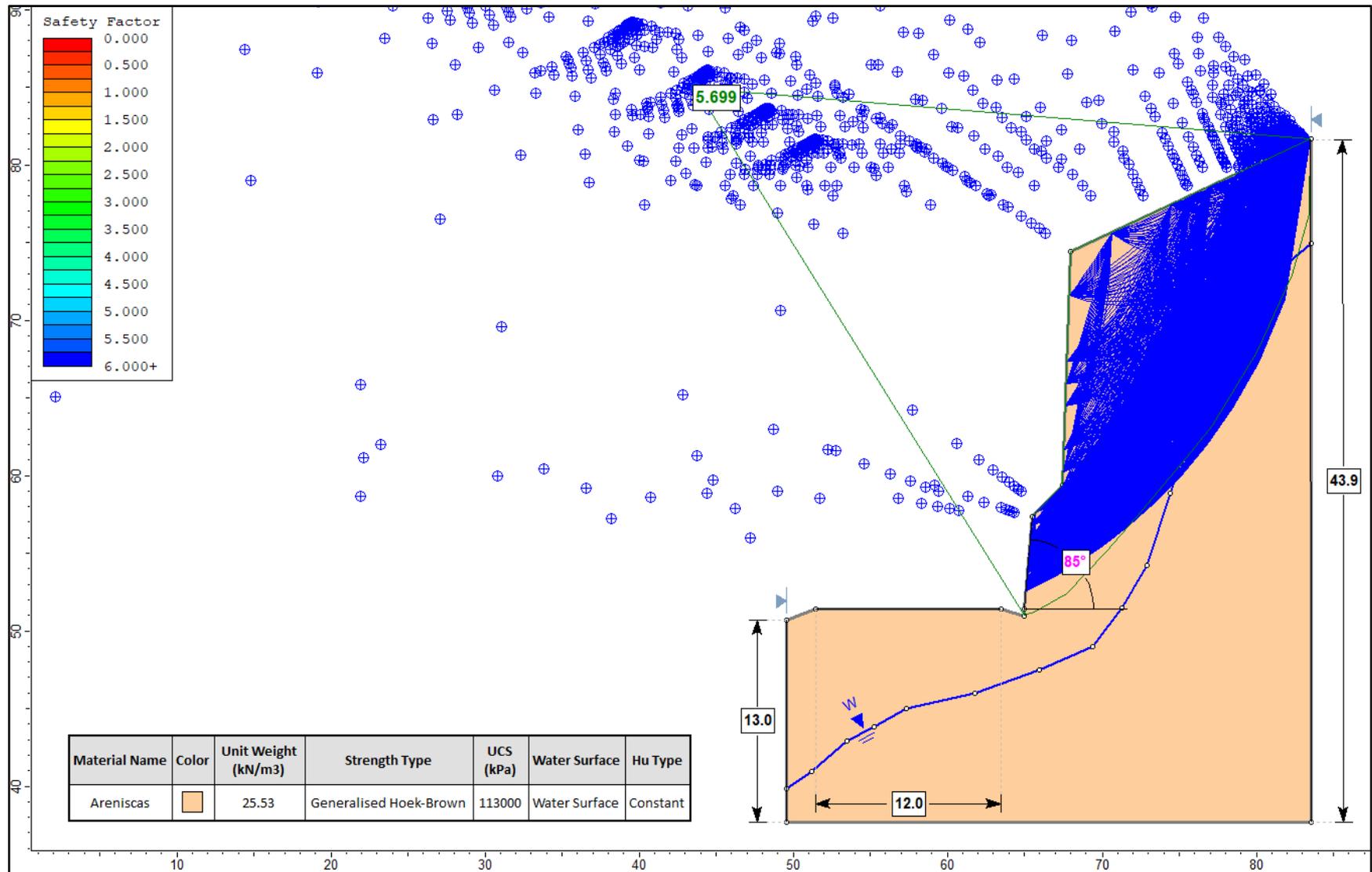


Figura 67. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial en la ESTC-06.

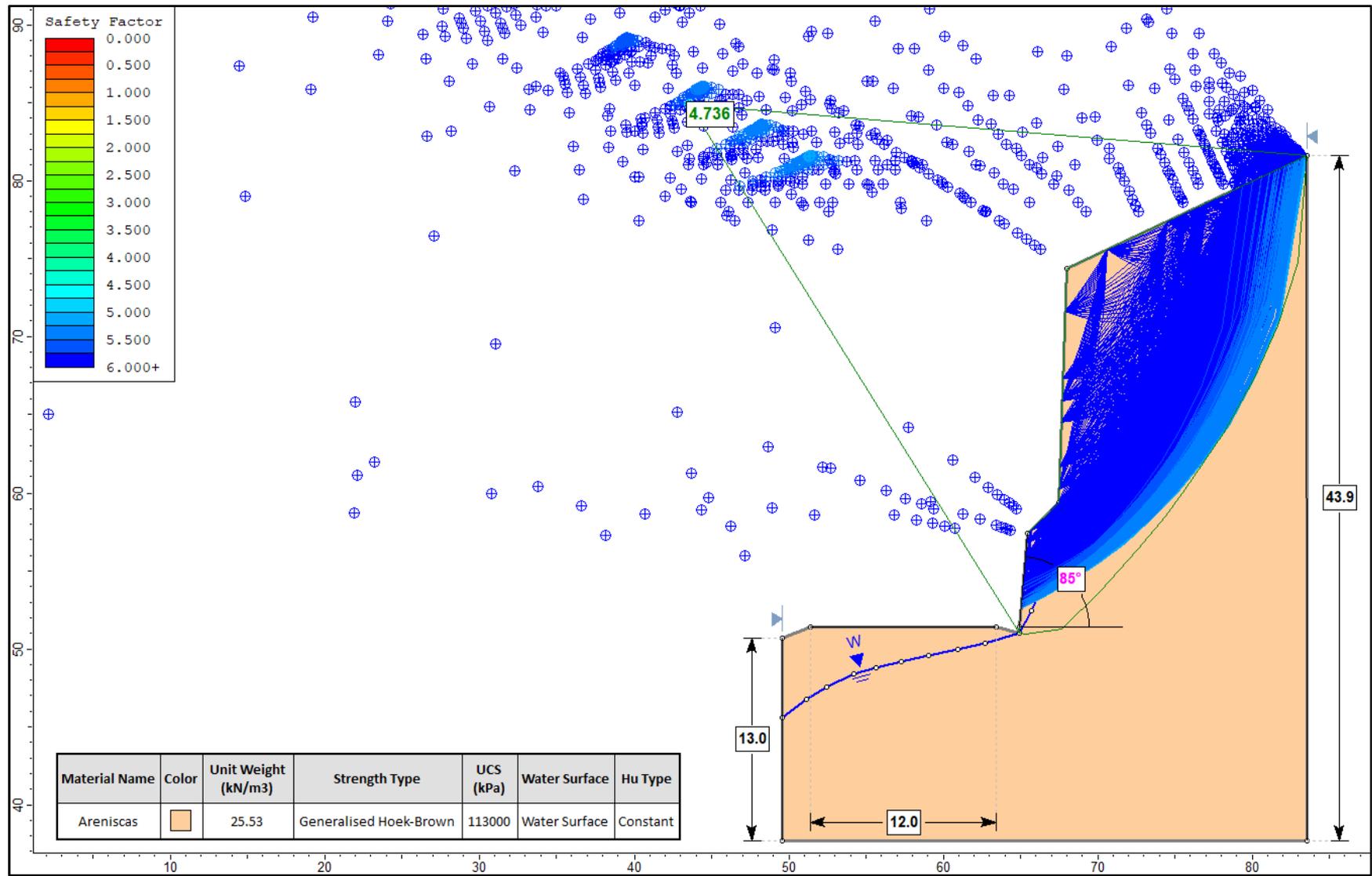


Figura 68. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total en la ESTC-06.

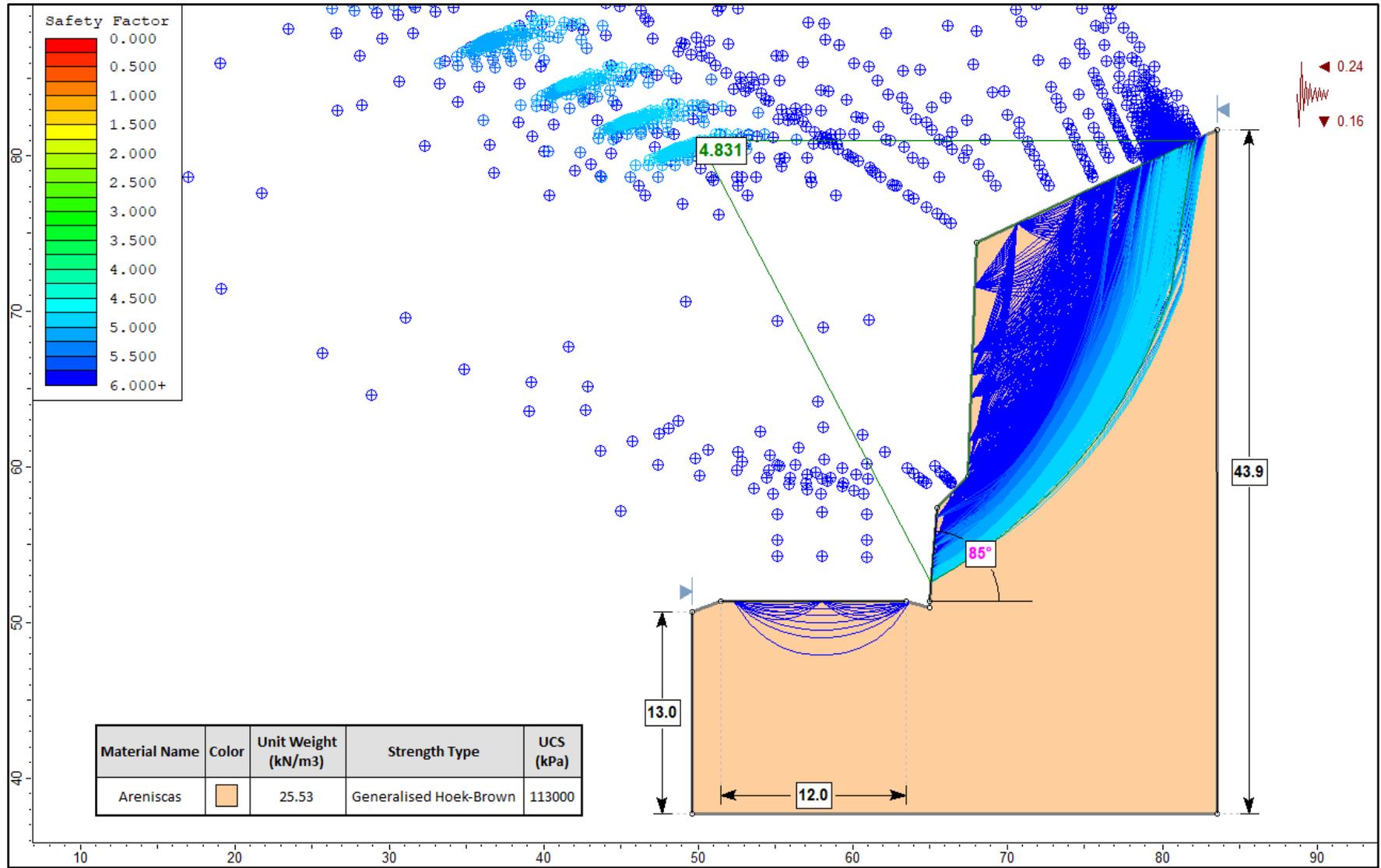


Figura 69. Análisis del Factor de Seguridad con sismicidad máxima en la ESTC-06.

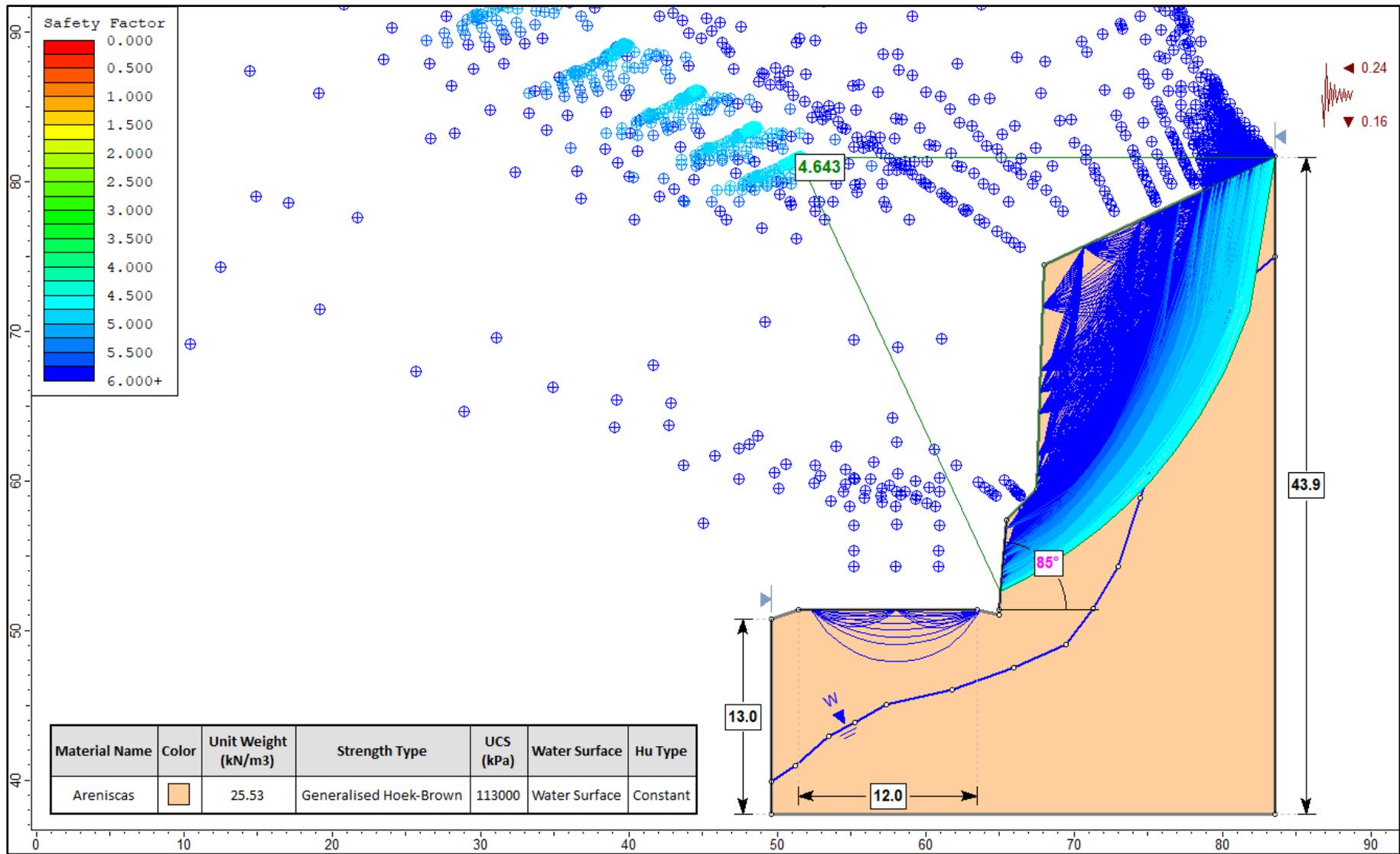


Figura 70. Análisis del Factor de Seguridad con saturación parcial y sismicidad máxima en ESTC-06.

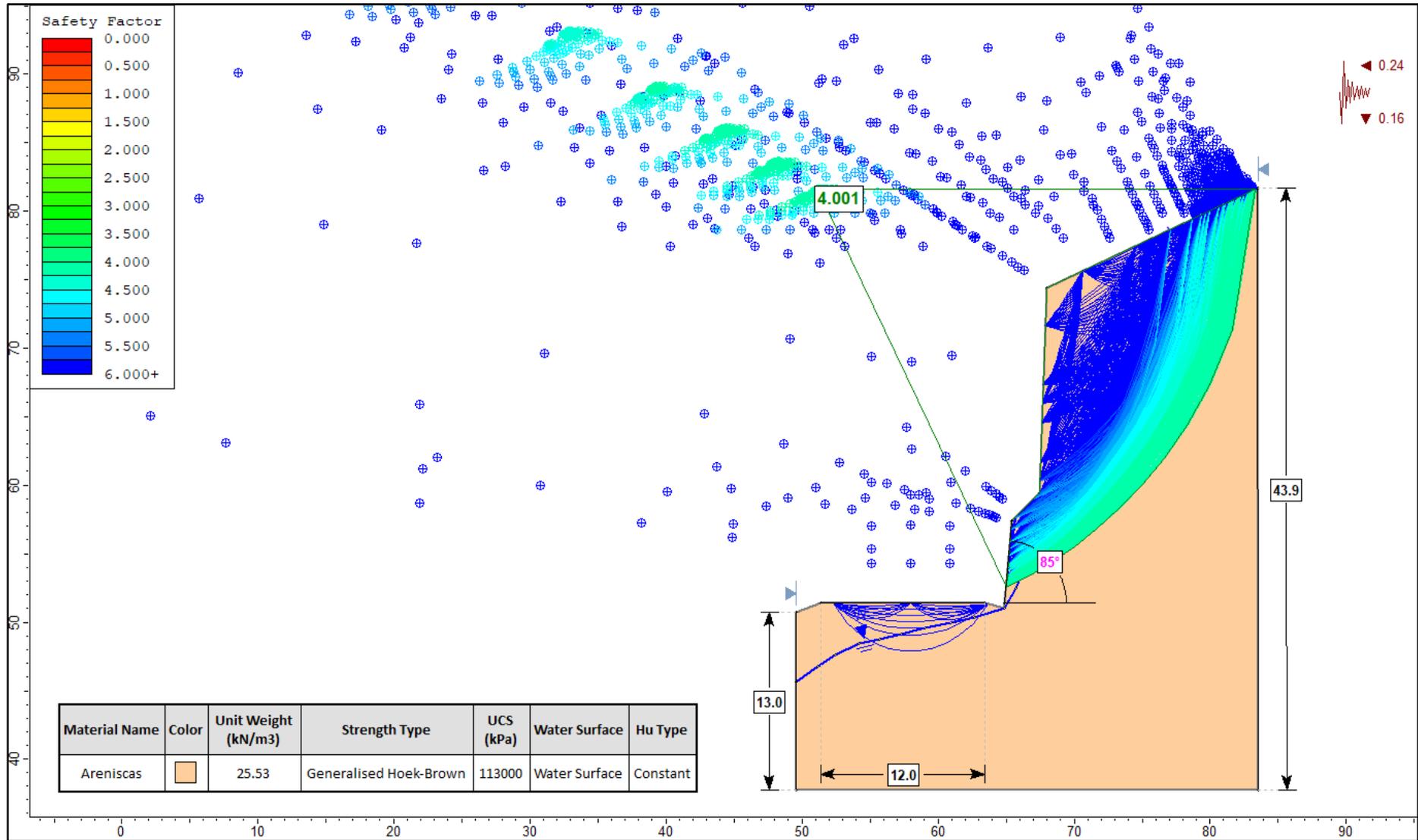


Figura 71. Análisis del Factor de Seguridad con saturación total y sismicidad máxima en ESTC-06.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1.1 Análisis geológico

En cuanto a la geología del área de investigación, se identificaron rocas del cretácico inferior tales como la Formación Rosablanca, constituida por areniscas limosas calcáreas, alternadas con calizas masivas; areniscas calcáreas, arcillolitas calcáreas. En cuanto a la Formación Paja, está constituida por lodolitas físciles calcáreas de hasta 25 cm de espesor, color negro, con nódulos calcáreos intercalados con margas de espesor medio y color gris oscuro con geometría tabular. La Formación Tablazo está constituida por intercalaciones de capas tabulares gruesas (aproximadamente 1,5 m) de calizas de color gris azulado, también se evidencia la presencia de calizas margosas y capas de lodolitas físciles de color grisáceo; además algunas capas de areniscas calcáreas de color marrón, de grano fino, dispuestas en capas gruesas tabulares. Depósito cuaternario de derrubio, compuesto por cantos de calizas y areniscas calcáreas de tamaño heterogéneo, angulosos a subangulosos, con matriz limo arcillosa.

Estructuralmente el área de estudio comprende eventos tectónicos compresivos con rumbo SO-NE, las estructuras principales son pliegues y fallas regionales, donde la zona de estudio está controlada por la falla regional de Confines y plegamientos asociados a esta. Los pliegues presentan una orientación SO-NE y una compresión NO-SE.

Tabla 51. Unidades estratigráficas del área de investigación.

Era	Periodo	Época	Edad	Unidad Estratigráfica	Simbología	
Cenozoico	Cuaternario	Reciente		Depósito de derrubio	Qd	
			Albiense	Superior Inferior	Formación Tablazo	Kit
			Aptiense	Superior Inferior	Formación Paja	Kip
Mesozoico	Cretácico	Inferior	Barremiense	Superior Inferior		
			Hauteriviense	Superior Inferior	Formación Rosablanca	Kir
			Valanginiense	Superior Inferior		

Las características geomorfológicas relacionadas a procesos tectónicos, controladas por las estructuras geológicas de la zona, generando geoformas de tipo estructural. Una consecuencia del modelado paisajístico son los procesos continuos tales como la erosión y la remoción de masas, a causa de factores como el clima, el agua y la intervención del hombre sobre su entorno; donde al asociarse estos agentes se generan geoformas de origen denudacional. Se observa también que los procesos tectónicos han producido estructuras de sencilla identificación a partir de su relieve de rocas duras y blandas que presentan control estructural y que el paisaje ha sido modelado por factores atmosféricos, teniendo un grado de alteración bajo; generando geoformas de origen estructural.

4.1.2 Análisis geomecánico

Con la caracterización geomecánica se determinó las propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso y las propiedades de las discontinuidades, en donde se empleó metodologías para la caracterización del macizo rocoso, así como el procesamiento de la misma.

El método utilizado para la clasificación geomecánica es la línea de detalle (detail line) in situ, a partir del cual se obtuvo el RQD, los valores de clasificación del RMR₈₉ y el GSI. Estos resultados se observan en la Tabla 52 y se plasma en el plano geomecánico (ver Anexos).

Los resultados muestran que el RQD es variado y tiene la calidad de la roca pobre y buena en la ESTC-01, calidad pobre, regular y buena en la ESTC-02 y ESTC-03, calidad pobre en la ESTC-04 y ESTC-05, y calidad buena en la ESTC-06. En cuanto al RMR_{89} , se observa que la tabla muestra la calidad del macizo rocoso mala (clase IV) y buena (clase II) en la ESTC-01; calidad mala (clase IV), regular (clase III) y buena (clase II) en la ESTC-02 y ESTC-03; la ESTC-04 y ESTC-05 tienen una calidad regular (clase III); finalmente se tiene la ESTC-06 que es de calidad buena (clase II). Con respecto al GSI, se observan valores con un rango que va desde 30 – 76, evidenciando así la blocosidad de los macizos rocosos; además, debemos tener en cuenta que este índice se aplica en campo y se correlaciona con los datos de la evaluación de la rugosidad y alteración de la superficie de las discontinuidades.

Tabla 52. Clasificación geomecánica de los taludes analizados.

ESTACIÓN	MATERIAL		RQD		RMR ₈₉			GSI
			Valor (%)	Calidad	Valor	Clase	Calidad	Valor
ESTC-01	Lodolitas	Roca	25,98	Pobre	38	IV	Mala	32,49
	Calizas	Roca	88,78	Buena	66	II	Buena	74,39
ESTC-02	Lodolitas	Roca	26,74	Pobre	40	IV	Mala	32,87
	Areniscas	Roca	67,35	Regular	57	III	Regular	63,68
	Calizas	Roca	77,61	Buena	64	II	Buena	73,31
ESTC-03	Calizas	Roca	78,34	Buena	73	II	Buena	75,37
	Lodolitas	Roca	27,13	Pobre	38	IV	Mala	30,07
	Areniscas	Roca	66,26	Regular	58	III	Regular	60,13
ESTC-04	Lodolitas y margas	Roca	31,79	Pobre	41	III	Regular	36,90
ESTC-05	Lodolitas y margas	Roca	26,55	Pobre	41	III	Regular	34,28
ESTC-06	Areniscas	Roca	87,81	Buena	71	II	Buena	76,91

Para poder determinar las propiedades mecánicas de los macizos rocosos, se empleó el software RocData v.4, el cual se fundamenta en los criterios de Hoek – Brown y Mohr – Coulomb; teniendo así, los parámetros de entrada (ver Tabla 53) tales como la resistencia a la compresión uniaxial (σ_{ci}), el valor del GSI, la constante del material (mi), el factor de perturbación (D), el módulo de elasticidad de la roca intacta (Ei), el módulo de ratio (MR). Al ser analizado en taludes, se ingresó otros parámetros de entrada como la altura del talud (H) y la densidad de la roca (γ) de cada estación.

Tabla 53. Parámetros de entrada en el software RocData v.4.

ESTACIÓN		σ_{ci} (MPa)	GSI	m_i	D	MR	E_i (MPa)	γ (MN/m ³)	H (m)
ESTC-01	Lodolitas	25	32,49	6	1,0	200	5000	0,02121	7
	Calizas	128	74,39	10	1,0	700	89600	0,025105	
ESTC-02	Lodolitas	25	32,87	6	1,0	200	5000	0,02012	16
	Areniscas	55	63,68	17	1,0	275	15125	0,02266	
	Calizas	74	73,31	10	1,0	700	51800	0,02325	
ESTC-03	Calizas	117	75,37	10	1,0	700	81900	0,02343	19
	Lodolitas	25	30,07	6	1,0	200	5000	0,02049	
ESTC-04	Areniscas	62	60,13	17	1,0	275	17050	0,02159	7
	Lodolitas y margas	43	36,90	5	1,0	225	9675	0,02106	
ESTC-05	Lodolitas y margas	43	34,28	5	1,0	225	9675	0,02159	7
ESTC-06	Areniscas	113	76,91	17	1,0	275	31075	0,02553	20

Con respecto a los parámetros de salida que presenta el software RocData v.4 (ver Tabla 54), tenemos al rango de la envolvente de rotura (σ_{3max}), los parámetros del criterio de rotura generalizado de Hoek - Brown (mb , s y a), los parámetros de Mohr - Coulomb equivalente (c y ϕ) y los parámetros del macizo rocoso (σ_t , σ_c , σ_{cm} , E_{rm}).

Tabla 54. Parámetros de salida del software RocData v.4.

ESTACIÓN	σ_{3max} (MPa)	Parámetros del Criterio de Rotura Generalizado de Hoek-Brown			Parámetros de Mohr-Coulomb equivalente		Parámetros del Macizo Rocosos			
		mb	s	a	c (MPa)	ϕ	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	σ_{cm} (MPa)	E_{rm} (MPa)
ESTC-01	0,1219	0,048	0,0088	0,519	0,028	31,06	-0,007	0,073	0,638	151,35
	0,1971	1,605	0,0140	0,501	2,338	56,41	-1,117	15,086	24,140	23571,07
ESTC-02	0,2469	0,050	0,0093	0,518	0,042	26,02	-0,007	0,076	0,650	153,12
	0,3464	1,270	0,0024	0,502	0,375	56,31	-0,102	2,631	8,402	2293,41
	0,3695	1,486	0,0117	0,501	1,245	54,17	-0,583	7,967	13,283	12993,16
ESTC-03	0,4573	1,722	0,0165	0,501	2,343	54,93	-1,121	14,970	23,095	22457,32
	0,2900	0,041	0,0215	0,522	0,040	22,93	-0,005	0,057	0,568	141,38
ESTC-04	0,3870	0,985	0,0013	0,503	0,337	54,96	-0,082	2,194	8,255	2093,51
	0,1284	0,055	0,0183	0,514	0,050	36,06	-0,021	0,193	1,223	340,39
ESTC-05	0,1300	0,046	0,0118	0,517	0,042	34,22	-0,016	0,150	1,086	310,01
ESTC-06	0,5298	3,267	0,0213	0,501	2,064	60,70	-0,737	16,448	29,623	9063,03

4.1.3 Análisis estereográfico – cinemático

En este análisis se utilizó las proyecciones estereográficas en el software Dips v.7, con la finalidad de identificar zonas de riesgo de falla, teniendo en cuenta las distintas familias de discontinuidades, plano de estratificación y el ángulo de fricción interna de la roca, en función del buzamiento (D) y la dirección de buzamiento (DD) del talud. Esta evaluación permite identificar posibles roturas planares y en cuña, logrando conseguir los resultados que se muestran en la Tabla 55.

Teniendo así, una rotura planar nula en todas las estaciones de talud crítico, a excepción de la ESTC-05, que presenta un porcentaje de probabilidad despreciable; mientras que, en la rotura en cuña, se tiene unos porcentajes de probabilidad muy alto en las estaciones de talud crítico 02 y 06, mientras que las estaciones de talud crítico 01, 03, 04 y 05 presenta valores considerables de probabilidad de rotura en cuña.

Tabla 55. Análisis cinemático - estereográfico de los taludes.

ESTACIÓN	ANÁLISIS CINEMÁTICO	
	Rotura Planar (%)	Rotura en Cuña (%)
ESTC-01	0,00	26,25
ESTC-02	0,00	45,38
ESTC-03	0,00	25,08
ESTC-04	0,00	10,46
ESTC-05	8,14	19,70
ESTC-06	0,00	55,43

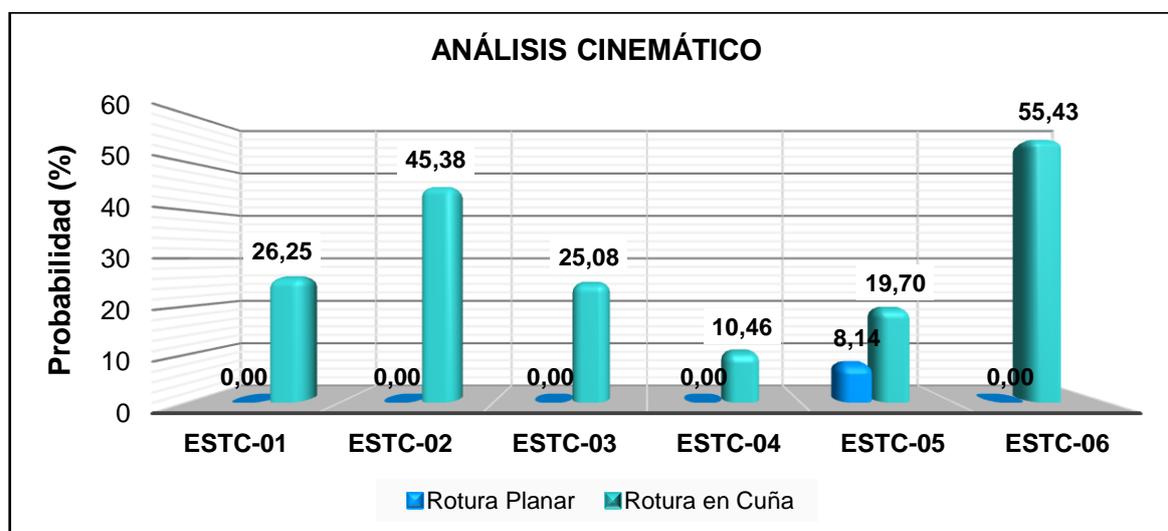


Figura 72. Gráfica estadística del análisis cinemático.

4.1.4 Análisis de estabilidad

Para realizar este análisis nos apoyamos del software Slide v.6, utilizando los modelos de análisis dentro del método de Equilibrio Límite: Bishop Simplificado, GLE/Morgenstern – Price y Spencer, los cuales utilizan el equilibrio de fuerzas y momentos, además que el tipo de superficie de falla es no circular.

Para analizar se determinó seis condiciones que representen el estado actual y el pronóstico del talud; siendo estas, en condiciones normales, saturación parcial, saturación total, sismicidad máxima, sismicidad máxima con saturación parcial y sismicidad máxima con saturación total.

Concerniente a los parámetros de entrada en el software Slide v.6, se tiene a los geométricos (sección transversal del talud, altura, buzamiento y dirección de buzamiento), geotécnicos (caracterización geomecánica), sísmicos (según el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10) e hidrogeológicos (a través de un nivel freático, el cual creará escenarios de saturación y cambios en las tensiones efectivas lo que incrementará la probabilidad de falla).

A continuación, se muestra en la Tabla 56 los rangos del factor de seguridad que se emplearán para la zonificación de cada estación de talud crítico analizado. Además, se presenta gráficos estadísticos de la Tabla 57 que muestra los resultados de los análisis de equilibrio límite, conteniendo los seis escenarios posibles para cada estación de talud crítico analizado; asimismo se presenta el plano de zonificación (ver Anexos).

Tabla 56. Rangos de Factor de Seguridad.

Factor de Seguridad	
Inestable	< 1,0
Estable relativo	1,0 - 1,3
Estable a corto plazo	1,3 - 1,5
Estable a largo plazo	> 1,5

Fuente: Elaborado con base Hoek 2007.

Tabla 57. Análisis del Factor de Seguridad en seis escenarios posibles.

ESTACIÓN	ESCENARIO	MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE (F.S.)			FACTOR DE SEGURIDAD	CONDICIÓN
		Bishop Simplificado	GLE/Morgenstern-Price	Spencer		
ESTC-01	Condiciones Normales (CN)	6,978	7,012	6,835	6,942	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	6,958	5,897	6,211	6,355	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	5,687	5,021	5,333	5,347	Estable a largo plazo
	Sismicidad Máxima (SM)	4,795	4,899	4,802	4,832	Estable a largo plazo
	Combinación SP y SM	4,666	3,960	3,988	4,205	Estable a largo plazo
	Combinación ST y SM	4,025	3,823	4,001	3,950	Estable a largo plazo
ESTC-02	Condiciones Normales (CN)	2,136	2,693	2,682	2,504	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	2,037	1,899	2,010	1,982	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	1,506	1,497	1,488	1,497	Estable a corto plazo
	Sismicidad Máxima (SM)	1,603	1,718	1,723	1,681	Estable a largo plazo
	Combinación SP y SM	1,512	1,539	1,527	1,526	Estable a largo plazo
	Combinación ST y SM	1,080	1,176	1,153	1,136	Estable relativo
ESTC-03	Condiciones Normales (CN)	5,502	5,734	5,828	5,688	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	5,151	5,160	5,263	5,191	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	4,440	4,523	4,584	4,516	Estable a largo plazo
	Sismicidad Máxima (SM)	3,967	3,840	3,887	3,898	Estable a largo plazo
	Combinación SP y SM	3,744	3,833	3,764	3,780	Estable a largo plazo
	Combinación ST y SM	2,786	2,845	2,793	2,808	Estable a largo plazo

ESTACIÓN	ESCENARIO	MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE (F.S.)			FACTOR DE SEGURIDAD	CONDICIÓN
		Bishop Simplificado	GLE/Morgenstern-Price	Spencer		
ESTC-04	Condiciones Normales (CN)	1,543	1,497	1,512	1,517	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1,543	1,908	1,562	1,671	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	1,388	1,380	1,410	1,393	Estable a corto plazo
	Sismicidad Máxima (SM)	1,283	1,294	1,288	1,288	Estable relativo
	Combinación SP y SM	1,283	1,254	1,221	1,253	Estable relativo
	Combinación ST y SM	1,081	1,024	1,062	1,056	Estable relativo
ESTC-05	Condiciones Normales (CN)	1,299	1,529	1,518	1,449	Estable a corto plazo
	Saturación Parcial (SP)	1,299	1,463	1,398	1,387	Estable a corto plazo
	Saturación Total (ST)	1,299	1,282	1,295	1,292	Estable relativo
	Sismicidad Máxima (SM)	1,048	1,109	1,070	1,076	Estable relativo
	Combinación SP y SM	1,048	1,104	1,053	1,068	Estable relativo
	Combinación ST y SM	1,045	1,085	1,078	1,069	Estable relativo
ESTC-06	Condiciones Normales (CN)	5,745	5,879	6,002	5,875	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	5,699	5,725	5,801	5,742	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	4,736	4,697	4,641	4,691	Estable a largo plazo
	Sismicidad Máxima (SM)	4,831	4,938	4,875	4,881	Estable a largo plazo
	Combinación SP y SM	4,643	4,857	4,891	4,797	Estable a largo plazo
	Combinación ST y SM	4,001	4,139	4,155	4,098	Estable a largo plazo

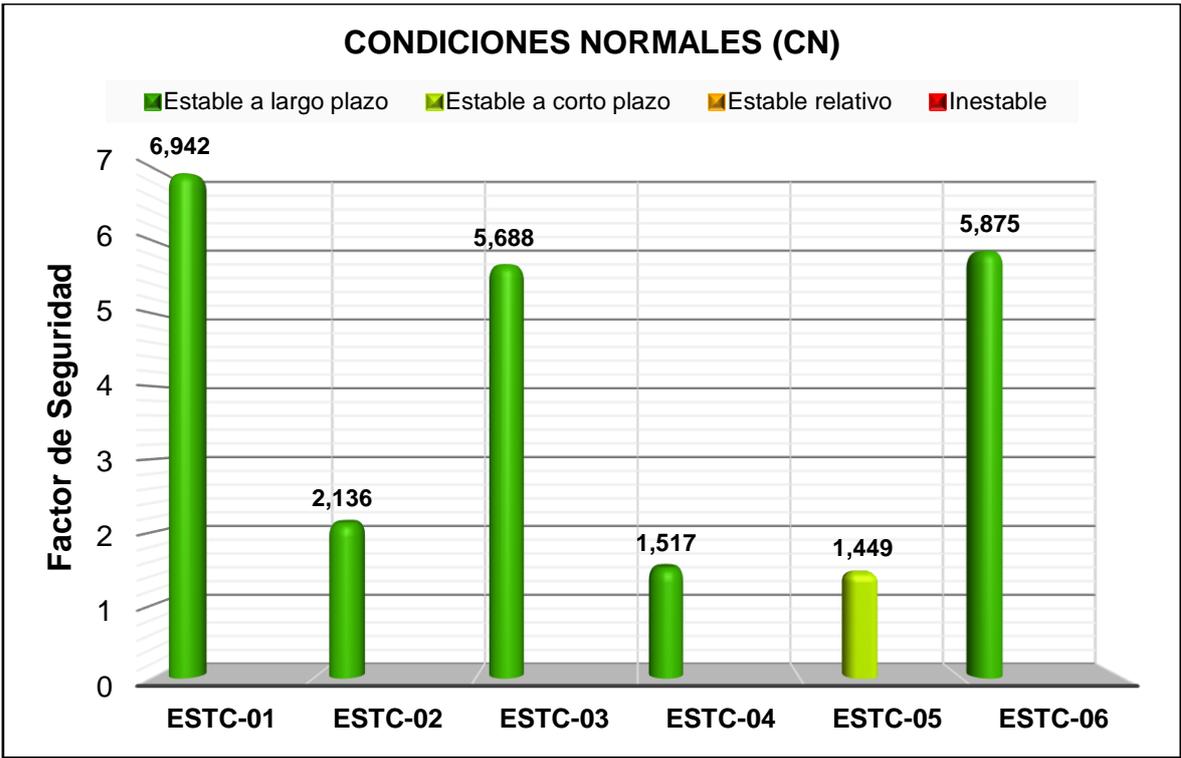


Figura 73. Gráfica estadística del Factor Seguridad en condiciones normales.

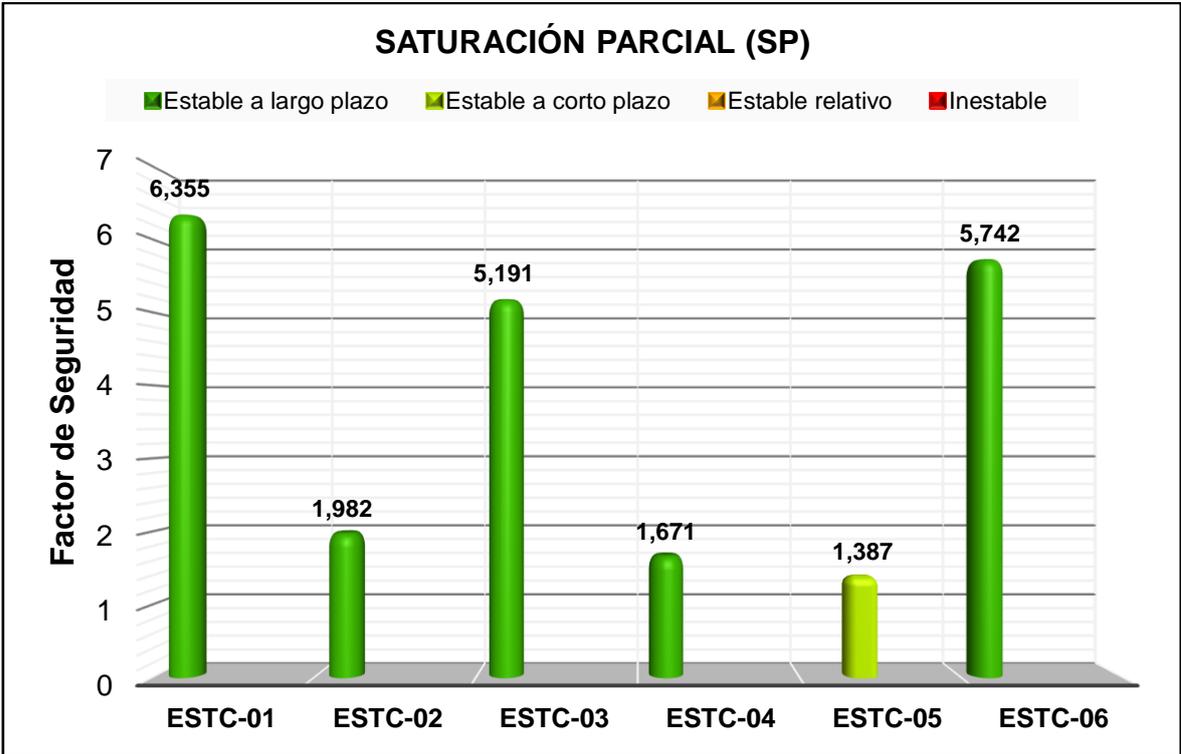


Figura 74. Gráfica estadística del Factor Seguridad en un escenario de saturación parcial.

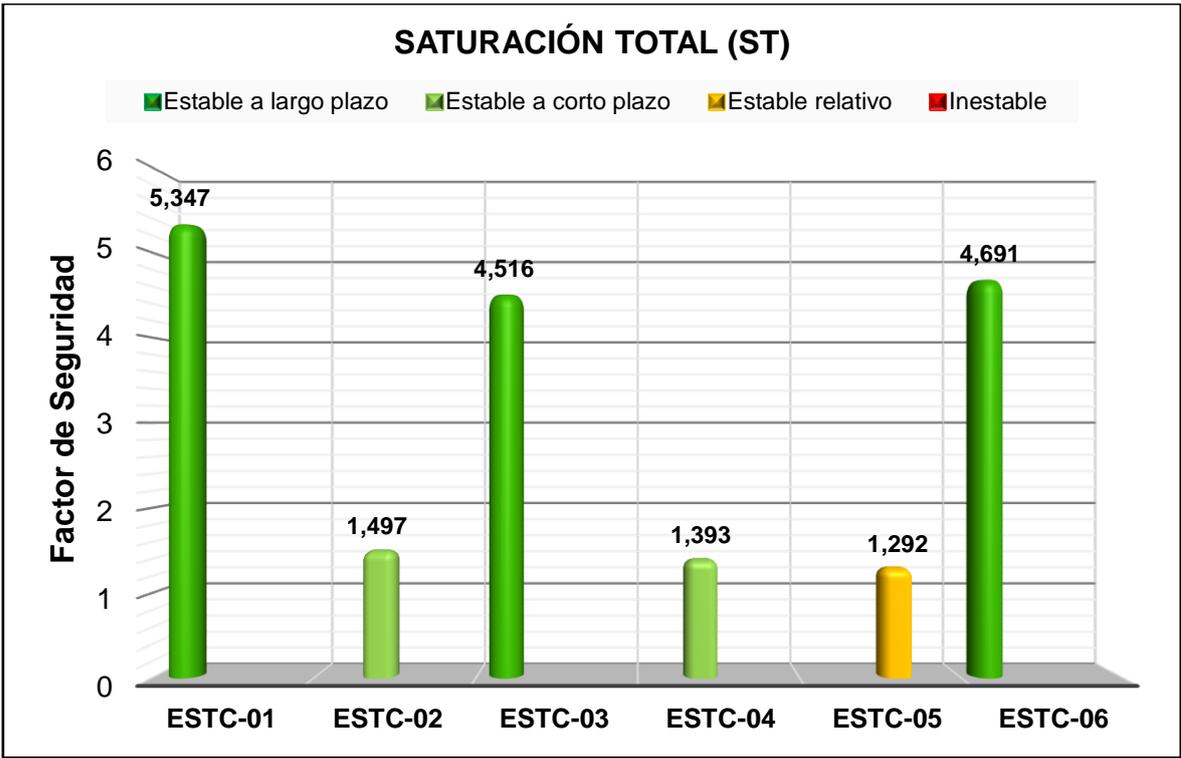


Figura 75. Gráfica estadística del Factor Seguridad en un escenario de saturación total.

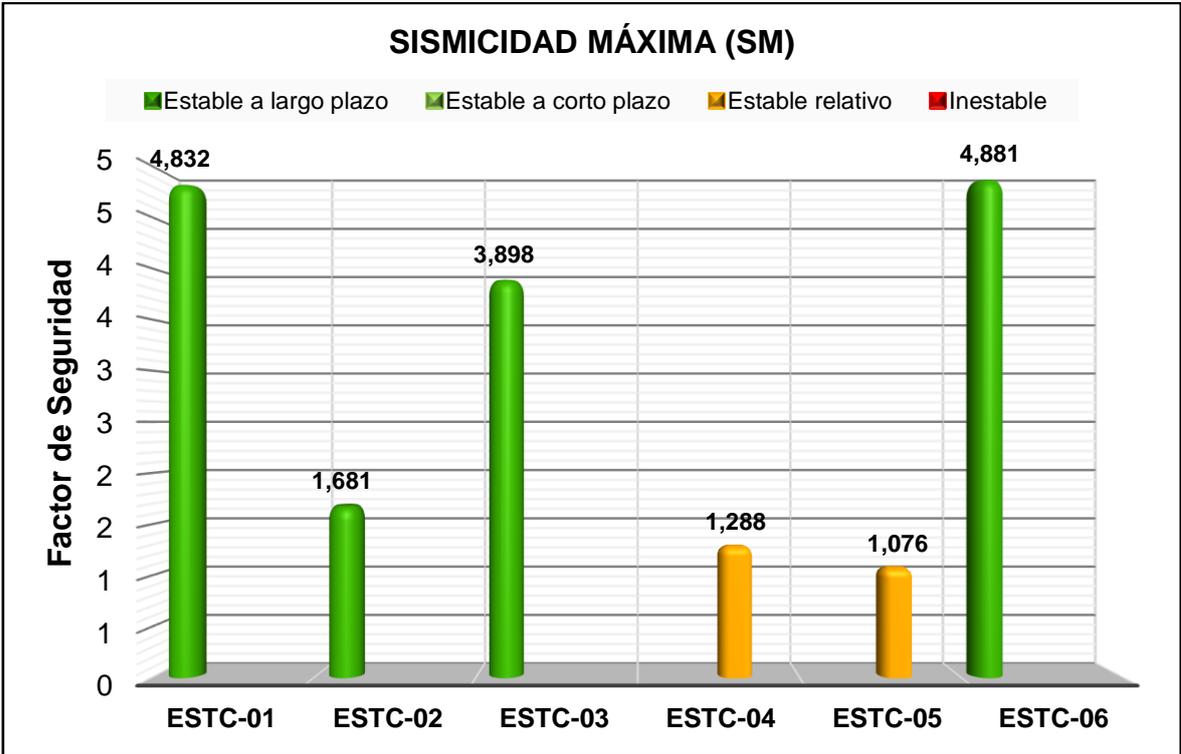


Figura 76. Gráfica estadística del Factor Seguridad en un escenario de sismicidad máxima.

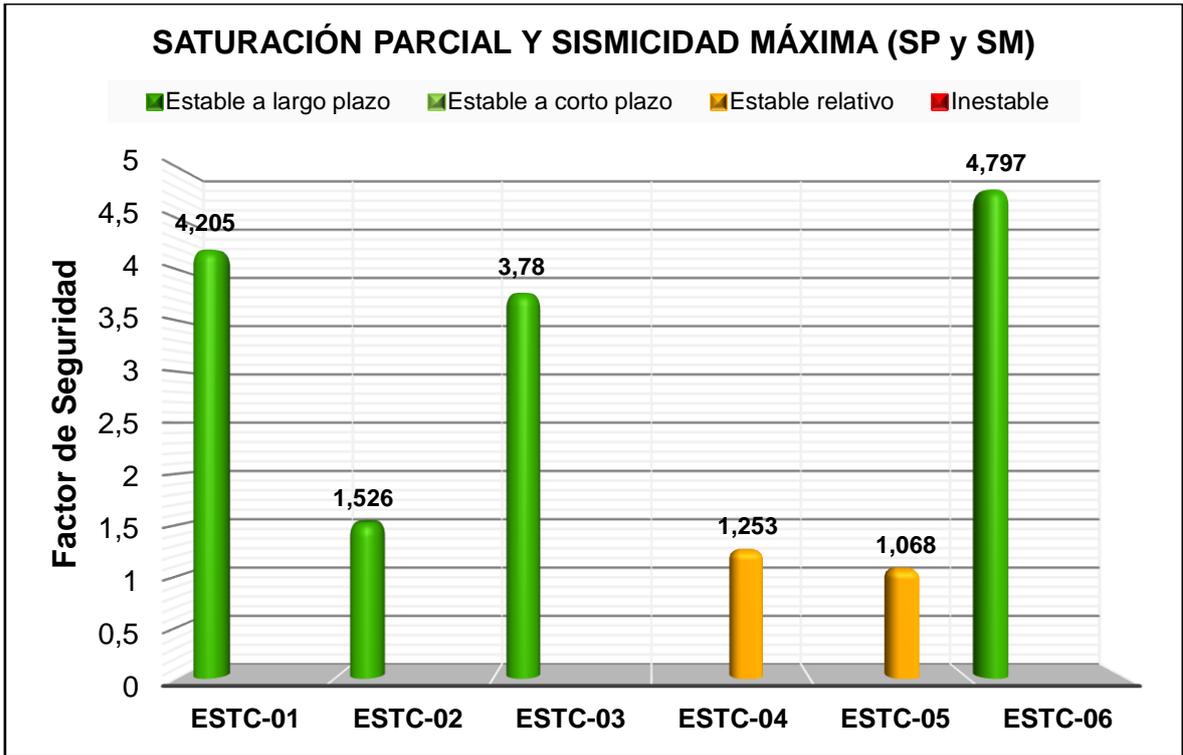


Figura 77. Gráfica estadística del Factor Seguridad en un escenario de saturación parcial y sismicidad máxima.

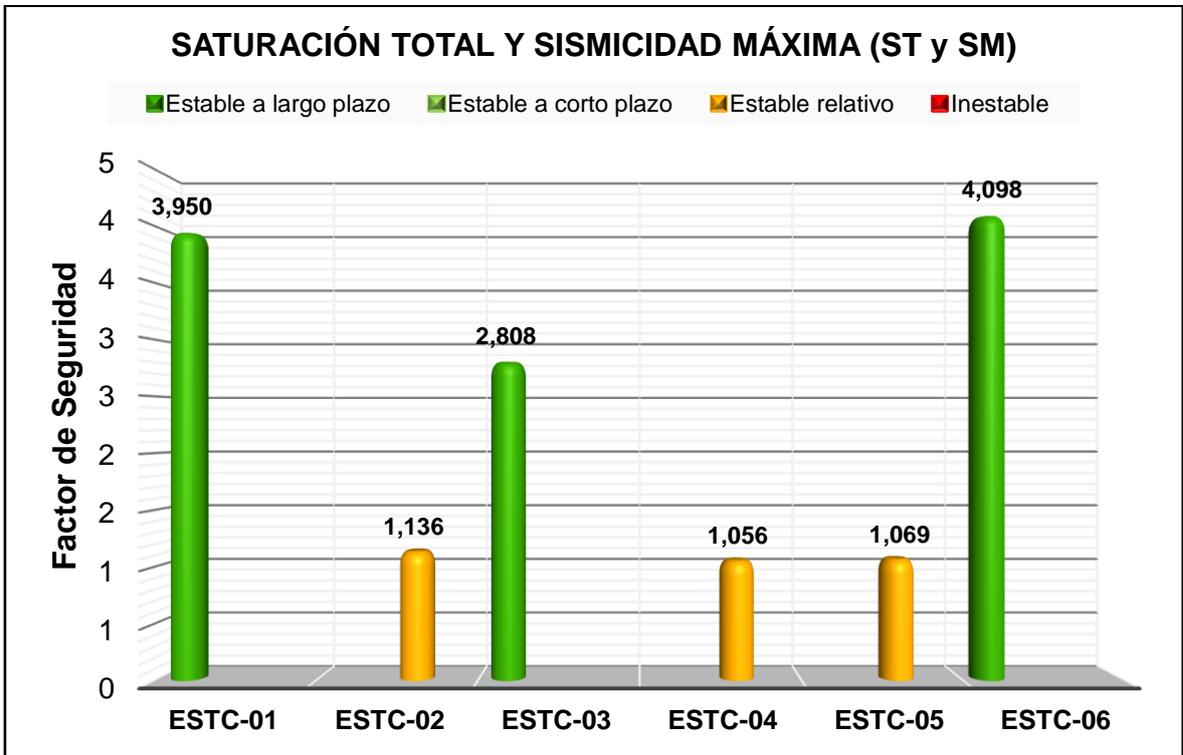


Figura 78. Gráfica estadística del Factor Seguridad en un escenario de saturación total y sismicidad máxima.

4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

A través de la investigación llevada a cabo en los taludes en el tramo km 104+192 – km 117+350 de la carretera Socorro – San Gil, se contrasta la hipótesis planteada inicialmente, donde se afirma que la inestabilidad geotécnica es originada por las condiciones litomorfoestructurales de las Formaciones Paja y Tablazo (calizas, areniscas calcáreas, lodolitas y margas, con grado de fracturamiento regular, moderado grado de meteorización y según RMR₈₉ de 38 – 73, siendo de calidad buena (clase II), regular (clase III) y calidad mala (clase IV), en conjunto con los agentes desencadenantes como la precipitación e infiltración (incrementa la saturación del agua, lo que hace que disminuya la resistencia al corte e incrementa la presión de los poros) y sismicidad de la zona (estos esfuerzos inducidos por la sismicidad generan una consecuencia directa en el fracturamiento del macizo rocoso).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La geología presente en las estaciones de talud crítico se encuentra en las Formaciones Paja y Tablazo. Se pudo identificar estructuras tales como un pliegue anticlinal cortado por una falla normal con poca extensión longitudinal, donde el eje de la estructura tiene una orientación NE-SO; además de una falla normal en calizas con una orientación de 123°N y un buzamiento de 74°. La geomorfología, presenta geoformas de origen estructural, de origen denudacional y de origen antropogénico.

La caracterización geomecánica presenta macizos rocosos con RQD de calidad pobre y buena en ESTC-01; pobre, regular y buena en ESTC-02 y ESTC-03; pobre en ESTC-04 y ESTC-05; y buena en ESTC-06. El RMR_{89} tiene una calidad mala y buena en ESTC-01; calidad mala, regular y buena en ESTC-02 y ESTC-03; calidad regular en ESTC-04 y ESTC-05; y calidad buena en ESTC-06. El GSI presenta valores con un rango desde 30 – 76.

El análisis estereográfico – cinemático realizado mediante el software Dips v.7, permite determinar la probabilidad de rotura tipo planar (valor máx.= 8,14% y valor mín.= 0%) y la probabilidad de rotura en cuña (valor máx.= 55,43% y valor mín.= 10,46%).

La ESTC-02 tiene estabilidad relativa en un escenario combinado de saturación total y sismicidad máxima; la ESTC-04 tiene estabilidad relativa en escenarios de sismicidad máxima, combinación de saturación parcial y sismicidad máxima, combinación de saturación total y sismicidad máxima; y la ESTC-05 tiene estabilidad relativa en escenarios de saturación total, sismicidad máxima, combinación de saturación parcial y sismicidad máxima, combinación de saturación total y sismicidad máxima.

5.2 RECOMENDACIONES

El municipio del Socorro debe realizar ensayos especiales como corte directo y triaxiales en las zonas críticas para lograr una mayor precisión en las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos y obtener un conjunto de datos más certeros y fiables, porque así se podrá realizar un mejor monitoreo de los taludes críticos.

El municipio del Socorro debe realizar un estudio hidrogeológico para así poder evaluar la disminución de la resistencia al corte provocado por los cambios en el contenido de agua en las rocas, puesto que existe unos meses de abundante precipitación.

El municipio del Socorro debe llevar a cabo un mantenimiento regular y adecuado de los taludes inestables, realizando sistemas de drenaje y vegetación controlada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Título A y Título H. Bogotá, Colombia. 19 ene.
- Braja M, Das. 2015. Fundamentos de ingeniería geotécnica (J. León, Trad.). (4ta ed.). Cengage Learning. (Obra original publicada en 2013)
- Deere, DU; Deere DW. 1989. Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years. 1 ed. Washington, DC, USA, U.S. Department of Commerce National Technical Information Service. 101 p. Contract Report GL-89-1. US Army Corps of Engineers.
- González de Vallejo, LI; Mercedes, F; Ortuño, L; Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. 1 ed. Madrid, España, Pearson Education. p. 117-262, 430-469.
- Goodman, R; Bray, J. 1976. Toppling of Rock Slopes. Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes. 2:201-234.
- Hoek, E et al. 2002. Hoek - Brown Failure Criterion - 2002 Edition. NARMS-TAC 2002: Mining and Tunnelling Innovation and Opportunity. 7-10 July 2002. 267273.
- Hoek, E. 1994. Strength of Rock and Rock Masses. ISRM News Journal 2(2):4-10.
- Hoek, E. 2007. Practical Rock Engineering. Rock mass properties. http://www.rocks-science.com/education/hoeks_corner
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. 2002. Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. Toronto, Canada.
- Hoek, E., Carter, T.G., & Diederichs, M.S. 2013. Quantification of the Geological Strength Index Chart. In Proceedings of the 47th US Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association. California, USA.

- Hoek, E; Bray, J. 1981. Rock Slope Engineering. 3 ed. Londres, Inglaterra, The Institution of Mining and Metallurgy. p. 22 - 45.
- Hoek, E; Brown, ET. 1980. Excavaciones Subterráneas en Roca. Dely, R (trad.). 1 ed. Londres, Inglaterra, McGraw-Hill Book. p. 21-35.
- Hoek, E; Brown, ET. 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. International Journal Rock Mechanics Mining Science 34(8):1165-1186.
- Martínez, J. 2018. 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. [Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana]. Repositorio Institucional UPB.
- Monte, I. 2020. Análisis de estabilidad de taludes de roca mediante el método de elementos finitos. [Tesis de pregrado, Universidad de Concepción]. Repositorio Bibliotecas UdeC.
- Ramírez, P. y Alejano, L. 2004. Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Red DESIR, Madrid.
- Rodríguez, R. 2016. Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos zona Ronquillo – Corisorgona Cajamarca – Perú. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis UNMSM.
- Suarez, J. 2009. Deslizamientos. Análisis Geotécnico (Vol. 1). Universidad Industrial de Santander. <https://www.geologiaviva.info/wp-content/uploads/2021/04/Deslizamientos-y-Analisis-Geotecnico.pdf>

ANEXOS

- **Carta de autorización de uso de datos**
- **Registro geológico – geotécnico de los puntos de control**
- **Planos**
 - Plano de ubicación
 - Plano satelital
 - Plano geomorfológico
 - Plano geológico
 - Plano geomecánico
 - Planos de zonificación geotécnica