

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



TESIS

**EVALUACIÓN DE LA INESTABILIDAD GEOTÉCNICA DE TALUDES ENTRE
LAS PROGRESIVAS Km 14+000 al Km 20+000 DE LA CARRETERA
SAN MARCOS- CAJABAMBA, PROVINCIA DE SAN MARCOS**

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

Autor:

Bach. SALAZAR BACILIO, VANESA MERCEDES

Asesor:

Dr. Ing. RODRÍGUEZ CRUZADO, SEGUNDO REINALDO

Cajamarca – Perú

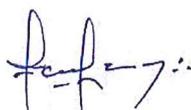
2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** Vanesa Mercedes Salazar Bacilio
DNI: 72768974
Escuela Profesional: Ingeniería Geológica
- Asesor:** Dr. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado
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:**
EVALUACIÓN DE LA INESTABILIDAD GEOTÉCNICA DE TALUDES ENTRE LAS PROGRESIVAS Km 14+000 al Km 20+000 DE LA CARRETERA SAN MARCOS- CAJABAMBA, PROVINCIA DE SAN MARCOS
- Fecha de evaluación:** 17 de Marzo de 2024
- Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 07
- Código Documento:** oid: 3117:340336312
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 18-03-2024



FIRMA DEL ASESOR

Nombres y Apellidos

Dr. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado

DNI: 26722961



Firmado digitalmente por:
FERNANDEZ LEON Yvonne
Katherine FAU 20148258801 soft
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 18/03/2024 10:38:10-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la vida, el trabajo y salud de todos los días.

A mi madre, Oscar, Warper, hermanos y personas importantes en mi vida, este logro es gracias a ellos.

A mi alma mater UNC. y Docentes de la EPIG. En especial a mi asesor, Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado, por sus conocimientos y disposición en asesorarme, para desarrollar la presente tesis profesional.

DEDICATORIA

A mi madre la persona más abnegada y amorosa, quien es, esa roca fuerte y pilar fundamental en mi vida; y a mis hermanos Maikol, Raúl y Merly, por ser mi impulso para salir adelante.

A mis amigos, con quienes formamos una linda amistad en las aulas de la universidad en especial a Pamela con quien sigue perdurando hasta ahora.

ÍNDICE GENERAL

ÍTEM	Pág.
AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
INDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	xx
LISTA DE ABREVIATURAS	xxiii
RESUMEN	xxiv
ABSTRACT	xxv
CAPÍTULO I.....	.....
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II.....	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	4
2.1.1 Antecedentes Regionales.....	4
2.1.2 Antecedente Local.....	5
2.2 BASES TEÓRICAS.....	5
2.2.1 Macizo Rocoso	5
2.2.2 Criterio de Resistencia de Hoek-Brown	6
2.2.3 Criterio de Mohr-Coulomb	10
2.2.4 Resistencia del Macizo Rocoso.....	13
2.2.5 Clasificaciones Geomecánicas.....	13
2.2.6 Inestabilidad de los Taludes en Roca	20
2.2.7 Análisis cinemático	22
2.2.8 Métodos de Estudios de Estabilidad de Taludes	25
2.2.9 Mecánica de los Análisis de Equilibrio Límite	27
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	31
CAPÍTULO III.....	33
MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	33

	Pág.
3.2	ACCESIBILIDAD 33
3.3	CLIMA 34
3.4	METODOLOGÍA 34
3.4.1	Tipo, nivel, diseño y método de la Investigación. 34
3.4.2	Población de Estudio..... 36
3.4.3	Muestra 36
3.4.4	Unidad de Análisis..... 36
3.5	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS..... 36
3.5.1	Técnicas..... 36
3.5.2	Instrumentos de recolección de data..... 37
3.5.3	Equipos 37
3.5.4	Softwares 38
3.6	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS..... 38
3.6.1	Etapa de gabinete I 38
3.6.2	Etapa de Campo 39
3.6.3	Etapa de Gabinete II 39
3.7	UNIDADES MORFOGENÉTICAS..... 39
3.7.1	Planicie .....40
3.7.2	Lomada.....41
3.7.3	Ladera .....41
3.7.4	Escarpes.....42
3.8	MARCO GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL LOCAL 43
3.8.2	Depósitos Cuaternarios .....47
3.8.3	Plegamientos .....48
3.8.4	Fallas .....49
3.9	GEOTECNIA 52
3.9.1	Estación geotécnica EG-SM-C 01 55

	Pág.
3.9.2 Estación geotécnica EG-SM-C 02.....	72
3.9.3 Estación geotécnica EG-SM-C 03.....	87
3.9.4 Estación geotécnica EG-SM-C 04.....	102
3.9.5 Estación geotécnica EG-SM-C 05.....	117
3.9.6 Estación geotécnica EG-SM-C 06.....	132
3.9.7 Estación geotécnica EG-SM-C 07.....	147
CAPÍTULO IV.....	162
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	162
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	162
4.1.1 Modelo Geológico	162
4.1.2 Modelo Geomecánico	163
4.1.3 Modelo Geotécnico y numérico.....	164
4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	169
CAPÍTULO V	170
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	170
5.1 CONCLUSIONES.....	170
5.2 RECOMENDACIONES	171
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	172
ANEXOS	174

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de la constante "mi" para la roca Intacta Por Grupo De Rocas.....	8
Tabla 2. Guías para Estimar el Factor de Perturbación D.....	9
Tabla 3. Escala de calidades de la roca en función al RQD.	14
Tabla 4. Parámetros de la Clasificación RMR.....	16
Tabla 5. Escala de calidades de la clasificación RMR89.	17
Tabla 6. Ecuaciones e incógnitas en el análisis de equilibrio límite de la estabilidad de taludes.....	29
Tabla 7. Características de los métodos para la estabilidad de taludes.....	30
Tabla 8. Coordenadas UTM - WGS-84 del tramo de investigación.....	33
Tabla 9. Ubicación Política.....	33
Tabla 10. Acceso al área de investigación.....	34
Tabla 11: Clasificación y descripción de los tipos de investigación.....	35
Tabla 12. Unidades Morfogénicas.....	40
Tabla 13. Tabla de precipitaciones mensuales – Años 2018-2022.....	53
Tabla 14. Cálculo de RQD en función de numero de discontinuidades (ND) y metros lineales (L).....	56
Tabla 15. Estimación del GSI en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI 1989).	57
Tabla 16. Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 01.....	59
Tabla 17. Valor de RMR ₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 01.	59
Tabla 18. Valor de RMR ₈₉ para Macizo.....	60
Tabla 19. Cálculo de RQD de la estación EG-SM-C 02 en función de numero de discontinuidades (ND) y metros lineales (L).....	72
Tabla 20. Estimación del GSI de la estación EG-SM-C 02 en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI 1989).....	73
Tabla 21. Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 02.	75
Tabla 22. Valor de RMR ₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 02.....	75
Tabla 23. Cálculo de RQD en función de numero de discontinuidades (ND) y metros lineales (L).....	87

	Pág.
Tabla 24.	Estimación del GSI en la estación EG-SM-C 03 en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI 1989).....88
Tabla 25.	Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 03. ....90
Tabla 26.	Valor de RMR ₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 03. ....90
Tabla 27.	Cálculo de RQD en la estación EG-SM-C 04 en función de numero .....102
Tabla 28.	Estimación del GSI de la estación EG-SM-C 04 en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI, 1989).....103
Tabla 29.	Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 04. ....105
Tabla 30.	Valor de RMR ₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 04. ....105
Tabla 31.	Cálculo de RQD en función de numero de discontinuidades (ND) y metros lineales (L), estación EG-SM-C 05. ....117
Tabla 32.	Estimación del GSI en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI, 1989). ....118
Tabla 33.	Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 05. ....120
Tabla 34.	Valor de RMR ₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 05. ....120
Tabla 35.	Cálculo de RQD en función de numero de discontinuidades (ND) y metros lineales (L), estación EG-SM-C 06. ....132
Tabla 36.	Estimación del GSI en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI, 1989). ....133
Tabla 37.	Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 06. ....135
Tabla 38.	Valor de RMR ₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 06. ....135
Tabla 39.	Cálculo de RQD en función de numero de discontinuidades (ND) y metros lineales (L), estación EG-SM-C 07. ....147
Tabla 40.	Estimación del GSI en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI 1989). ....148
Tabla 41.	Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 07. ....150
Tabla 42.	Valor de RMR ₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 07.....150
Tabla 43.	Clasificación geomecánica para cada talud analizado. ....163
Tabla 44.	Análisis Estereográfico – Cinemático de los Taludes Críticos.....165
Tabla 45.	Rangos de Factores de Seguridad recomendados por Hoek 2007. ....166

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. (a) Relaciones entre los esfuerzos principales mayores y menores para los criterios Hoek-Brown y Mohr-Coulomb equivalentes. Hoek (et al, 2002). (b) Envoltente no lineal de Mohr para el macizo rocoso fracturada definida por las ecuaciones 6 y 7; la línea de mejor ajuste muestra la cohesión y el ángulo de fricción para la altura del talud aplicable. Fuente: Wyllie y Mah, (2004).....	11
Figura 2. Relación para el cálculo de σ'_{3max} para los parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb y Hoek-Brown para taludes.	12
Figura 3. Índice de resistencia geológica (GSI) para macizos rocosos fracturadas.	18
Figura 4. Diagrama de flujo para la aplicación del criterio de Hoek-Brown y el Sistema GSI a un diseño de excavación de talud. Fuente: Wyllie y Mah, (2004).....	19
Figura 5. Principales tipos de rotura de bloques en taludes: (a) rotura planar; (b) rotura en cuña en dos discontinuidades que se cruzan; (c) rotura por desprendimiento en rocas fuertes; y (d) rotura circular en rellenos de roca, rocas muy débiles.	20
Figura 6. Identificación de rotura planar y cuñas en proyección estereográfica. (a) y (b) rotura en cuña, (c) rotura planar.....	21
Figura 7. Análisis cinemático de bloques de roca en talud: (a) familias de discontinuidades en talud; y (b) envolventes de luz en la proyección estereográfica de igual área.....	23
Figura 8. Análisis combinado de cinemática y estabilidad simple utilizando el concepto de cono de fricción: (a) cono de fricción en relación con el bloque en reposo en un plano inclinado (es decir, $\phi = \psi P$); y (b) proyección estereográfica del cono de fricción superpuesto a las envolventes de luz.	25
Figura 9. Etapas para realizar un estudio de estabilidad de taludes.	27

	Pág.
Figura 10. División de las masas potenciales de deslizamiento en dovelas, la superficie de deslizamiento es una idealización de la superficie de ruptura.....	28
Figura 11: Columna litoestratigráfica del área de investigación.	44
Figura 12. Zonas sísmicas del territorio peruano y vista de zona de investigación (Zona 3) con un factor de 0.35.	54
Figura 13. Cálculo de la aceleración sísmica horizontal ($K_h=0.175$) y vertical ($K_v=0.088$) con el Software LoadCap, según la Normativa O.P.C.M.3274.	55
Figura 14. GSI=43 de la estación EG-SM-C 01, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0.....	57
Figura 15. Análisis de la resistencia del macizo rocoso utilizando RocData y Graficas de esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (Izquierda) y esfuerzo normal – esfuerzo de Corte (derecha) de las areniscas de la Fm. Carhuaz para cálculo de cohesión y ángulo de fricción.	58
Figura 16. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 01, indicando una probabilidad de falla de 4.00 %.	61
Figura 17. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud en el talud de la estación EG-SM-C 01, indicando una probabilidad de falla de 5.39 %.	62
Figura 18. Estación EG-SM-C 01, dimensiones y propiedades del talud.	63
Figura 19. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.353) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	64
Figura 20. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.308) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	65

	Pág.
Figura 21. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.390) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.....	66
Figura 22. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.332) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Totales.	67
Figura 23. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.036) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	68
Figura 24. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (0.988) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	69
Figura 25. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.050) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	70
Figura 26. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.007) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	71
Figura 27. GSI=48 de la estación EG-SM-C 02, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0.....	73
Figura 28. Análisis de la resistencia de macizo rocoso utilizando RocData en la estación EG-SM-C 02; Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las areniscas de la Fm. Carhuaz para cálculo de cohesión, ángulo de fricción y parámetros de Hoek-Brown.....	74
Figura 29. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 02, indicando una probabilidad de falla de 4.55 %.	76

	Pág.
Figura 30. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 02, indicando una probabilidad de falla de 6.49 %.	77
Figura 31. Estación EG-SM-C 02, dimensiones y propiedades del del talud.	78
Figura 32. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.66) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	79
Figura 33. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.57; 2.86) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	80
Figura 34. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.90) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.	81
Figura 35. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.90) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Totales.	82
Figura 36. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.09) por Método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	83
Figura 37. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (1.96) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	84
Figura 38. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.21) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	85
Figura 39. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.03) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	86
Figura 40. GSI=48 de la estación EG-SM-C 03, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0.	88

Figura 41.	Análisis de la resistencia de macizo rocoso utilizando RocData en la estación EG-SM-C 03; Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las areniscas de la Fm. Carhuaz para cálculo de cohesión, ángulo de fricción y parámetros de Hoek-Brown.....	89
Figura 42.	Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 03, indicando una probabilidad de falla de 34.78 %.	91
Figura 43.	Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 03, indicando una probabilidad de falla de 52.79 %.	92
Figura 44.	Estación EG-SM-C 03, dimensiones y propiedades del del talud.	93
Figura 45.	Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (2.132) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	94
Figura 46.	Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (2.205) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	95
Figura 47.	Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (2.249) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.....	96
Figura 48.	Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (2.227) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Totales.	97
Figura 49.	Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (1.695) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	98
Figura 50.	Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (1.668) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	99

	Pág.
Figura 51. Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (2.008) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	100
Figura 52. Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (1.695) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	101
Figura 53. GSI=41 de la estación EG-SM-C 04, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0.....	103
Figura 54. Análisis de la resistencia de macizo rocoso de la estación EG-SM-C 04 utilizando RocData y Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las areniscas de la Fm. Carhuaz para cálculo de cohesión, ángulo de fricción y parámetros de Hoek-Brown.....	104
Figura 55. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 04, indicando una probabilidad de falla de 2.94 %.	106
Figura 56. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 04, indicando una probabilidad de falla de 6.07 %.	107
Figura 57. Estación EG-SM-C 04, dimensiones y propiedades del del talud.	108
Figura 58. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (2.442) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	109
Figura 59. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (2.391) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	110
Figura 60. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (2.507) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.....	111

	Pág.
Figura 61. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (2.552; 2790) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Totales.....	112
Figura 62. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (1.792) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	113
Figura 63. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (1.693) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	114
Figura 64. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (5.6) pie de talud por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.....	115
Figura 65. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (1.806) pie de talud por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	116
Figura 66. GSI=43 de la estación EG-SM-C 05, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0.....	118
Figura 67. Análisis de la resistencia de macizo rocoso de la estación EG-SM-C 05 utilizando RocData y Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las areniscas de la Fm. Carhuaz para cálculo de cohesión y ángulo de fricción.	119
Figura 68. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 05, indicando una probabilidad de falla de 3.13 %.	121
Figura 69. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 05, indicando una probabilidad de falla de 4.66 %.	122

	Pág.
Figura 70. Estación EG-SM-C 05, dimensiones y propiedades del del talud.	123
Figura 71. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (3.168) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	124
Figura 72. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (3.147) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	125
Figura 73. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (3.078) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.	126
Figura 74. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (3.250) por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.	127
Figura 75. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (1.913) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	128
Figura 76. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (1.839) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	129
Figura 77. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (1.892) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	130
Figura 78. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (1.874) por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	131
Figura 79. GSI=46 de la estación EG-SM-C 06, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0.	133
Figura 80. Análisis de la resistencia de macizo rocoso utilizando RocData y Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Santa para cálculo de cohesión y ángulo de fricción.	134

Figura 81.	Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 06, indicando una probabilidad de falla de 3.85 %.	.....136
Figura 82.	Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 06, indicando una probabilidad de falla de 6.27 %.	.....137
Figura 83.	Estación EG-SM-C 06, dimensiones y propiedades del del talud.	.....138
Figura 84.	Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.510) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	....139
Figura 85.	Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.450) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	....140
Figura 86.	Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (3.304) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.	.....141
Figura 87.	Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.558) por Método de GLE-Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.	.....142
Figura 88.	Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (1.967) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.	.....143
Figura 89.	Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.018) por Método de Jambu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más sismicidad.	.....144
Figura 90.	Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.112) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más sismicidad.	.....145
Figura 91.	Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.129) por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más sismicidad.	.....146

Figura 92.	GSI=36 de la estación EG-SM-C 07, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular-mala). Fuente: RocData 4.0.....	148
Figura 93.	Análisis de la resistencia de macizo rocoso utilizando RocData y Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Santa para cálculo de cohesión y ángulo de fricción.	149
Figura 94.	Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 07, indicando una probabilidad de falla de 33.33 %. ...	151
Figura 95.	Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 07, indicando una probabilidad de falla de 56.41%.	152
Figura 96.	Estación EG-SM-C 07, dimensiones y propiedades del talud.	153
Figura 97.	Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.250) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	154
Figura 98.	Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.140) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.	155
Figura 99.	Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.355) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.....	156
Figura 100.	Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.360; 1.175) por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.	157
Figura 101.	Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.090) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones efectivas más Sismicidad.	158
Figura 102.	Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (0.973) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones efectivas más Sismicidad.	159

	Pág.
Figura 103. Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.040) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones efectivas más Sismicidad.....	160
Figura 104. Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.035) por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones efectivas más Sismicidad.....	161

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

		Pág.
Fotografía 1.	Planicie con pendiente aproximada de 4-6°, ubicada en la margen derecha del Río Crisnejas. Coordenadas: E: 817390, N: 9178393, Cota: 2100 m.s.n.m.	40
Fotografía 2.	Lomada con pendiente aproximada de 15°, ubicada al margen izquierdo del trayecto Eduardo Villanueva- Ichocán. Coordenadas: E: 817863, N: 9178977, Cota: 2521 m.s.n.m.....	41
Fotografía 3.	Laderas con pendiente aproximada de 30° a 50°, ubicada en los Km 16 +000 – 18+500 en la Formación Chimú y la Formación Santa además de aluviales. Coordenadas: E: 817904, N: 9178866, Cota: 2507 m.s.n.m.	42
Fotografía 4.	Escarpes con pendiente aproximada de 60° a 80°, ubicada al Oeste(W) del tramo de la investigación, coordenadas: E: 817864, N: 9178978, Cota: 2529 m.s.n.m.	43
Fotografía 5.	Areniscas cuarzosas intercalada con arcillolitas y niveles de carbón de la Formación Chimú Km 18+ 900.....	45
Fotografía 6.	Arcillolitas gris negruzcas intercalada con arcillolitas calcáreas y calizas margosas de la Formación Santa Km 17+ 570.	46
Fotografía 7.	Areniscas intercaladas con arcillolitas de la Formación Carhuaz (Ki-ca) en las coordenadas E: 817969, N: 9179126, Cota: 2533 m.s.n.m.....	47
Fotografía 8.	Depósitos cuaternarios en las coordenadas E: 817944, N: 9179042, Cota: 2519 m.s.n.m; A: Se observa Depósito Fluvio-Aluvial y Coluvio-Aluvial de matriz soportada.	47
Fotografía 9.	Depósitos cuaternarios en las coordenadas E: 818050, N: 9178564 Cota: 2462 m.s.n.m.....	48
Fotografía 10.	Pliegue volcado en la Formación Santa Km 18+ 200. vista de los flancos derecho e izquierdo conjuntamente con su plano axial.....	49
Fotografía 11.	Fallas normales en la Formación Carhuaz DIP DIRECTION ₁ : 275° DIP ₁ : 20°, DIP DIRECTION ₂ : 295° DIP ₂ : 32°, Coordenadas: E 817948, N 9178850; Cota: 2509 m.s.n.m.	50

Pág.

Fotografía 12.	Conjunto de fallas normales en la Formación Carhuaz DIP DIRECTION ₁ : 190° DIP ₁ : 41°, DIP DIRECTION ₂ :195° DIP ₂ : 48°, DIP DIRECTION ₃ : 194° DIP ₃ : 52° Coordenadas: E:818053, N: 9178707; Cota: 2488 m.s.n.m.	50
Fotografía 13.	Falla normal en la Formación Santa DIP DIRECTION: 193° DIP: 44° Coordenadas: E: 818119, N:9178293; Cota: 2443 m.s.n.m.	51
Fotografía 14.	Falla normal en la Formación Carhuaz DIP DIRECTION: 195° DIP: 58°Coordenadas: E: 817865, N:9178966; Cota: 2443 m.s.n.m.	51
Fotografía 15.	Falla normal en la Formación Carhuaz DIP DIRECTION: 225° DIP: 62° Coordenadas: E: 817969, N: 9179130; Cota: 2533 m.s.n.m.	52
Fotografía 16.	Estación EG-SM-C 01 areniscas rojizas intercaladas con arcillolitas grises de la Formación Carhuaz (Ki- Ca), en la progresiva 14 + 860 Km de la carretera San Marcos-Cajabamba.....	56
Fotografía 17	Estación EG-SM-C 02 areniscas rojizas intercaladas con arcillolitas grises de la Formación Carhuaz (Ki- Ca), en la progresiva 15 + 260 Km de la carretera San Marcos-Cajabamba.....	72
Fotografía 18.	Estación EG-SM-C 03 areniscas rojizas intercaladas con arcillolitas grises de la Formación Carhuaz (Ki- Ca), presenta fallas normales, se encuentra en la progresiva 15 + 610 Km de la carretera San Marcos- Cajabamba.	87
Fotografía 19.	Estación EG-SM-C 04 areniscas rojizas intercaladas con lutitas grises de la Formación Carhuaz (Ki- Ca).....	102
Fotografía 20.	Estación EG-SM-C 05 areniscas blancas y arcillolitas grises de la Formación Carhuaz (Ki-Ca) en la parte superior y areniscas calcáreas intercaladas con lutitas grises de la Formación Santa (Ki-sa), en la progresiva 17 + 310 Km de la carretera San Marcos- Cajabamba.	117

Pág.

Fotografía 21. Estación EG-SM-C 06 calizas margosas intercaladas con arcillolitas grises de la Formación Santa (Ki-sa), en la progresiva 17 + 690 Km de la carretera San Marcos-Cajabamba.....	132
Fotografía 22. Estación EG-SM-C 07 calizas arenosas intercaladas con arcillolitas negras de la Formación Santa (Ki-sa), en la progresiva 17 + 800 Km de la carretera San Marcos-Cajabamba.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS

EG-SM-C	: Estación Geomecánica San Marcos-Cajabamba.
Fm.	: Formación.
FS	: Factor de Seguridad.
GSI	: Geological Strength Index (Índice de Resistencia Geológica).
INGEMMET	: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
MDE	: Modelo Digital de Elevaciones.
ND	: Número de Discontinuidades.
Prob.	: Probabilidad.
RMR89	: Rock Mass Rating 1989 (Valoración del Macizo Rocosos 1989).
RQD	: Rock Quality Designation (Índice de Calidad de la Roca).
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
UTM	: Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator.
WGS 84	: World Geographic System 1984 (Sistema Geodésico Mundial 1984).
Máx.	: Máxima.
TT	: Tensiones Totales.
TE	: Tensiones Efectivas.
S	: Sismicidad.
DIP	: Buzamiento.
DD	: Dirección del Buzamiento.
E	: Esfuerzo

RESUMEN

La investigación evaluó la inestabilidad geotécnica de taludes entre las progresivas km 14+000 al km 20+000 de la carretera San Marcos- Cajabamba, provincia de San Marcos; encontrándose en las Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz, del Cretácico inferior; y depósitos cuaternarios tipo coluvio-aluvial, aluvial y fluvial. Los taludes están en macizos rocosos fracturados y meteorizados, los cuales presentan inestabilidad geotécnica debido a factores como la precipitación, infiltración y sismicidad, provocando deslizamientos de rocas. El objetivo de la investigación y evaluar la inestabilidad geotécnica de taludes de los macizos rocosos. Se consideraron siete estaciones geomecánicas como puntos de control, utilizándose las clasificaciones geomecánicas Índice de Calidad de la Roca (RQD), Índice de Resistencia Geológica (GSI) y la Valoración del Macizo Rcoso (RMR89). La información de los modelos geológicos, geomecánicos fue procesada en el Software Dips para el análisis estereográfico y cinemático de cada talud, concluyéndose que existe deslizamientos tipo cuña con probabilidad máx.=56% y deslizamiento planar con probabilidad máx.=35%. Además, usando los parámetros geomecánicos del Software RocData junto con el nivel freático y sismicidad se determinó en el Software Slide taludes con $FS < 1.0$ considerados inestables, tales casos, se presentan en condiciones y sismicidad, el talud de EG-SM-C 07 se muestran inestable; EG-SM-C 01 muestra condición estable relativo; los otros taludes se muestran estables a largo plazo a excepción de EG-SM-C 03 que se considera inestable por la alta probabilidad de falla en cuña(53%) que no fue tomada en cuenta por el software Slide en el cálculo de su factor de seguridad.

Palabras clave: Talud, clasificaciones geomecánicas, inestabilidad geotécnica, deslizamiento, factor de seguridad.

ABSTRACT

The investigation evaluated the geotechnical instability of slopes between the progressive km 14+000 to km 20+000 of the San Marcos-Cajabamba highway, province of San Marcos; found in the Chimú, Santa, Carhuaz Formations, from the lower Cretaceous; and quaternary colluvio-alluvial, alluvial and fluvial type deposits. The slopes are in fractured and weathered rock masses, which present geotechnical instability due to factors such as precipitation, infiltration and seismicity, causing rock slides. The objective of the research is to evaluate the geotechnical instability of rock mass slopes. Seven geomechanical stations were considered as control points, using the geomechanical classifications Rock Quality Index (RQD), Geological Resistance Index (GSI) and Rock Mass Assessment (RMR89). The information from the geological and geomechanical models was processed in the Dips Software for the stereographic and kinematic analysis of each slope, concluding that there are wedge-type landslides with max. probability = 56% and planar landslides with max. probability = 35%. In addition, using the geomechanical parameters of the RocData Software together with the water table and seismicity, slopes with $FS < 1.0$ considered unstable were determined in the Slide Software. Such cases are presented in conditions and seismicity, the slope of EG-SM-C 07 is show unstable; EG-SM-C 01 shows relative stable condition; The other slopes appear stable in the long term except for EG-SM-C 03, which is considered unstable due to the high probability of wedge failure (53%) that was not taken into account by the Slide software in the calculation of its factor. of security.

Keywords: Slope, geomechanical classifications, geotechnical instability, landslide, safety factor.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En proyectos de infraestructura vial, durante la construcción y mantenimiento de carreteras, la inestabilidad de taludes es fundamental, el cuál puede ser un problema principal relacionado con la seguridad y la economía. Para ello, se realizar un estudio local de los componentes litomorfoestructurales involucrados en el problema, para luego, ser analizados mediante modelos de cálculo numérico (equilibrio límite), análisis estereográficos y cinemáticos; definiendo las zonas de deslizamientos tanto en suelo como en roca.

El área de investigación se localiza entre las progresivas Km. 14+000 y Km 20+000, de la provincia de San Marcos; donde los taludes, evidencian problemas de inestabilidad geotécnica. Las rocas han sido afectadas por el tectonismo regional, mostrándose muy fracturadas, y en conjunto son afectados por procesos de erosión y meteorización; dando lugar a problemas de inestabilidad geotécnica de los macizos rocosos. Las rocas fracturadas y los depósitos cuaternarios se saturan por la infiltración ocurridas en las temporadas de lluvias produciendo disminución de la resistencia en las discontinuidades; y la probabilidad de eventos sísmicos, aumenta las condiciones de incremento de deformaciones, que en conjunto producen presencia de cuñas y deslizamientos planares en rocas.

De esta forma, se plantea: ¿Existe inestabilidad geotécnica de los taludes ubicados en las progresivas Km 14+000 al Km 20+000 de la carretera San Marcos-Cajabamba, debido a la infiltración-saturación por las precipitaciones en épocas de lluvia y la probabilidad de actividad sísmica en las litomorfoestructuras constituidas por rocas de las Formaciones Chimú, Santa y Carhuaz?; así mismo, el desarrollo y éxito de la investigación gira en entorno a comprobar una hipótesis, estructurada de la siguiente manera: La inestabilidad geotécnica de los taludes en los macizos rocosos y depósitos coluvio-aluviales entre las progresivas Km 14+000 al Km 20+000 de la carretera San Marcos- Cajabamba evidencian zonas críticas con

deslizamientos, debido a las características litomorfoestructurales y la acción de las variables detonantes de infiltración y sismicidad.

Los deslizamientos en los macizos rocosos que encontramos en los taludes entre Km 14+000 al Km 20+000 del área de investigación, representan un peligro constante en esta vía de alta transitabilidad. Por tal razón, se realizará una evaluación geotécnica para analizar, correlacionar y explicar las variables litológicas, morfológicas y estructurales, para determinar la inestabilidad geotécnica de los taludes, en el tramo de las progresivas en mención, y así definir las zonas críticas y generar soluciones geotécnicas para evitar accidentes en la infraestructura económica y personales. Así mismo, la información que se desarrollará en la presente investigación servirá de fuente para futuros estudios, el cual constituirá información importante en la toma de decisiones de las autoridades competentes para mejorar la transitabilidad y conservar la infraestructura vial, evitando impactos negativos en la zona de investigación y además tendrá impacto positivo en los sectores de transporte, comercio y transitabilidad. Asimismo, cabe indicar que, la elaboración del presente trabajo de investigación, existió cierta limitación, como la falta de financiamiento para realizar ensayos de compresión triaxial.

La presente investigación tiene como objetivo general evaluar la inestabilidad geotécnica de taludes de los macizos rocosos, entre Km 14+000 al Km 20+000, de la carretera San Marcos – Cajabamba; además se tienen por objetivos específicos: realizar el cartografiado geológico de las litomorfoestructuras; determinar las propiedades físicas y geomecánicas de los macizos rocosos en los puntos control geotécnico; determinar las zonas críticas del área de estudio, mediante el cálculo del factor de seguridad.

La investigación se organizó en cinco capítulos donde se incluyen sus respectivos ítems, tal como figura en el índice de contenido. En el capítulo I, se describe el planteamiento y formulación del problema, justificación, delimitación, limitaciones, objetivos e hipótesis de la investigación. El capítulo II, contiene el marco teórico de esta investigación; bases teóricas de autores ligados al tema con sus respectivos libros u obras; definición de términos básicos, estableciendo una relación con cada

una de ellas, sirviendo de base y sostenimiento de dicha investigación. El capítulo III, está constituido por la descripción de materiales y métodos que se utilizó en esta investigación: ubicación geográfica, accesibilidad, metodología, técnicas e instrumentos de recolección de datos y la descripción del procedimiento y procesamiento de la información; finalizando con el contexto geológico, conteniendo la estratigrafía, geología estructural, unidades morfogénicas y geotecnia, con sus respectivos puntos de control en taludes. En el capítulo IV, se presenta el análisis y discusión de resultados, donde se hizo el análisis de la información y presentación de resultados obtenidos y, por último, contiene la contrastación de la hipótesis, determinando así la veracidad de las misma. El capítulo V, muestra las conclusiones y las recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 Antecedentes Regionales

ROJAS (2018), en su tesis de Ingeniero Geólogo: “Comportamiento geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas – El Tayal, Provincia de Chota”, determinó el comportamiento geotécnico de los taludes en rocas de las Formaciones Carhuaz, Inca, Chúlec, Pariatambo, Grupo Pulluicana, Grupo Quilquiñan y Cajamarca, mediante clasificaciones geomecánicas, RMR_{89} , GSI, RQD además hizo un análisis cinemático, utilizando el método de equilibrio límite mediante Software Dips v.6. Concluye que las discontinuidades críticas y el ángulo de fricción, determinan mayor probabilidad de rotura en cuña y menor probabilidad de rotura planar.

VALDERA (2019), realizó la tesis de Ingeniero: “Evaluación geomecánica - geotécnica de la carretera el Tayal – Santa Isolina Bajo, Provincia de Chota”. Donde determinó el comportamiento geomecánico – geotécnico de los taludes en rocas del Grupo Crisnejas y Grupo Pulluicana. Concluyendo que la caracterización geomecánica definió que los macizos rocosos presentan la calidad regular respecto al RQD, macizo rocoso tipo III respecto al RMR, y de acuerdo al GSI presenta condiciones superficiales ligeramente rugosas y moderadamente meteorizadas; y que el comportamiento geotécnico de los taludes críticos están influenciados por factores geomecánicos, factores geométricos (altura, pendiente y dirección del talud), factores litomorfoestructurales y variables desencadenantes constituidas por la filtración de agua y la sismicidad.

CÁCERES (2019), realizó la tesis de Ingeniero: “Evaluación geotécnica en inestabilidad de taludes en zonas críticas en la carretera Kuntur Wasi en el tramo Km 45+000 – Km 52+000”. Determinó zonas críticas en el volcánico San Pablo y

depósitos coluvio–aluviales. Concluyendo que los 6 tramos se comportan como zonas inestables, siendo los factores de seguridad $FS = 0.7$ para el tramo 01, $FS = 0.675$ tramo 02, $FS = 0.459$ tramo 03, $FS = 0.464$ tramo 04, $FS = 0.782$ tramo 05, $FS = 0.636$ tramo 06; sectorizando a los tramos 03 y 04 como zonas de alta peligrosidad; los tramos 02 y 06 zona de media peligrosidad y los tramos 01 y 05 zona de baja peligrosidad.

2.1.2 Antecedente Local.

HOB CONSULTORES S.A., (2012) realizó el Estudio Definitivo para el Mejoramiento de la Carretera San Marcos- Cajabamba- Sausacocha, tramo San Marcos – Cajabamba; donde presentan la evaluación geológico-geotécnico considerando las características litomorfoestructurales de los taludes; así como un inventario y evaluación de áreas críticas en los sectores afectados por los procesos de Geodinámica Externa.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Macizo Rocoso

El macizo rocoso es un material compuesto por roca intacta y discontinuidades, tales como diaclasas, discontinuidades paralelas a la estratificación, fallas, pliegues y otros planos de debilidad que forman una estructura más o menos compleja. Los macizos rocosos son discontinuos y a menudo tienen propiedades heterogéneas y anisotrópicas (Wittke, 2014).

Hudson y Harrison (2000), define que la roca intacta es aquella que no tiene discontinuidades y forman parte del macizo rocoso. La influencia de los factores geológicos de los macizos rocosos se analiza en cinco temas principales, discontinuidades y estructura de la roca, esfuerzos de roca preexistente in situ, presión de poro y flujo de agua, influenciados por la variable tiempo. En la mecánica de rocas debemos considerar como variables el material y las fuerzas que se aplican, las influencias del tiempo y el flujo en condiciones de macizos porosos. En estas condiciones, el tiempo geológico alteró la roca y las fuerzas aplicadas, por

tanto, el ingeniero debe ser consciente que estos macizos han sido afectados significativamente por los procesos geológicos.

2.2.2 Criterio de Resistencia de Hoek-Brown

Hoek et al. (2002) Este criterio se realizó a partir de las investigaciones de roturas frágiles de rocas intactas de Hoek y del comportamiento de macizos rocosos de Brown. Manifiestan que el criterio de rotura parte de las propiedades de la roca intacta y luego introdujeron factores para reducir estas propiedades en función de las características de las discontinuidades en un macizo rocoso.

Los autores vincularon el criterio empírico con las observaciones geológicas mediante los esquemas de clasificación de macizos rocosos disponibles y para ello eligieron el Rock Mass Rating (RMR) propuesto por Bieniawski en el año 1989 (Wyllie y Mah 2004).

Teniendo en cuenta la amplia gama de problemas prácticos a los que se aplicaba el criterio de Hoek y Brown (2002). Se realizó cambios en las ecuaciones, se reconoció que la calificación del macizo rocoso de Bieniawski ya no era adecuada como vehículo para relacionar el criterio de fallamiento con las observaciones geológicas en el campo, especialmente para masas rocosas muy débiles, la cual dio lugar a la introducción del Índice de Resistencia Geológica (GSI) propuesto por (Hoek y Brown en el 2019).

➤ **Criterio de Resistencia Generalizado de Hoek-Brown**

El criterio de resistencia generalizado de Hoek-Brown se expresa en términos de los esfuerzos principales mayores y menores y se modifica a partir de la ecuación inicial:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \text{ -----(1)}$$

La cual se actualiza a la siguiente ecuación:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \text{ -----(2)}$$

Donde m_b es un valor reducido de la constante de material m_i para la roca intacta y viene dado por:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \text{-----}(3)$$

La Tabla 1 da los valores de m_i para una amplia variedad de tipos de roca, y “s” y “a” son constantes para el macizo rocoso dadas por:

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \text{-----}(4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \text{-----}(5)$$

D es el factor que depende del grado de perturbación al que ha sido sometido el macizo rocoso por los daños causados por la explosión y la relajación de esfuerzos. Varía de cero “0” para macizos rocosos in situ no perturbado a uno “1” para macizos rocosos muy perturbados. Hoek et al. (2002) indica que el factor D se define según la Tabla 2.

Tabla 1. Valores de la constante "mi" para la roca Intacta Por Grupo De Rocas.

Tipo de roca	Clase	Grupo	Textura			
			Grueso	Medio	Fino	Muy fino
SEDIMENTARIA	Clástica	Conglomerados	21±3	Areniscas	Limolita	Lutita
			17±4	7±2	4±2	
		Brechas	19±5		Grauvaca	Pizarra arcillosa
				18±3	6±2	
					Marga	7±2
	Carbonatos	Calizas cristalinas	12±3	Calizas esparíticas	Calizas Micríticas	Dolomitas
				10±2	9±2	9±3
		Evaporitas		Yeso	Anhidrita	Creta
		Orgánica		8±2	12±2	7±2
	METAMÓRFICA	No foliada	Mármol	9±3	Hornfels	Cuarcitas
				19±4	20±3	
				Metaarenisca	19±3	
Ligeramente foliada		Migmatita	29±3	Anfibolitas	Gneis	
				26±6	28±5	
Foliada			Esquisto	Filita	Pizarra	
			12±3	7±3	7±4	
ÍGNEO	Plutónico	Claro	Granito	Diorita		
			32±3	25±5		
			Granodiorita			
			29±3			
	Oscuro	Gabro	27±3	Dolerita		
				16±5		
		Norita	20±5			
	Hipabisal	Pórfidos	20±5		Diabasa	Peridotita
				15±5	25±5	
Volcánica	Lava			Riolita	Dacita	Obsidiana
				25±5	25±3	19±3
				Andesita	Basalto	
		25±5	25±5			
Piroclástica	Aglomerado	19±3	Brecha	Toba		
			19±5	13±5		

Fuente: Wyllie y Mah, (2004).

Tabla 2. Guías para Estimar el Factor de Perturbación D.

Aspecto del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor sugerido de D
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.	D = 0
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladura) con alteración mínima en el macizo rocoso circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.	D = 0 D = 0.5 (no invertir)
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3m en el macizo rocoso circundante.	D = 0.8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo, la liberación de esfuerzos resulta en alguna alteración.	D = 0.5 (Buena voladura) D = 1.0 (Mala voladura)
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de esfuerzos al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.	D = 1.0 (Producción voladura) D = 0.7 (Mecánica excavación)

Fuente: Hoek et al, (2002).

2.2.3 Criterio de Mohr-Coulomb

Según Hoek et al. (2002), el análisis de la estabilidad de los taludes implica el estudio de la resistencia al cizallamiento o corte del macizo rocoso en la superficie de deslizamiento expresada por el criterio de fallamiento. Por lo tanto, es necesario determinar los ángulos de fricción y las resistencias cohesivas para cada macizo rocoso e intervalos de esfuerzos. Estas deben tener el criterio de parámetros equivalentes entre los criterios de Hoek-Brown y Mohr-Coulomb. Además indica que esto se realiza ajustando una relación lineal media a la curva generada a partir de la envolvente de Hoek-Brown para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$, como se ilustra en la Figura 1a. El ajuste supone equilibrar las áreas por encima y por debajo de la curva de Mohr-Coulomb. Estas resistencias son necesarias para cada macizo rocoso y rango de esfuerzos a lo largo de la superficie de deslizamiento.

Se tiene como resultado las siguientes ecuaciones para el ángulo de fricción equivalente ϕ' y la resistencia cohesiva equivalente c' (Figura 01b):

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

$$c' = \frac{(\sigma_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}])(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \text{-----}(7)$$

Donde $\sigma_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_{ci}$

Obsérvese que el valor de σ'_{3max} es el límite superior de la tensión de confinamiento sobre el que se considera la relación entre los criterios Hoek-Brown y Mohr-Coulomb, debe determinarse para cada caso individual.

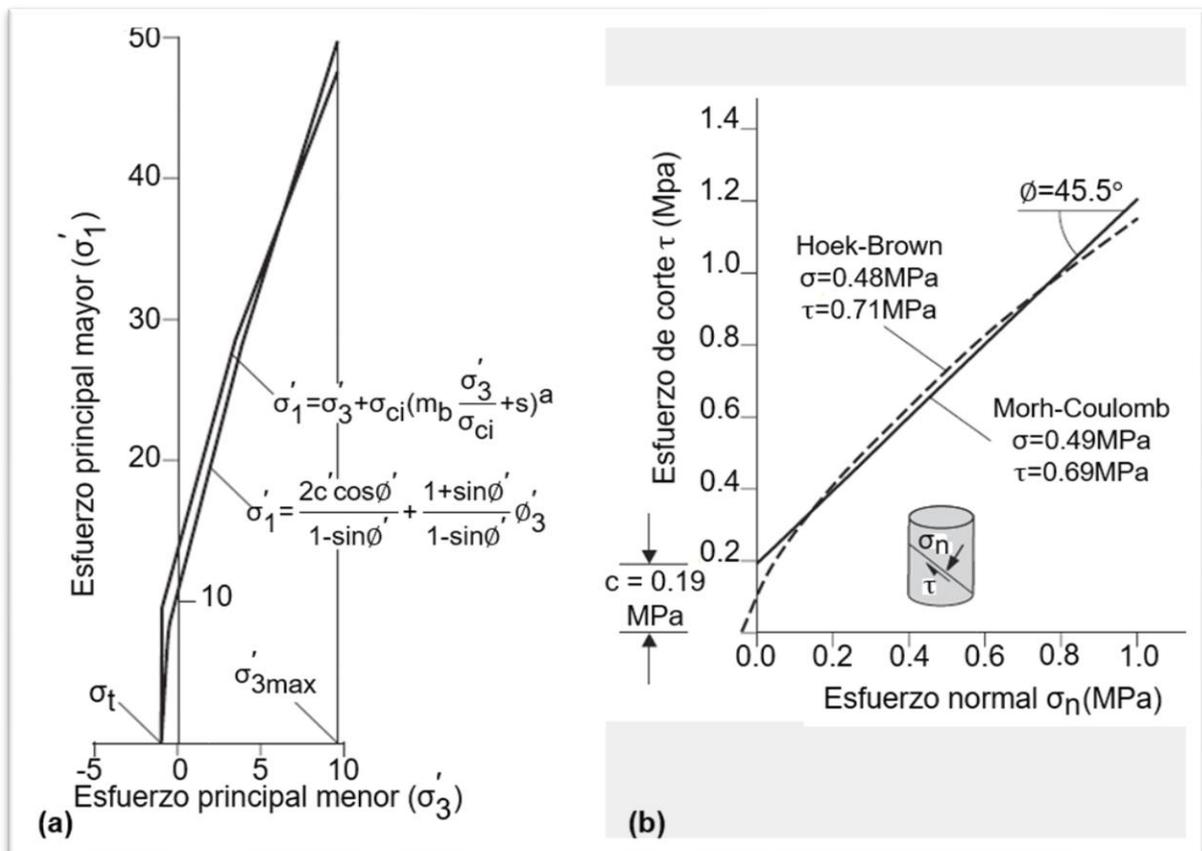


Figura 1. (a) Relaciones entre los esfuerzos principales mayores y menores para los criterios Hoek-Brown y Mohr-Coulomb equivalentes. Hoek (et al, 2002). (b) Envolvente no lineal de Mohr para el macizo rocoso fracturada definida por las ecuaciones 6 y 7; la línea de mejor ajuste muestra la cohesión y el ángulo de fricción para la altura del talud aplicable. Fuente: Wyllie y Mah, (2004).

La cuestión de determinar el valor adecuado de σ'_{3max} para utilizarlo en las ecuaciones (6) y (7) depende de la aplicación específica. Para el caso de los taludes, es necesario que el factor de seguridad calculado y la forma y localización de la superficie de fallamiento sean equivalentes. Se han llevado a cabo estudios de estabilidad de taludes de roca utilizando el análisis de fallamiento circular de Bishop para una amplia gama de geometrías de taludes y propiedades del macizo rocoso, tanto para el criterio generalizado de Hoek-Brown como para el de Mohr-Coulomb, con el fin de encontrar el valor de σ'_{3max} que da curvas características equivalentes.

Estos análisis dieron la siguiente relación entre σ'_{3max} la resistencia del macizo rocoso σ'_{cm} y el nivel de esfuerzo en la superficie de deslizamiento, σ_0 (Figura 02):

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\sigma_0} \right)^{-0.91} \quad \text{-----(8)}$$

El nivel de esfuerzo en la superficie de deslizamiento está relacionado con la altura del talud H y el peso unitario de la roca γ_r viene dado por:

$$\sigma_0 = H\gamma_r \text{-----(9)}$$

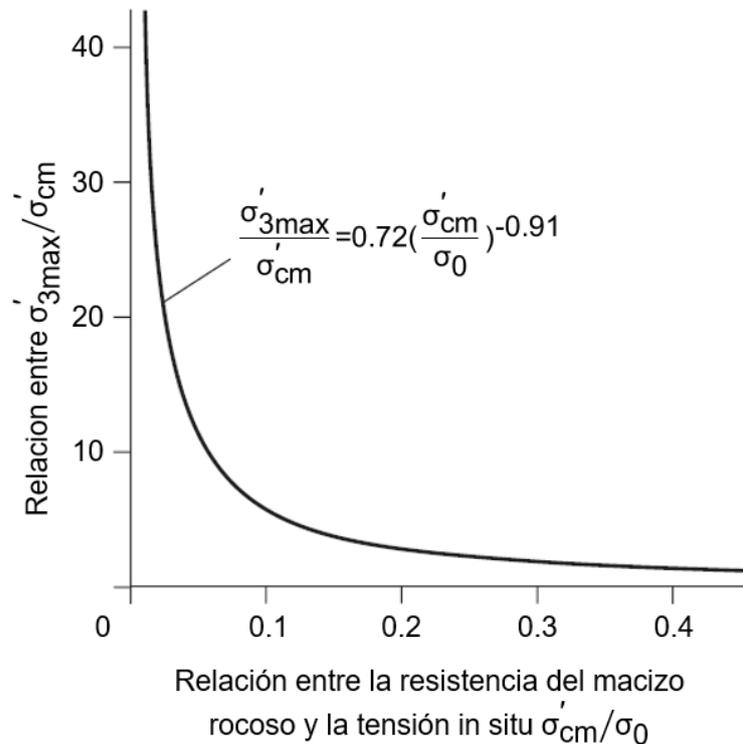


Figura 2. Relación para el cálculo de σ'_{3max} para los parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb y Hoek-Brown para taludes.

Fuente: Wyllie y Mah, (2004).

La resistencia al corte de Mohr-Coulomb τ , para un esfuerzo normal σ' , se encuentra sustituyendo estos valores de c' y ϕ' en la siguiente ecuación:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \text{ -----(10)}$$

La parcela equivalente, en términos de los esfuerzos principales mayores y esfuerzos principales menores, se define por:

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma'_3 \text{ -----(11)}$$

2.2.4 Resistencia del Macizo Rocoso

Según Hoek et al. (2002), la resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso σ_c viene dada por la ecuación: $\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a$. Para la estabilidad de los taludes, el fallamiento se inicia a lo largo de una superficie de deslizamiento dentro del talud en la que la roca está sometida a un campo de esfuerzos biaxiales y es útil considerar el comportamiento global de un macizo rocoso. Esto lleva al concepto de una "resistencia global del macizo rocoso" y Hoek y Brown (1997) propusieron que ésta podría estimarse a partir de la relación Mohr-Coulomb:

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \text{ -----(12)}$$

Con c' y ϕ' determinados para el rango de tensiones $\sigma_t < \sigma'_3 < \sigma_{ci}/4$ dando el siguiente valor para la resistencia del macizo rocoso σ'_{cm} :

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \text{ -----(13)}$$

2.2.5 Clasificaciones Geomecánicas

Las clasificaciones geomecánicas más difundidas en la ingeniería de taludes son las conocidas como Rock Mass Rating 1989 o sistema RMR₈₉ de Bieniawski, Geological Strength Index (GSI) desarrollado por Hoek. Estas clasificaciones se basan en el RQD de Deere, número de familias de discontinuidades, rugosidad y

estado general de las diaclasas, presencia de agua y adicionalmente pueden considerar la resistencia de la matriz rocosa, la orientación de las discontinuidades respecto al talud. A continuación, se describe brevemente cada uno de los métodos de clasificación de los macizos rocosos.

➤ **Índice de la Calidad de la Roca (RQD).**

Deere (1989), proporcionó un estimado cuantitativo de la calidad de la roca, a partir de los testigos de diamantina.

Tabla 3. Escala de calidades de la roca en función al RQD.

RQD (%)	Calidad de la roca
90 -100	Muy buena
75 - 90	Buena
50 - 75	Media/Regular
25- 50	Mala/Pobre
0 - 25	Muy mala/Muy pobre

Fuente: Deere, (1989).

Priest y Hudson (1976), modifican el método para taludes realizando la medición de discontinuidades en una superficie con la condición que exista una longitud mínima de 10cm:

$$RQD=100*e^{(-0.1\lambda)}*(0.1\lambda+1)$$

Donde:

$$\lambda = \frac{\text{N}^\circ \text{ de Discontinuidades}}{\text{Longitud}}$$

➤ **Clasificación Geomecánica de Bieniawski (RMR₈₉)**

Bieniawski (1989), desarrolló la clasificación entre los años 1972 a 1989 y está basada en mediciones de campo de más de 300 casos de túneles, taludes, cavernas y cimentaciones en el mundo. Esta clasificación toma en cuenta seis parámetros básicos que son:

- Resistencia de la roca inalterada (usando la clasificación de la resistencia a la compresión uniaxial de Deere y Miller).
- Índice de la Calidad de la Roca (RQD).
- Espaciamiento de las diaclasas. En este contexto, el término diaclasas se utiliza para describir todas las discontinuidades.
- Estado de las diaclasas. En este parámetro se tiene en cuenta la apertura de discontinuidades, su persistencia, su rugosidad, el estado de la pared (dura o blanda) y la naturaleza de los materiales de relleno presentes.
- Condiciones de las aguas subterráneas.

La calificación del macizo rocoso (RMR_{89}) se obtiene sumando los valores de las valoraciones determinadas para los parámetros individuales. Este valor de RMR_{89} puede ajustarse en función de la influencia de la orientación de las discontinuidades aplicando las correcciones indicadas, como se muestra en la Tabla 4 y la Tabla 5 establece la clase y la descripción asignada a los macizos rocosos.

Tabla 4. Parámetros de la Clasificación RMR.

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de Carga Puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión Simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		>2 m	0.6 - 2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Longitud (persistencia)		<1 m	1.-3 m	3.-10 m	10-20 m	>20 m		
	Puntuación		6	4	2	1	0		
	Separación (abertura)		Ninguna	<0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
	Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Ligerament e rugosa	lisa	superficies pulidas		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
	Relleno		ninguno	duro < 5mm	duro > 5mm	Blando < 5mm	Blando > 5 mm		
	Puntuación		6	4	2	2	0		
	Alteración		Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
5	Agua Subterránea	Caudal, 10m de túnel	Nulo	< 10l/min	10-25l/min	25-125l/min	>125l/min		
		Relación: presión de agua/esfuerzo principal mayor	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Estado general	seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
		Puntuación		15	10	7	4	0	
Corrección de la orientación de las discontinuidades									
	Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable		
Puntuación	Túneles		0	-2	-5	-10	-12		
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60		

Fuente: Bieniawski, (1989).

Tabla 5. Escala de calidades de la clasificación RMR₈₉.

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

Fuente: Bieniaswki, (1989).

➤ **Índice de Resistencia Geológica (GSI: Geological Strength Index)**

Hoek et al. (1995) introdujeron un nuevo esquema de clasificación del macizo rocoso conocido como Índice de Resistencia Geológica (GSI). El GSI se desarrolló para superar algunas de las deficiencias que se habían identificado al utilizar el esquema RMR con el criterio de resistencia del macizo rocoso.

El GSI se desarrolló específicamente como un método para tener en cuenta las propiedades de un macizo rocoso diaclasado que influyen en su resistencia y deformabilidad. La resistencia de un macizo rocoso diaclasado depende de las propiedades de los fragmentos de roca intactos y de la libertad de esos fragmentos para deslizarse y girar bajo una serie de condiciones de esfuerzos impuestas. Esta libertad está controlada por las formas de los fragmentos de roca intactas, así como por el estado de las superficies que las separan. El GSI trata de tener en cuenta estas dos características del macizo rocoso, su estructura, representada por su calidad de bloques y grado de entrelazado, y el estado de las superficies de discontinuidad ver Figura 3.

González de Vallejo, L. 2004. Indica que el GSI se basa en estimaciones cualitativas, y en modelos simples, que rara vez coinciden con las condiciones reales y que las observaciones debían ser realizadas por geólogos o ingenieros geólogos cuantificadores. Es por lo ello que Hoek, E; Carter, T; Diederichs, M. 2013, presentan una “Cuantificación de la tabla GSI sobre la base de dos parámetros bien establecidos, las condiciones de las discontinuidades y el RQD”.

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

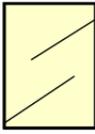
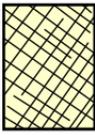
INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA MACIZOS ROCOSOS FRACTURADOS Estime el valor típico de <i>GSI</i> considerando el tipo de roca, la estructura del macizo rocoso, y la condición de las discontinuidades. NO trate de ser demasiado preciso. De hecho, el considerar $33 \leq GSI \leq 37$ es más realista que considerar $GSI = 35$. <u>Note que esta tabla NO es aplicable a problemas con control estructural.</u> Si hay estructuras desfavorablemente orientadas, ellas controlarán el comportamiento del macizo rocoso. En aquellos casos en que la resistencia al corte de las estructuras podría ser afectada por la humedad, deberá considerarse la eventual presencia de agua. Esto puede hacerse “desplazando hacia la derecha” el rango estimado para <i>GSI</i> . La presión del agua no se considera al evaluar el rango de <i>GSI</i> ; ya que la misma se incorpora posteriormente en los análisis geotécnicos, los que se desarrollan considerando esfuerzos efectivos.		CONDICION DE LAS ESTRUCTURAS				
		MUY BUENA Muy rugosas, cajas frescas o no intemperizadas	BUENA Rugosas, cajas ligeramente intemperizadas y algo oxidadas.	REGULAR Lisas, cajas moderadamente intemperizadas y algo alteradas	MALA Pulidas, cajas meteorizadas, con pátinas o con rellenos y/o fragmentos angulosos	MUY MALA Pulidas, cajas muy meteorizadas, con pátinas o con rellenos de arcilla blanda
ESTRUCTURA DEL MACIZO		DISMINUYE LA CALIDAD				
	INTACTA o MASIVA Probetas de roca intacta. Macizos masivos o con pocas y muy espaciadas estructuras.	90			N/A	N/A
	BLOCOSA Macizos con 3 sets de estructuras, que definen bloques cúbicos, bien trabados entre sí.	80			50	40
	MUY BLOCOSA Macizos con 4 sets de estructuras, o más, que definen bloques angulosos y trabados, pero que están parcialmente perturbados.	70				20
	BLOCOSA VETEADA Macizos plegados y con bloques angulosos formados por la intersección de muchas estructuras. Los planos de estratificación y/o esquistosidad son persistentes.	60				
	DESINTEGRADA Macizo fuertemente fracturado, con una mezcla de bloques angulosos y redondeados, pobremente trabados.					10
	LAMINADA / CIZALLADA Macizo con planos débiles (cizalle y/o esquistosidad), muy poco espaciados entre si y que no definen bloques.		N/A	N/A		

Figura 3. Índice de resistencia geológica (GSI) para macizos rocosos fracturadas.

Fuente: Marinos y Hoek, (2000).

Para la combinación de pruebas de laboratorio y observaciones en campo Hoek y Brown (2019) proponen un diagrama de flujo en el que se combinan secuencias de adquisición de datos de pruebas de laboratorio y observaciones de campo para calcular la relación de tensión principal para un macizo rocoso. Esto sigue utilizando modelos analíticos o numéricos para producir un diseño de corte de talud que luego se implementa y su desempeño se monitorea mediante mediciones de convergencia.

Un último paso es el análisis retrospectivo de los resultados del monitoreo y la retroalimentación de los resultados de este análisis en las primeras etapas del diagrama de flujo. Este paso es crítico ya que es el único medio por el cual el método de diseño y los parámetros de entrada utilizados en los cálculos son validados. El análisis posterior debe ser un proceso continuo durante e incluso después del proceso de construcción para que los ajustes y se pueden hacer correcciones en todas las etapas. Esto proporciona no sólo la confianza en el diseño, sino también la información que se puede utilizar para mejorar la determinación de los parámetros de entrada y la metodología de diseño.

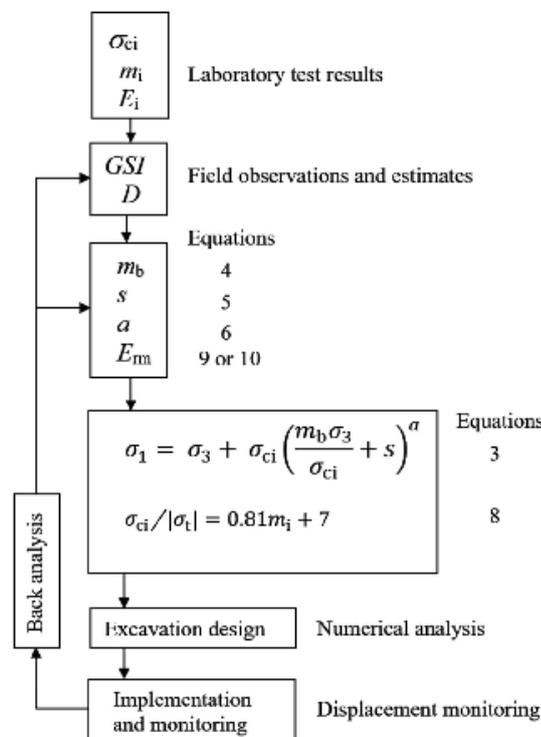


Figura 4. Diagrama de flujo para la aplicación del criterio de Hoek-Brown y el Sistema GSI a un diseño de excavación de talud. Fuente: Wyllie y Mah, (2004).

2.2.6 Inestabilidad de los Taludes en Roca

Wyllie y Mah (2004), manifiestan que los distintos tipos de rotura de los taludes están asociados a diferentes estructuras geológicas y es importante que el diseñador de taludes sea capaz de reconocer los posibles problemas de estabilidad durante las primeras fases de un proyecto.

La Figura 5 muestra los cuatro tipos de rotura considerados, y los típicos diagramas de polos de las condiciones geológicas que pueden dar lugar a dichas roturas. Obsérvese que, al evaluar la estabilidad, la cara de corte del talud debe incluirse en el diagrama estereográfico, ya que el deslizamiento sólo puede producirse como resultado del movimiento hacia la cara libre creada por el corte.

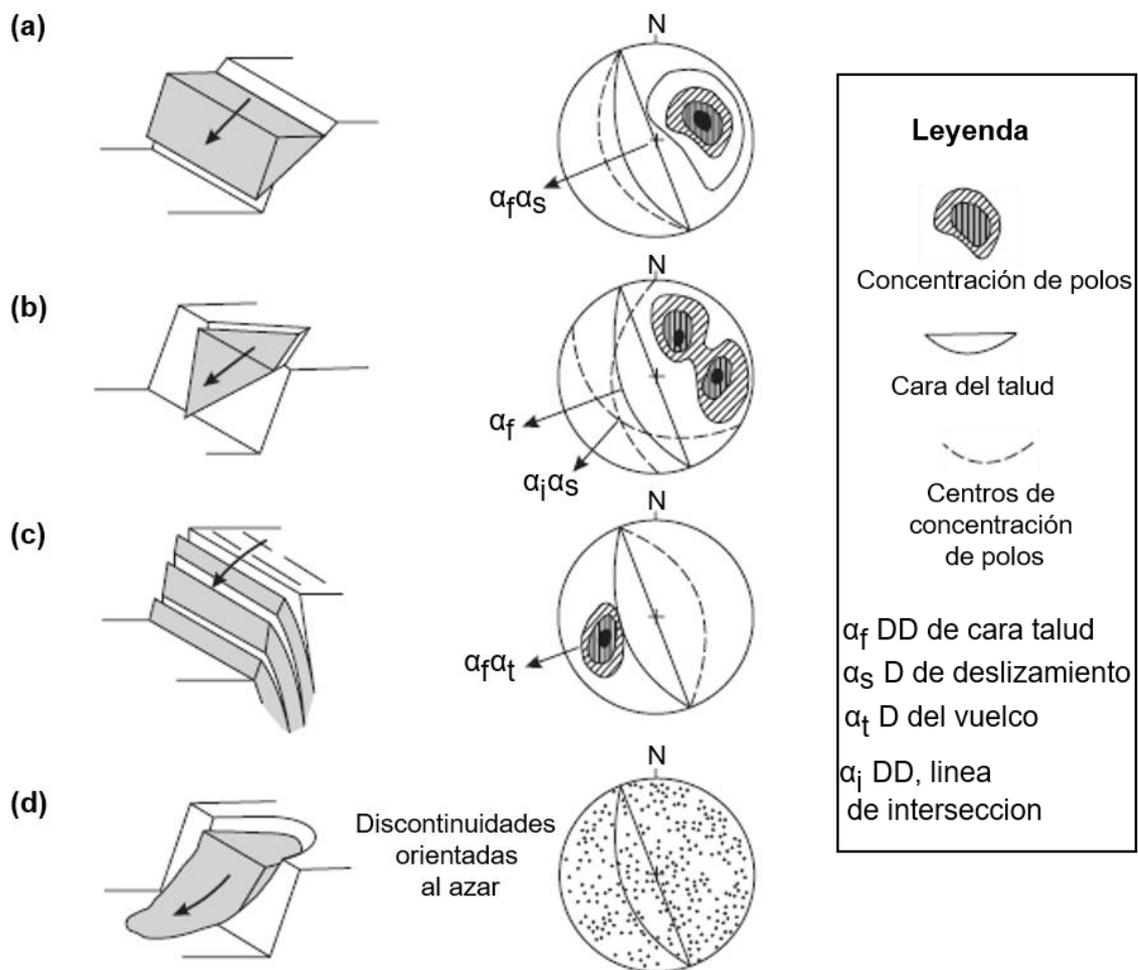


Figura 5. Principales tipos de rotura de bloques en taludes: (a) rotura planar; (b) rotura en cuña en dos discontinuidades que se cruzan; (c) rotura por desprendimiento en rocas fuertes; y (d) rotura circular en rellenos de roca, rocas muy débiles.

Fuente: Wyllie y Mah, (2004).

Hocking, (1976) citado en Wyllie y Mah, (2004), desarrollo pruebas para identificar concentraciones de polos importantes. Estas pruebas establecen la posibilidad de una rotura en cuña, en la que el deslizamiento tiene lugar a lo largo de la línea de intersección de dos discontinuidades planares como se ilustra en la Figura 5b. la rotura planar mostrado en la Figura 5a también está cubierto por esta prueba, ya que es un caso especial de rotura en cuña. En el caso de una rotura en cuña, el contacto se mantiene en ambos planos y el deslizamiento se produce a lo largo de la línea de intersección entre los dos planos. Para que se produzca la rotura planar o en cuña, es fundamental que el buzamiento del plano de deslizamiento en el caso de la rotura planar, o el buzamiento de la línea de intersección en el caso de la rotura en cuña, sea menor que el buzamiento de la cara del talud (es decir, $\psi_i < \psi_f$) (Figura 6a).

La prueba también puede diferenciar entre el deslizamiento de una cuña sobre dos planos a lo largo de la línea de intersección, o a lo largo de uno solo de los planos de manera que se produzca una rotura planar. Si las direcciones de buzamiento de los dos planos se encuentran fuera del ángulo incluido entre α_i (trend de la línea de intersección) y α_f (dirección de buzamiento de la cara de talud), la cuña se deslizará sobre ambos planos (Figura 6b). Si la dirección de buzamiento de un plano (A) se encuentra dentro del ángulo incluido entre ψ_i y ψ_f , la cuña se deslizará sólo por ese plano (Figura 6c).

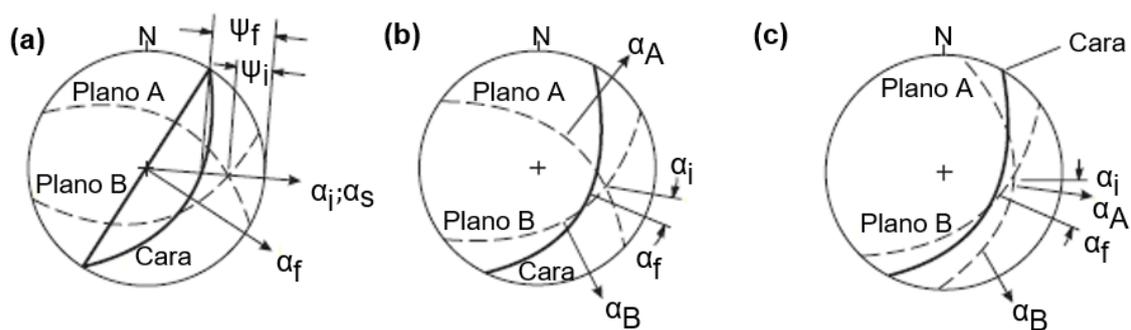


Figura 6. Identificación de rotura planar y cuñas en proyección estereográfica. (a) y (b) rotura en cuña, (c) rotura planar.

Fuente: (Wyllie y Mah, 2004).

2.2.7 Análisis cinemático

Una vez identificado el tipo de rotura del macizo rocoso en la proyección estereográfica, el mismo diagrama puede utilizarse para examinar la dirección en la que se deslizará y dar una indicación de las condiciones del talud. Este procedimiento se conoce como análisis cinemático. La relación entre la dirección en la que se deslizará el bloque de roca y la orientación de la cara del talud es fácilmente evidente en la proyección estereográfica. Sin embargo, aunque el análisis de la proyección estereográfica da una buena indicación de las condiciones de estabilidad, no tiene en cuenta las fuerzas externas, como las presiones del agua, que pueden tener un efecto significativo en la estabilidad.

El procedimiento es utilizar el análisis cinemático para identificar los bloques potencialmente inestables, seguido de un análisis detallado de la estabilidad. En la figura 7 se muestra un ejemplo de análisis cinemático en el que un talud de roca contiene tres familias de discontinuidades, la posibilidad de que estas discontinuidades provoquen roturas en el talud depende de su buzamiento y dirección de buzamiento en relación con la cara (Wyllie y Mah, 2004).

➤ **Rotura Planar**

En la Figura 7a, un bloque planar potencialmente inestable está formado por el plano AA, que se inclina con un ángulo más plano que el talud ($\psi_A < \psi_f$) y se dice que hay "envolvente de cara libre (daylight)" en el talud. Sin embargo, el deslizamiento no es posible en el plano BB, que tiene una inclinación más pronunciada que el talud ($\psi_B > \psi_f$) y no tiene daylight. Del mismo modo, el conjunto de discontinuidades CC se sumerge en la cara y el deslizamiento no puede producirse en estos planos, aunque sí es posible el vuelco. Los polos de la fase de pendiente y los conjuntos de discontinuidad (símbolo P) se representan en la proyección estereográfica de la Figura 6b.

La posición de estos polos en relación con la cara del talud muestra que los polos de todos los planos que tienen daylight y son potencialmente inestables, se

encuentran dentro del polo de la cara del talud. Esta zona se denomina envolvente daylight y puede utilizarse para identificar rápidamente los bloques potencialmente inestables.

La dirección de buzamiento de las familias de discontinuidad también influirá en la estabilidad. El deslizamiento plano no es posible si la dirección de buzamiento de la discontinuidad difiere de la dirección de buzamiento de la cara en más de unos 20° , es decir el bloque será estable si $|\alpha_A - \alpha_f| > 20^\circ$, porque en estas condiciones habrá un espesor creciente de roca intacta en un extremo del bloque que tendrá suficiente resistencia para resistir la rotura. En la proyección estereográfica esta restricción de la dirección de buzamiento de los planos se muestra mediante dos líneas que definen direcciones de buzamiento de $(\alpha_f + 20^\circ)$ y $(\alpha_f - 20^\circ)$. Estas dos líneas designan los límites laterales de la envolvente de luz (Figura 7b).

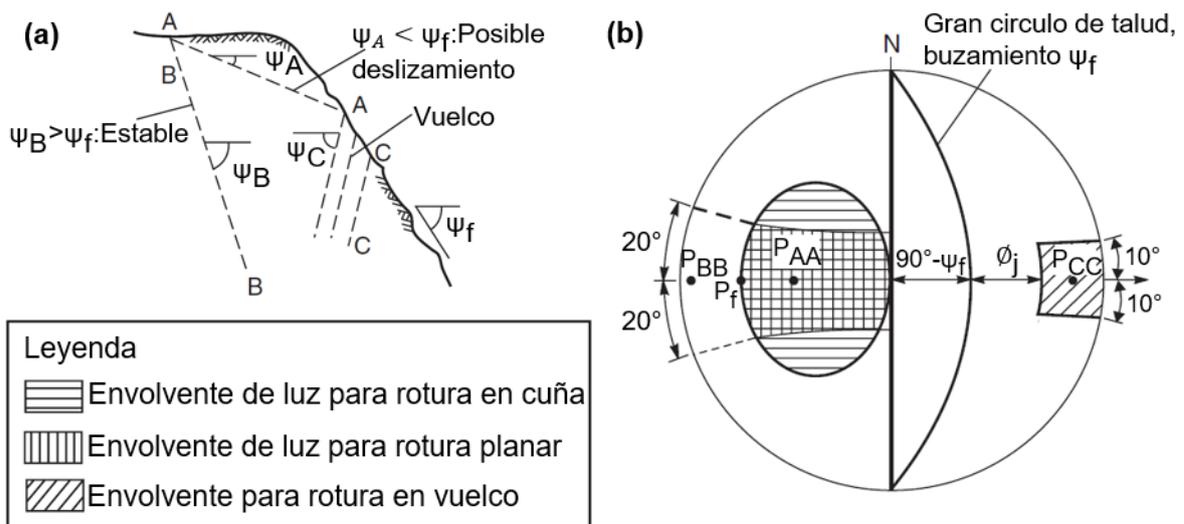


Figura 7. Análisis cinemático de bloques de roca en talud: (a) familias de discontinuidades en talud; y (b) envolventes de luz en la proyección estereográfica de igual área.

Fuente: Wyllie y Mah, (2004).

➤ **Rotura en Cuña**

El análisis cinemático de las roturas en cuña (Figura 5b) puede realizarse de forma similar al de las roturas planares. En este caso el deslizamiento es posible, si el buzamiento de la línea de intersección de dos discontinuidades es menor que

el buzamiento del talud, es decir ($\psi_i < \psi_f$). La dirección de deslizamiento de las cuñas cinemáticamente admisibles es menos restrictiva que la de las roturas planares, porque hay dos planos para formar superficies de liberación. La envolvente de luz para la línea de intersección, es más amplia que la envolvente para las roturas planares (Figura 7b). La envolvente de luz de la cuña es el lugar de todos los polos que representan las líneas de intersección cuyas direcciones de buzamiento se encuentran en el plano de la cara del talud.

➤ **Cono de Fricción**

Una vez que se ha determinado si un bloque en el talud es cinemáticamente admisible, a partir de las envolventes de luz, también es posible examinar las condiciones de estabilidad en la misma proyección estereográfica. Este análisis se realiza suponiendo que la resistencia al corte de la superficie de deslizamiento comprende sólo la fricción y la cohesión es nula. Consideremos un bloque en reposo sobre un plano inclinado con un ángulo de fricción de ϕ entre el bloque y el plano (Figura 8a). Para una condición de reposo, el vector de fuerza normal al plano debe estar dentro del cono de fricción. Cuando la única fuerza que actúa sobre el bloque es la gravedad, el polo al plano está en la misma dirección que la fuerza normal, por lo que el bloque será estable cuando el polo esté dentro del círculo de fricción.

Las envolventes de la Figura 8b muestran las posibles posiciones de los polos que pueden formar bloques inestables. Se han dibujado las envolventes para la cara del talud ángulos de 60° y 80° , que muestran que el riesgo de inestabilidad aumenta a medida que la pendiente se hace más pronunciada, como indican las envolventes más grandes para la pendiente más pronunciada. Además, las envolventes se hacen más grandes a medida que disminuye el ángulo de fricción. Las envolventes también indican que, para la condición de carga de gravedad simple, la inestabilidad sólo se producirá en un rango limitado de condiciones geométricas.

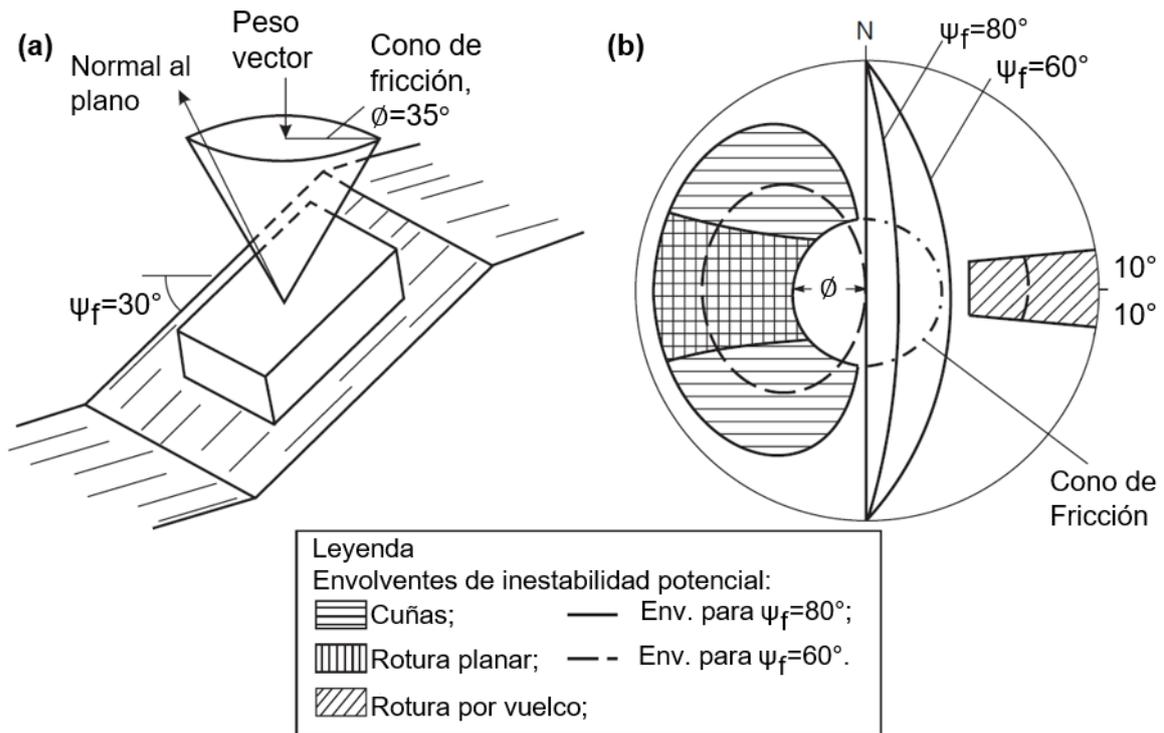


Figura 8. Análisis combinado de cinemática y estabilidad simple utilizando el concepto de cono de fricción: (a) cono de fricción en relación con el bloque en reposo en un plano inclinado (es decir, $\phi=\psi_p$); y (b) proyección estereográfica del cono de fricción superpuesto a las envolventes de luz.

Fuente: Wyllie y Mah,(2004).

2.2.8 Métodos de Estudios de Estabilidad de Taludes

Según Ramírez y Alejano (2004), el estudio de estabilidad de taludes se suele efectuar en varias fases, como en la mayoría de los estudios geotécnicos. La metodología recomendada para este estudio se presenta en la Figura 9.

No existe una solución única para construir un talud estable, sino que, por el contrario, normalmente caben varias alternativas que conviene valorar económicamente antes de elegir una; tanto en minería como en obras públicas la más conveniente suele ser excavar el talud con una pendiente tal que alcance un coeficiente de seguridad superior a 1,5 en las peores circunstancias, pero esto no siempre es posible.

Un aspecto del estudio de estabilidad de un talud que se debe resolver ya al principio, en cuanto se dispone de los datos de la investigación geológico-

geotécnica, es el mecanismo de rotura más probable que puede producirse en él. Para analizar la estabilidad de un talud hay que tener en cuenta las características del macizo rocosos donde se construye. Si se trata de un macizo rocoso con gran resistencia en conjunto, pero diaclasado o con fallas, son estas discontinuidades las que van a gobernar el tipo de rotura. Si, por el contrario, la resistencia del macizo es baja, la rotura viene condicionada por la resistencia al corte de éste. Además, existen otros factores que pueden condicionar la rotura, como la presencia de agua, los efectos vibratorios provocados por voladuras y terremotos.

Para estudiar la estabilidad de un talud, las líneas a seguir pueden ser las siguientes:

- Realización de una campaña de investigación geológica y geotécnica.
- Investigación de las características resistentes de las rocas y de las discontinuidades de los macizos rocosos, mediante: ensayos de laboratorio, análisis retrospectivos de roturas acaecidas en los taludes de la zona, ensayos de campo e instrumentación (piezómetros, presiómetros, medida de tensiones, etc.).
- Determinación de los criterios de rotura más acordes para explicar los comportamientos observados en los macizos rocosos.
- Análisis retrospectivos sistemáticos de roturas acaecidas.
- Análisis pormenorizado de la estabilidad de los taludes mediante la utilización de modelos de equilibrio límite o modelos numéricos.
- Una vez en las fases de construcción y operación se deberá, no obstante, controlar o vigilar el talud al objeto de constatar que se cumple razonablemente el resultado de los estudios.

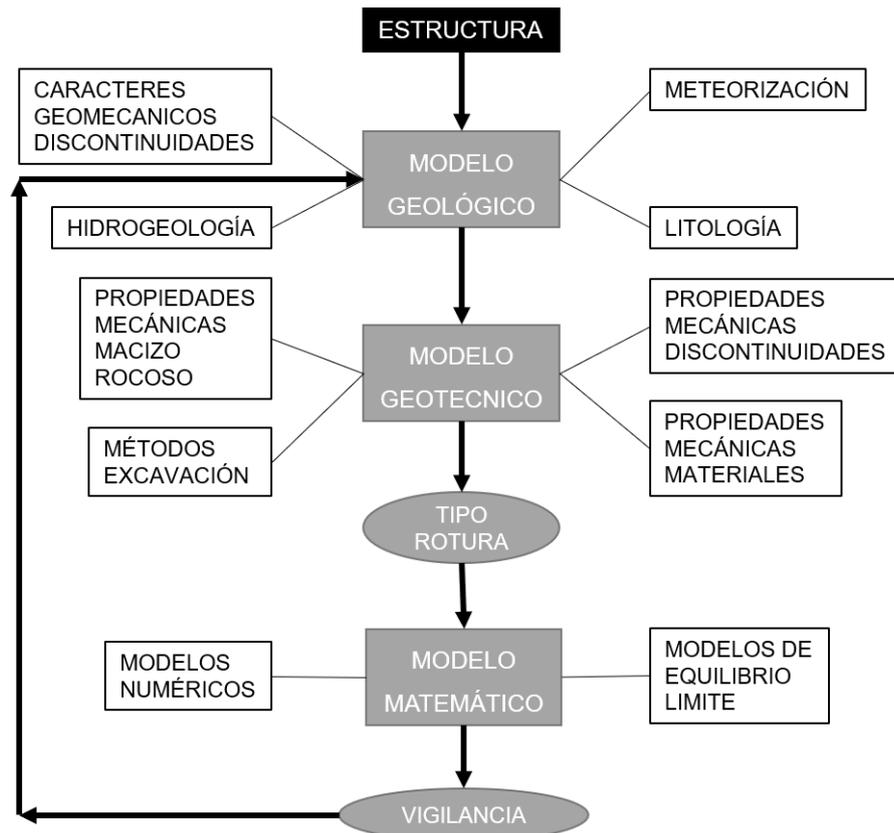


Figura 9. Etapas para realizar un estudio de estabilidad de taludes.

Fuente: Ramírez y Alejano, (2004).

2.2.9 Mecánica de los Análisis de Equilibrio Límite

Según Duncan (1996), en las técnicas de equilibrio límite, la estabilidad de los taludes se analiza calculando primero el factor de seguridad. El Factor de Seguridad se define como:

$$F = \frac{\text{resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie de falla.}} \quad \text{-----}(15)$$

Que puede expresarse como:

$$F = \frac{c + \sigma \tan \phi}{\tau_{eq}} \quad \text{-----}(16)$$

Dónde: F=Factor de Seguridad, c= Cohesión en el diagrama de resistencia de Mohr-Coulomb, ϕ =ángulo de fricción interna, σ =esfuerzo normal en la superficie de deslizamiento, y τ_{eq} =esfuerzo de corte.

Al hablar de los métodos de análisis de equilibrio, a veces se dice que se supone que el factor de seguridad tiene el mismo valor en todos los puntos de la superficie de deslizamiento, esto es poco probable que se cumpla en un talud real. Por lo tanto, es importante entender que la ecuación 15 define F , y no implica la suposición de que F es la misma en todos los puntos a lo largo de la superficie de deslizamiento para un talud que no está en fallo. Para evaluar la estabilidad de un talud mediante métodos de equilibrio límite, es necesario realizar cálculos para un número considerable de posibles superficies de deslizamiento con el fin de determinar la ubicación de la superficie de deslizamiento crítica y el correspondiente valor mínimo de F (Duncan, 1996).

Los métodos de análisis son métodos de las dovelas, llamados así porque subdividen la masa potencial de deslizamiento en tajadas verticales con fines de análisis (Figura 10). Esta subdivisión permite dos simplificaciones útiles:

- La base de cada dovela pasa por un solo tipo de material, y
- Los cortes son lo suficientemente estrechos como para que los segmentos de la superficie de deslizamiento en la base de cada corte puedan representarse con precisión mediante una línea recta.

Las condiciones de equilibrio pueden considerarse dovela por dovela. Si una condición de equilibrio se satisface para todas y cada una de las dovelas, también se satisface para toda la masa.

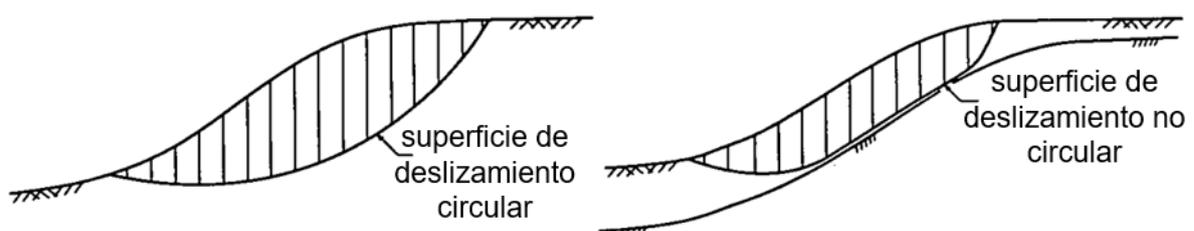


Figura 10. División de las masas potenciales de deslizamiento en dovelas, la superficie de deslizamiento es una idealización de la superficie de ruptura.

Fuente: Duncan, (1996).

Tabla 6. Ecuaciones e incógnitas en el análisis de equilibrio límite de la estabilidad de taludes.

ECUACIONES	INCÓGNITAS
Métodos que sólo satisfacen el equilibrio de fuerzas	
N=Equilibrio horizontal	N= Fuerzas normales en las bases de las dovelas
N=Equilibrio vertical	N-1=Fuerzas laterales
	N-1=Ángulos de fuerza lateral, θ
	1=Factor de seguridad
2N Total de ecuaciones	3N-1Total de incógnitas
Métodos que satisfacen tanto el equilibrio de fuerzas como el de momentos	
N= Equilibrio horizontal	N= Fuerzas normales en las bases de las dovelas
N= Equilibrio vertical	N= Ubicaciones de las fuerzas normales en las bases
N=Momento de equilibrio	N-1= Fuerzas laterales
	N-1= Ángulos de fuerza lateral, θ
	N-1= Ubicaciones de las fuerzas laterales en las dovelas
	1= Factor de seguridad
3N Total de ecuaciones	5N-2Total de incógnitas

Fuente: Duncan, (1996).

En la Tabla 7 se resumen las características de varios métodos de uso práctico con respecto a las condiciones de equilibrio que satisfacen.

Tabla 7. Características de los métodos para la estabilidad de taludes.

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi=0$).
Bishop modificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú generalizado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales es la misma para cada tajada, pero son desconocidas
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.
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.

Fuente: Suárez, (2009).

Según Duncan (1996), si el método de análisis satisface todas las condiciones de equilibrio, el factor de seguridad será preciso con un margen de $\pm 6\%$. Los métodos de Morgenstem y Price (1965), Spencer (1967) y Sarma (1973) y el procedimiento generalizado de dovelas (GPS) (Janbu, 1968) satisfacen todas las condiciones de equilibrio e implican suposiciones razonables. Los estudios han demostrado que los valores de F calculados con estos métodos no difieren en más de un 6% de los valores calculados con el método de la espiral logarítmica y el método de los elementos finitos, que satisfacen todas las condiciones de equilibrio, pero no son métodos de dovelas.

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Diaclasa. Fractura que aparece en macizo rocoso, ocasionalmente producida por los esfuerzos tectónicos, presentando direcciones definidas a las cuales se les denomina sistemas de diaclasas. El diaclasamiento está controlado por la estructura geológica y por las deformaciones tectónicas. (Dávila, 2011).

Esfuerzo cortante (τ). Esfuerzo que actúa en paralelo a un plano sobre el que se ha aplicado una fuerza. Los esfuerzos cortantes tienden a promover el deslizamiento a lo largo de un plano. Convencionalmente, se designan con el símbolo τ ; $+\tau$ indica un sentido de corte a la izquierda, $-\tau$ un sentido de corte a la derecha (Allaby, 2008).

Estabilidad de los taludes. Esto depende de la fuerza relativa de las fuerzas que tienden a hacer que el material del talud se mueva y de las fuerzas que resisten dicho movimiento. El factor de seguridad para un talud se expresa como la relación entre la resistencia al corte y el esfuerzo cortante (Allaby, 2008).

Macizo rocoso. Un cuerpo grande e indistinto de materiales terrestres sólidos, que contiene características en la escala de diaclasas, plegamientos, esquistosidad, fallas, planos de estratificación. (Allaby, 2008).

Resistencia. Es la capacidad de las rocas, minerales y materiales de oponerse a la deformación ante los diferentes tipos de esfuerzos, tales como erosivos, cortantes, elásticos, presiones, etc. (Dávila, 2011).

Resistencia al corte. La resistencia interna de un material a un esfuerzo cortante; varía según la temperatura, la presión de confinamiento, la forma, el tamaño, la velocidad de carga y la cantidad de líquido de poros presente. La resistencia al corte residual es la resistencia máxima a lo largo de una superficie o partición en suelo o roca después de que ha ocurrido el corte (Allaby, 2008).

Falla. Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro continuo a éste o de ambos bloques a través de un plano denominado “plano de falla”. Las fallas son producto de esfuerzos tectónicos, epirogenesis, orogenia, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de parte de la corteza. (Dávila, 2011).

Matriz Rocosa. Separación de la masa rocosa en bloques o roca intacta. (González de Vallejo, 2002).

Rotura. Proceso por el que un cuerpo sometido a esfuerzo pierde la cohesión y se divide en dos o más partes, comúnmente mediante una fractura frágil (Allaby, 2008).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El área de investigación, se encuentra ubicada al SE de la ciudad de San Marcos y al NW de la ciudad de Cajabamba, en la carta geológica de San Marcos (15g), con una altitud promedio de 2400 m.s.n.m., y abarcando 6 km. Las coordenadas de inicio y final del tramo son Km 14+000 y Km 20+000 de la carretera San Marcos- Cajabamba.

Tabla 8. Coordenadas UTM - WGS-84 del tramo de investigación.

Tramo	Kilómetro	Coordenada Norte	Coordenada Este	Altitud (m.s.n.m)
San Marcos – Ichocán	Km 14+000	9117971.18	817899	2500
Ichocán - Aguas Calientes	Km 20+000	9177567.93	818578.73	2300

Políticamente se encuentra ubicado en:

Tabla 9. Ubicación Política.

Región	Cajamarca
Provincia	San Marcos
Distritos	Eduardo Villanueva - Chancay

3.2 ACCESIBILIDAD

El área de investigación es accesible desde la ciudad de Cajamarca, mediante la vía asfaltada Cajamarca – San Marcos, con un recorrido de 84.1 km en promedio y un tiempo aproximado de 2.15 horas en automóvil. La Tabla 9 muestra

que el área de estudio se encuentra en la ruta de acceso Cajamarca – San Marcos – Cajabamba, mediante una vía asfaltada.

Tabla 10. Acceso al área de investigación.

Ruta Terrestre	Distancia Km	Estado	Tiempo
Cajamarca – San Marcos- Cajabamba	84.1	Asfaltada	2.15 horas

3.3 CLIMA

Las condiciones climáticas abarcan dos estaciones bien marcadas como resultado de las diferencias altitudinales. Siendo estas la de un periodo lluvioso en los meses de diciembre y marzo y otro seco entre abril a noviembre; los cuales presentan periodos irregulares ya sean abundantes precipitaciones pluviales o periodos de sequias.

En el trayecto de San Marcos – Cajamarca el clima es seco hasta sub húmedo, siendo notoria la diferencia de temperaturas mínimas y máximas o nocturnas o diurnas. Tiene una temperatura promedio anual de 18° - 30° para valle inter andino.

3.4 METODOLOGÍA

3.4.1 Tipo, nivel, diseño y método de la Investigación.

En la metodología se detallará el tipo de investigación utilizada, según el tipo, el nivel, el diseño y el método de la investigación. Todos estos aspectos se describen en la Tabla N° 11.

Tabla 11: Clasificación y descripción de los tipos de investigación.

Tipo de investigación	
Clasificación	Tipos de investigación
1. Según tipo	<p>Cuantitativa: La investigación es de tipo cuantitativa porque se centra en la recopilación y el análisis de datos, así como utiliza valores numéricos mediante los softwares para determinar los valores y clasificar los taludes inestables.</p>
2. Según nivel	<p>Descriptivo: Para esta investigación se describieron las unidades morfogénicas, el marco geológico - estructural y las estaciones geotécnicas.</p> <p>Correlacional: La investigación relaciona las variables independientes de precipitación, infiltración y sismicidad con la variable dependiente inestabilidad geotécnica.</p> <p>Explicativo: Es explicativa por que estudia el problema de la investigación, la cual ayuda a sustentar y contrarrestar la hipótesis planteada.</p>
3. Según diseño	<p>No experimental: Es no experimental de campo, ya que la investigación se realiza tal cual se encuentra en la naturaleza, sin modificación de sus variables de los taludes inestables.</p> <p>Transversal: Debido a que se estudiará sólo en un determinado tiempo el análisis de la inestabilidad de los taludes entre las progresivas km 14+000 al km 20+000, en la provincia de San Marcos.</p>
4. Según método	<p>Deductivo- Inductivo: Deductivamente la investigación extrae datos a partir de la descripción de las estaciones geomecánicas, para obtener el Factor de seguridad y Inductivamente la investigación alcanza una conclusión general a partir de casos particulares.</p>

3.4.2 Población de Estudio

Los taludes entre los Kms 14+000 a 20+000, de la carretera San Marcos – Cajabamba. En una longitud de 6 km.

3.4.3 Muestra

Puntos de control registrados en las estaciones geomecánicas y planos.

3.4.4 Unidad de Análisis

Constituida por los macizos rocosos, litomorfoestructuras, precipitación, infiltración, sismicidad.

3.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.5.1 Técnicas

- Recopilación de información: involucró la búsqueda, obtención y revisión de informes anteriores, así como teorías relacionadas con el problema de la investigación.
- Interpretación de imágenes satelitales: elaborado mediante la evaluación de la topografía, redes hídricas y contactos litológicos, corroborados en campo y su posteriormente cartografiado geológico a escala 1:8000.
- Ensayos geomecánicos in situ: realizado mediante el golpe de la picota de geólogo en la superficie de la roca intacta en los macizos rocosos para la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.
- Análisis mediante el Software de la compañía Rocscience Inc., Slide v.6.0: cálculo del Factor de Seguridad, a partir del uso de tres métodos del Equilibrio Límite (Bishop Simplificado, LE/Morgenstern-Price y Spencer) y bajo tres condiciones natural, saturación parcial y sismicidad máxima con saturación total que representan el estado actual y pronóstico del talud.

3.5.2 Instrumentos de recolección de data

- Ficha de Registro geológico – geotécnico. Se utilizó para llevar el registro de los diferentes macizos rocosos, así como la condición de las familias de diaclasas, estructuras y litología presente en el área de investigación.
- Imagen Satelital. Se utilizó de punto de partida para exploración previa y generación de MDE a partir de un ráster en el software ArcGIS.
- Planos: Satelital 1/10000, MDE 1/8000, Geológico 1/8000: Son escalas de presentación final del área de investigación.
- Libreta de campo. Se registró las litologías con su respectiva descripción y coordenadas UTM.

3.5.3 Equipos

- GPS, utilizado para la toma de coordenadas UTM en sistema WGS84 de las estaciones geomecánicas.
- Picota de geólogo, utilizada para ensayo in situ de resistencia a la compresión uniaxial de roca.
- Brújula, utilizada para la lectura de buzamiento y orientación del macizo rocoso y discontinuidades.
- Lupa, utilizada para la observación de la textura de grano de roca intacta y reconocimiento de minerales y rocas.
- Protactor, Se utiliza para la ubicación de fallas, estaciones geomecánicas, y cartografiado geológico.
- Lápiz rayador, utilizado para el reconocimiento de minerales mediante la prueba de dureza.
- Ácido clorhídrico, Se utiliza para minerales calcáreos mediante reacción química.

- Tablero, utilizado para llevar los formatos de campo y planos previos.
- Flexómetro 5m, utilizado para medir espesor de discontinuidades, abertura, espaciado, espesor de capas de macizo rocoso.
- Wincha 50m, utilizada para medir la longitud lineal y persistencia de las estaciones geomecánicas.
- Colores, Se utiliza para las diferentes litologías presentes en el área de investigación (cartografiado geológico).

3.5.4 Softwares

- Dips. Para para el análisis cinemático y proyección estereográficas del macizo rocos y las familias de discontinuidades.
- RockData. Para determinar los parámetros de Hoek y Brown y Mohr Coulomb.
- Slide v.6.0. Para el cálculo del factor de seguridad.
- SasPlanet. Para la obtención de imagen satelital georreferenciada.
- ArcGIS 10.8.0. Para elaboración de planos.

3.6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.

Será progresivo de acuerdo al avance de la investigación, utilizando la data obtenida en campo. Se usarán Softwares para digitalización y procesamiento de datos, como: SASPlanet, ArcGIS 10.8.0, Dips, y Softwares geotécnicos como RockData, Slide.

3.6.1 Etapa de gabinete I

Está conformada por la búsqueda, obtención y revisión de informes anteriores, teorías relacionadas con el problema de investigación y la evaluación de imágenes satelitales para un mejor estudio de estructuras y geoformas. Con la

Data de la carta geológica 15g (cuadrángulo de San Marcos) elaborado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), se realizaron los planos Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y Geológico. La segunda fase se realiza campañas de campo, análisis e interpretación de los datos obtenidos.

3.6.2 Etapa de Campo

De las investigaciones de campo se obtuvo los principales parámetros geomecánicos - geotécnicos; por lo cual, se realizó el cartografiado geológico y la caracterización geomecánica de la carretera San Marcos –Cajabamba, a escala 1: 8 000; logrando un análisis comparativo y descriptivo, permitiendo definir las condiciones geotécnicas.

3.6.3 Etapa de Gabinete II

Con la información obtenida en las etapas anteriores, se procesó e interpretó utilizando los resultados de los softwares: SAS Planet, ArcGIS 10.8.0, AutoCAD 2019, y el software de la Compañía Rocscience.Inc, Rock Data v.4.0, Dips v.7.0, Slide v.6.0. En base al modelo digital de elevaciones (MED) y el procesamiento de la información obtenida durante la investigación, se obtuvo el plano geológico a detalle. Por último, se elaboraron los planos de Zonificación Geomecánica y geotécnica.

3.7 UNIDADES MORFOGENÉTICAS.

Para la zonificación de las unidades morfogénicas, mediante el software ArcGIS 10.8.0, se realizó el Plano con el cual se determinó la altimetría y la pendiente de la zona de investigación, a partir de la elaboración del TIN (Red Irregular de Triángulos), seguida del MDT (Modelo Digital del Terreno). Finalmente, para determinar las unidades morfogénicas se tuvo en cuenta la altitud y la pendiente considerada en la clasificación de Rodríguez (2016).

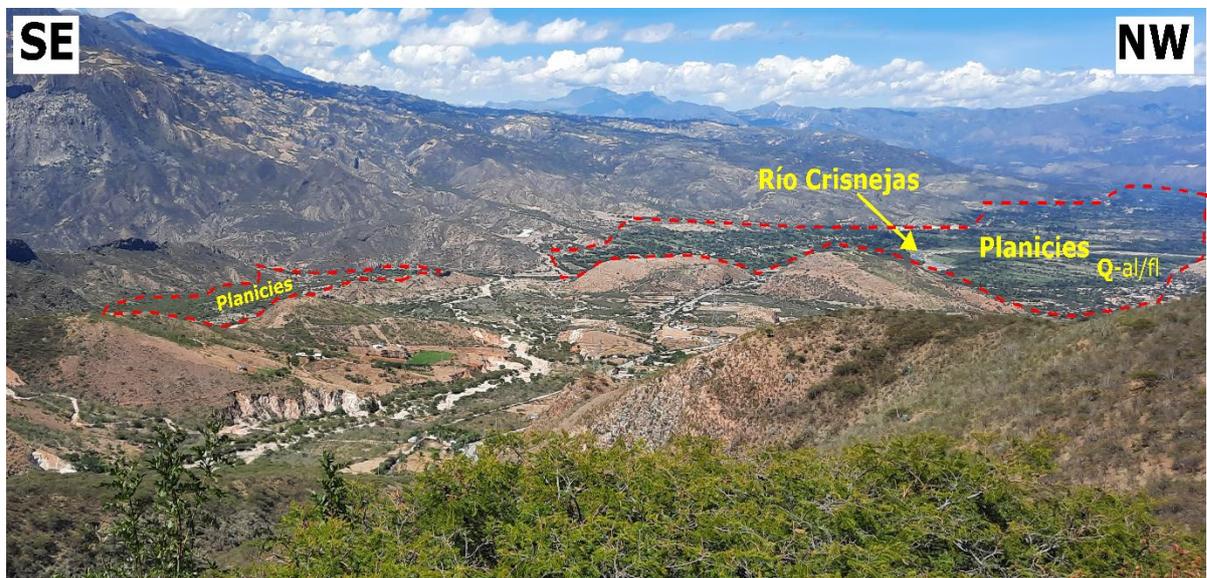
Tabla 12. Unidades Morfogenéticas.

Pendientes	Descripción
0° - 8°	Planicies
8° - 20°	Lomadas
20° - 50°	Laderas
50° - 90°	Escarpas

Fuente: Rodríguez, (2016.)

3.7.1 Planicie

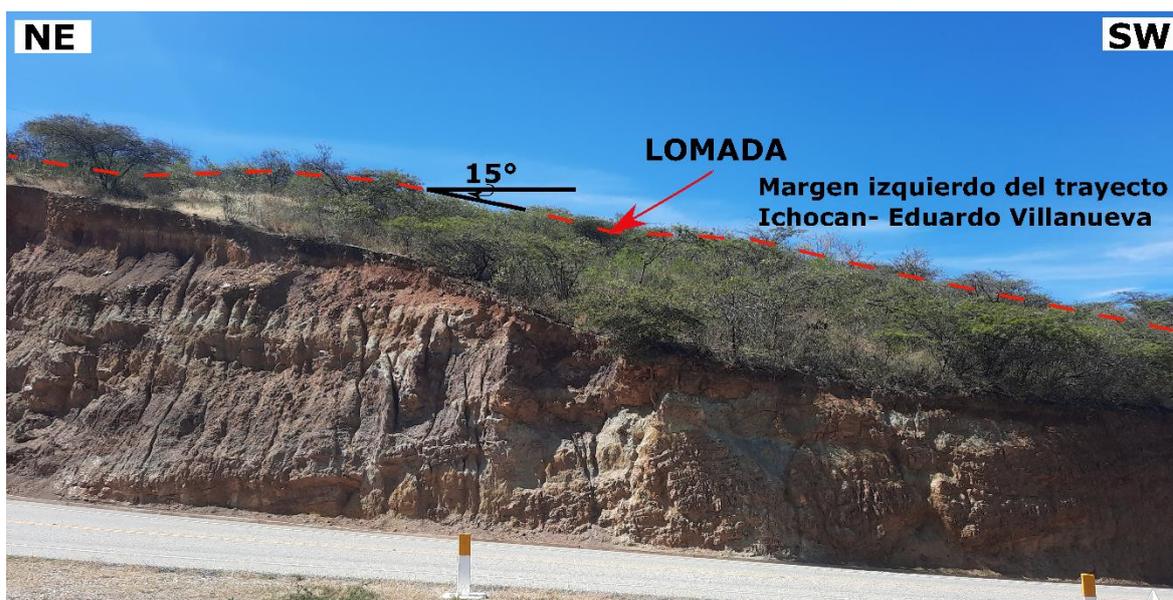
Son superficies caracterizadas por presentar rangos de pendientes de 0° a 8°, en la cual su morfología es bastante homogénea producto de procesos principalmente denudacionales, por lo general estas zonas presentan buena cobertura vegetal; ya que, son de fácil manejo para actividades agrícolas y ganaderas, aunque muchas de estas geoformas están cubiertas por capas de material aluvial y fluvio-aluvial. Se cartografiaron en los cauces del Río Crisnejas relacionados con depósitos fluviales y aluviales.



Fotografía 1. Planicie con pendiente aproximada de 4-6°, ubicada en la margen derecha del Río Crisnejas. Coordenadas: E: 817390, N: 9178393, Cota: 2100 m.s.n.m.

3.7.2 Lomada

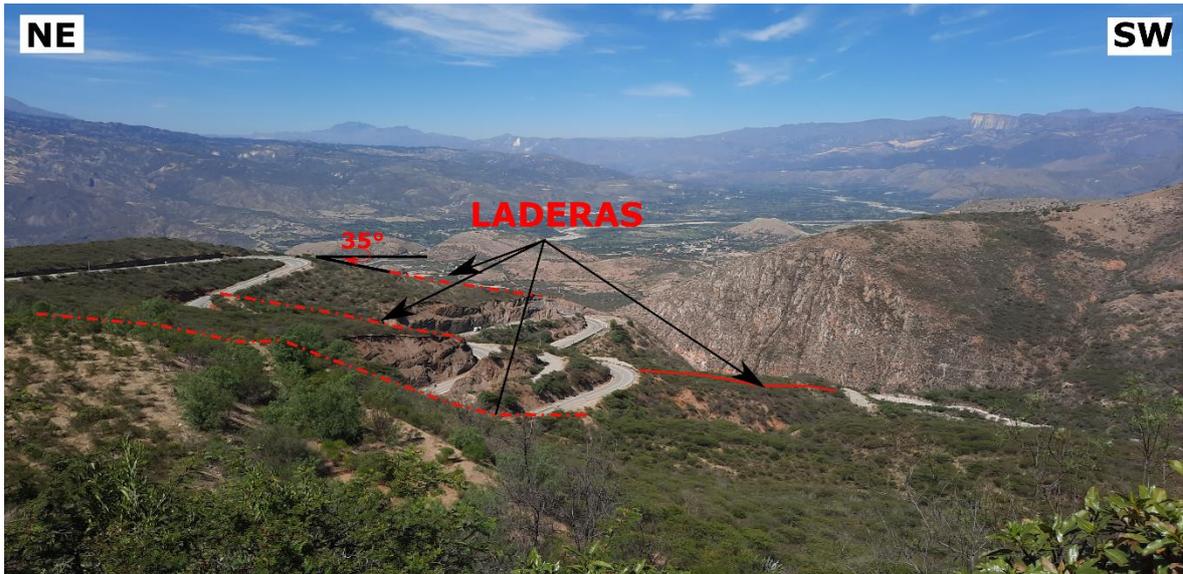
Son superficies con pequeñas elevaciones, caracterizadas por presentar rangos de pendientes de 8° a 20° y una morfología heterogénea. Se cartografiaron en ambos flancos de la carretera, principalmente en partes medio-altas del área de investigación, relacionadas con depósitos aluviales y litológicamente presentes en las Formaciones Chimú y Santa del Cretácico Inferior. Constituyen la segunda geoforma con mayor distribución de área.



Fotografía 2. Lomada con pendiente aproximada de 15°, ubicada al margen izquierdo del trayecto Eduardo Villanueva- Ichocán. Coordenadas: E: 817863, N: 9178977, Cota: 2521 m.s.n.m.

3.7.3 Ladera

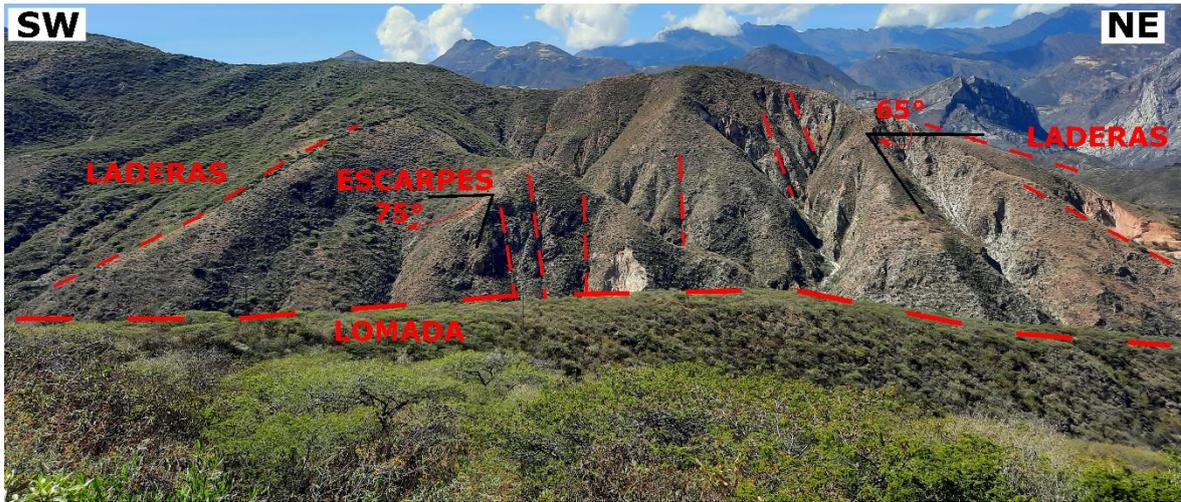
Son superficies con inclinaciones moderadas, caracterizadas por presentar pendientes de 20° a 50° debido principalmente a procesos denudacionales. Presentan una morfología heterogénea, se cartografiaron en las partes medio-altas de área de investigación y ocupa un gran porcentaje del área de investigación, constituyendo la geoforma con mayor distribución. Está relacionada con depósitos aluviales con delgadas capas de depósitos coluviales y litológicamente presente en las Formaciones Chimú, Santa y la Formación Carhuaz.



Fotografía 3. Laderas con pendiente aproximada de 30° a 50°, ubicada en los Km 16 +000 – 18+500 en la Formación Chimú y la Formación Santa además de aluviales. Coordenadas: E: 817904, N: 9178866, Cota: 2507 m.s.n.m.

3.7.4 Escarpes

Son superficies con fuertes pendientes, caracterizadas por presentar pendientes mayores a 50° debido tanto a procesos denudacionales como a deformaciones estructurales, presentan una morfología heterogénea. Este tipo de unidad geomorfológica es siempre la generadora de zonas críticas ya que por su gran pendiente y al ser sometidas a procesos de excavación mecánica entran en estado de desequilibrio continuo y son muy difíciles de estabilizar. Se cartografiaron en varios tramos de la carretera; así como también, en las Formaciones Carhuaz y Chimú.



Fotografía 4. Escarpes con pendiente aproximada de 60° a 80°, ubicada al Oeste(W) del tramo de la investigación, coordenadas: E: 817864, N: 9178978, Cota: 2529 m.s.n.m.

3.8 MARCO GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL LOCAL

En la carretera San Marcos – Cajabamba tramo 14+000 – 20 +000 km, se encuentra diferentes unidades geológicas que intervienen en el comportamiento geotécnico, puesto que se encuentran rocas pertenecientes al Cretácico Inferior: Formación Chimú, Santa, Carhuaz las cuales están constituidas por secuencias estratigráficas de areniscas cuarzosas, areniscas calcáreas, arcillolitas negras y grises, calizas arenosas de color gris claro hasta oscuras, formando estratos.

También están presentes depósitos cuaternarios de tipo aluvial, fluvial y coluvial, coluvio-aluvial, en todos los casos sin ninguna tendencia estratiforme y muy heterogéneos.

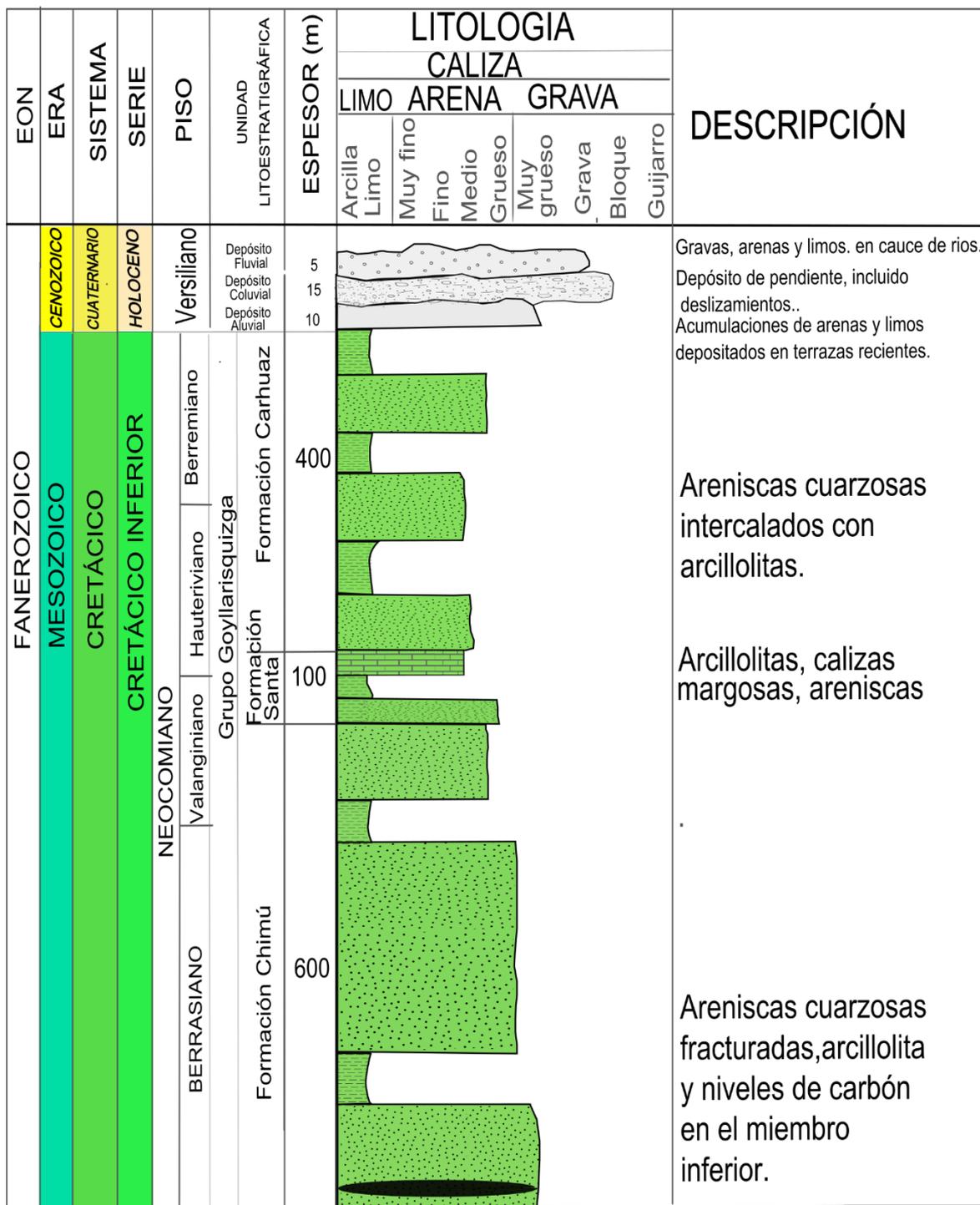


Figura 11: Columna litoestratigráfica del área de investigación.

3.8.1 Grupo Goyllarisquizga

➤ **Formación Chimú (Ki-Chim)**

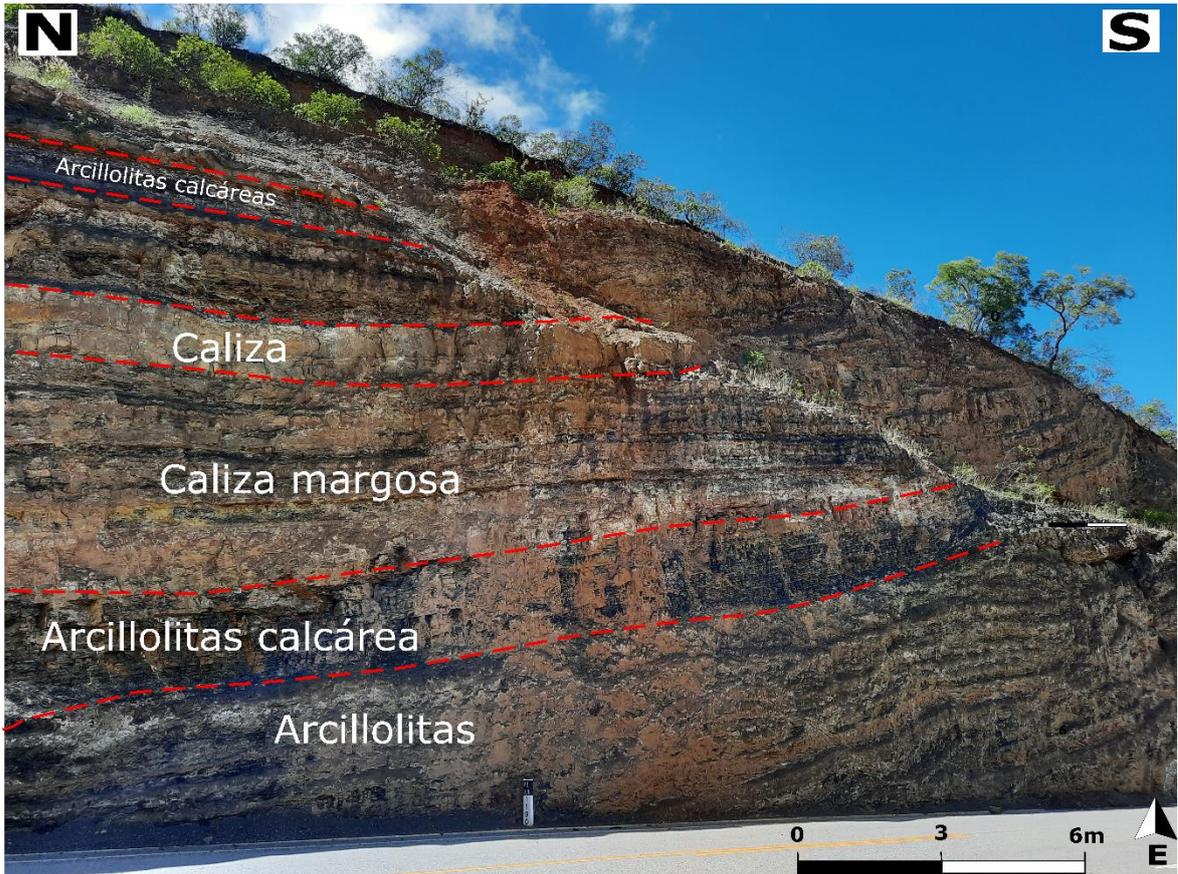
Formada por intercalación de areniscas cuarzosas y arcillolitas, con niveles de carbón en el miembro inferior, las areniscas cuarzosas de la parte superior son bancos gruesos. Las areniscas son de grano medio a grueso. La encontramos aflorando con mayor claridad en las progresivas 18+900 – 20+ 000 Km.



Fotografía 5. Areniscas cuarzosas intercalada con arcillolitas y niveles de carbón de la Formación Chimú Km 18+ 900.

➤ **Formación Santa (Ki-sa)**

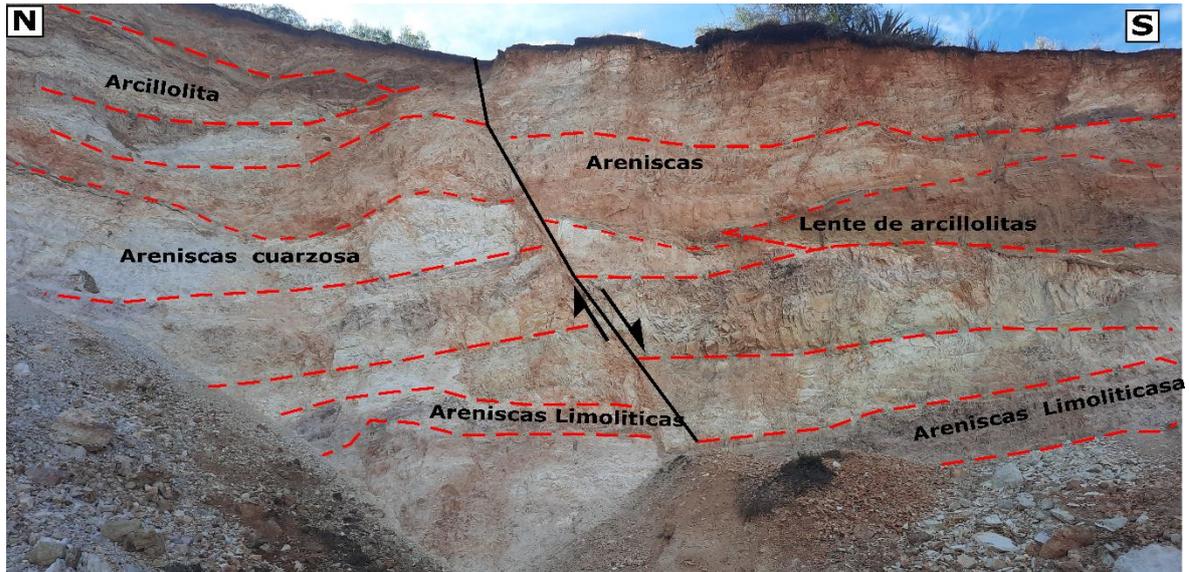
Compuesta por una intercalación de arcillolitas, calizas margosas y areniscas. Aflora en el tramo 17+300 – 17 +670 km.



Fotografía 6. Arcillolitas gris negruzcas intercalada con arcillolitas calcáreas y calizas margosas de la Formación Santa Km 17+ 570.

➤ **Formación Carhuáz (Ki-ca)**

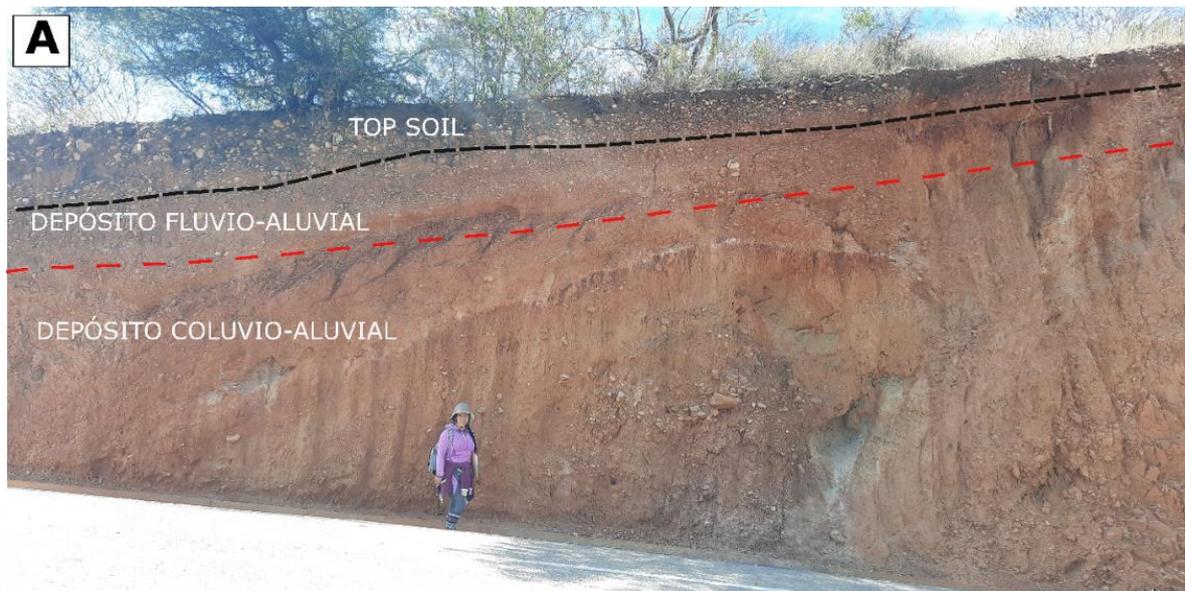
Está formada por una alternancia de areniscas cuarzosas color rojo y arcillolitas limosas color gris. Hacia la parte superior contiene estratos de areniscas cuarzosas que se intercalan con arcillolitas y areniscas. Aflora en el Km. 14+000 hasta el Km. 16+500 del tramo en estudio.



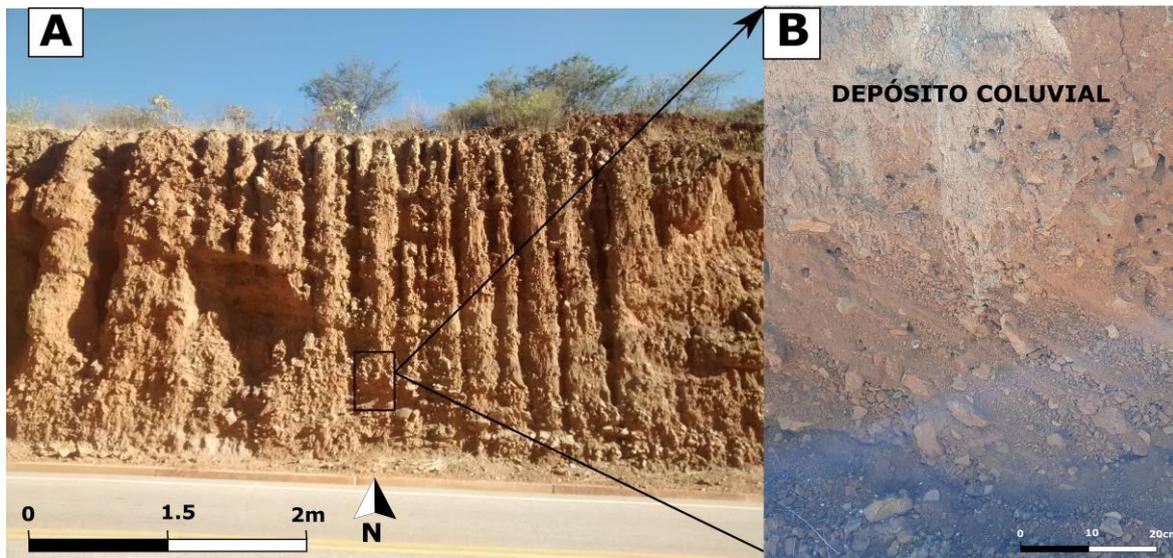
Fotografía 7. Areniscas intercaladas con arcillolitas de la Formación Carhuaz (Ki-ca) en las coordenadas E: 817969, N: 9179126, Cota: 2533 m.s.n.m.

3.8.2 Depósitos Cuaternarios

El tramo de estudio está constituido por depósitos cuaternarios aluviales, fluvio-aluviales y coluvio-aluvial. Los depósitos aluviales están cubriendo a los macizos en trayecto de la carretera, presentan acumulación de fragmentos rocosos angulosos y subangulosos, de diferentes tamaños (gravas, cantos y bloques), matriz soportada areno- limosa producto de erosión de materiales rocosos.



Fotografía 8. Depósitos cuaternarios en las coordenadas E: 817944, N: 9179042, Cota: 2519 m.s.n.m; **A:** Se observa Depósito Fluvio-Aluvial y Coluvio-Aluvial de matriz soportada.

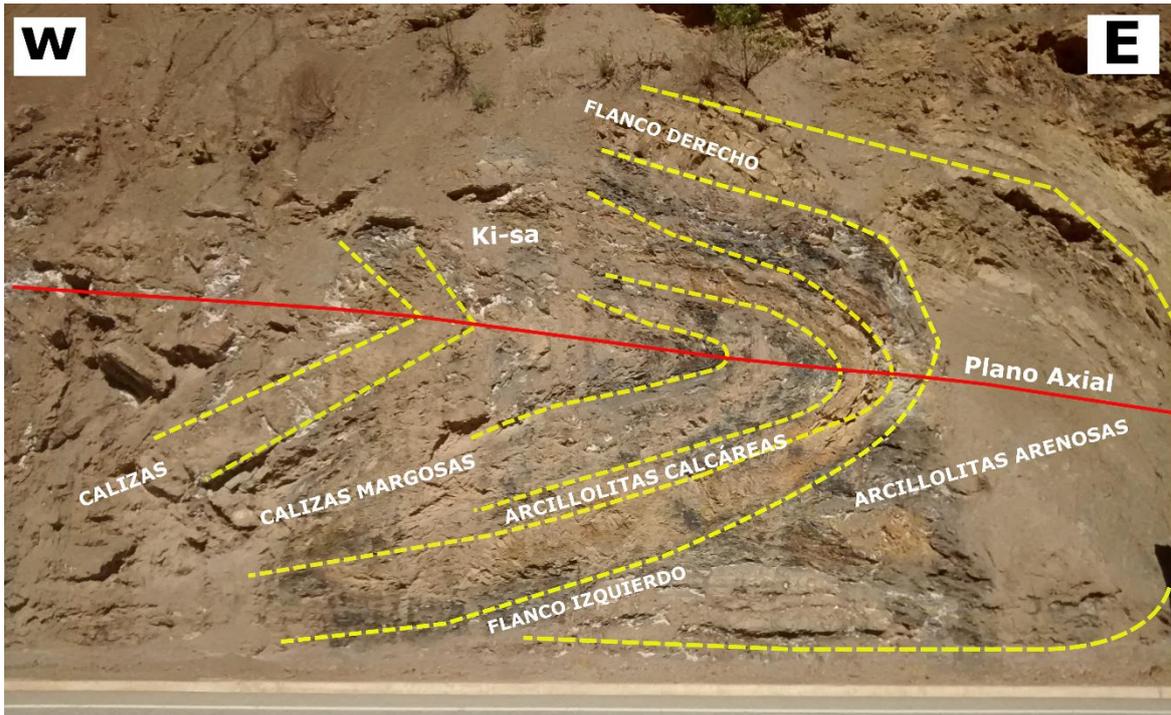


Fotografía 9. Depósitos cuaternarios en las coordenadas E: 818050, N: 9178564 Cota: 2462 m.s.n.m

Los depósitos fluvio-aluviales y fluviales se ubican en márgenes de la quebrada km 19 +500 – 20+000 y presentan material de fragmentos redondeados a sub-redondeados como bloques, gravas, arenas, limos y arcillas producto de la erosión y transporte.

3.8.3 Plegamientos

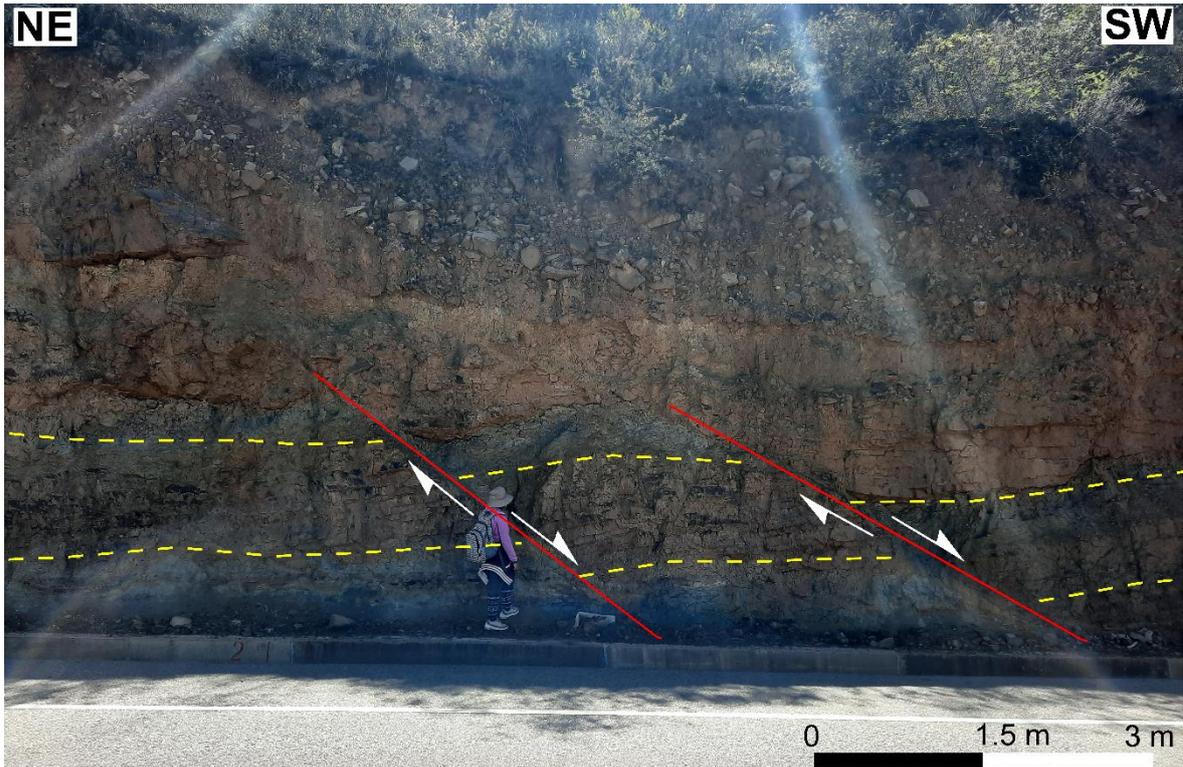
El área de investigación comprende eventos tectónicos de compresión que ocupa el sector oriental. Las estructuras principales es el pliegue de rumbo SO-NE que corresponde una fase tectónica principal que pliega con dirección predominante NO-SE la secuencia cretácica. La deformación se produjo en la Formación Santa Ki-sa compuesta por calizas, calizas margosas, arcillolitas calcáreas, las medidas de los flancos son 30/195, 25/14 de Dip y Dip Direction respectivamente.



Fotografía 10. Pliegue volcado en la Formación Santa Km 18+ 200. vista de los flancos derecho e izquierdo conjuntamente con su plano axial.

3.8.4 Fallas

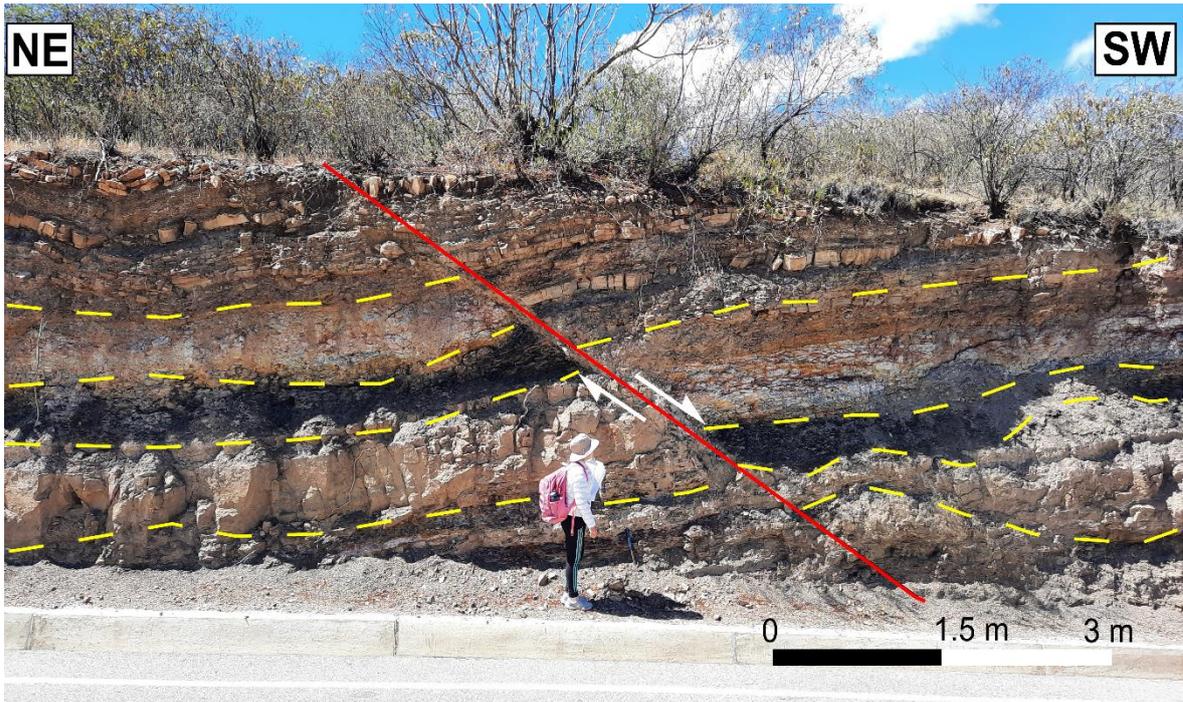
En el área de investigación se evidencia gran cantidad de fallas normales, cuando las rocas superan el límite de deformación plástica, estas tienden a fracturarse al ser sometidos a determinados esfuerzos y tienen un desplazamiento apreciable.



Fotografía 11. Fallas normales en la Formación Carhuaz DIP DIRECTION₁: 275° DIP₁: 20°, DIP DIRECTION₂: 295° DIP₂: 32°, Coordenadas: E 817948, N 9178850; Cota: 2509 m.s.n.m.



Fotografía 12. Conjunto de fallas normales en la Formación Carhuaz DIP DIRECTION₁: 190° DIP₁: 41°, DIP DIRECTION₂: 195° DIP₂: 48°, DIP DIRECTION₃: 194° DIP₃: 52° Coordenadas: E:818053, N: 9178707; Cota: 2488 m.s.n.m.



Fotografía 13. Falla normal en la Formación Santa DIP DIRECTION: 193° DIP: 44°
 Coordenadas: E: 818119, N:9178293; Cota: 2443 m.s.n.m.



Fotografía 14. Falla normal en la Formación Carhuaz DIP DIRECTION: 195° DIP: 58°
 Coordenadas: E: 817865, N:9178966; Cota: 2443 m.s.n.m.



Fotografía 15. Falla normal en la Formación Carhuaz DIP DIRECTION: 225° DIP: 62°
 Coordenadas: E: 817969, N: 9179130; Cota: 2533 m.s.n.m.

3.9 GEOTECNIA

La caracterización geotécnica carretera entre las progresivas 14+000 – 20+000 Km, San Marcos – Cajabamba, se ha sectorizado por estaciones de puntos críticos (EG-SM-C), se inició las investigaciones con el cartografiado de las unidades litológicas, luego un registro general de los taludes en todo el tramo de carretera; cuyo fin es conocer el macizo rocoso y el estado de las discontinuidades que los constituyen, así como, los indicios que lleven a considerarlos como inestables. Para luego definir el comportamiento geológico – geomecánico, mediante la Valoración del Macizo Rocosó (RMR) Bieniawski 1989; Índice de Calidad de la Roca (RQD) e Índice de Resistencia Geológica (GSI) según Hoek. Parte de las condiciones de inestabilidad en taludes, también es obtenida mediante el método analítico para ello se realizó proyecciones estereográficas (Dips.v.7.0), utilizando la falsilla de Schmidt, con las familias de discontinuidades del macizo rocoso propensas a producir las fallas del tipo planar y cuña. Para luego calcular el Factor de seguridad (FS) de los taludes mediante el método de equilibrio límite (Slide.v.6.0); utilizando los criterios de rotura de Morh-Coulumb y Hoek & Brown.

Los parámetros de resistencia se procesaron en el Software RocData v4.0, determinando cuantitativamente; cuyos valores fueron ingresados a los métodos de equilibrio límite a fin de obtener el factor de seguridad (mediante Software Slide v6.0), que define de manera numérica la inestabilidad de los taludes en el tramo de investigación.

Para definir los estados críticos de los taludes se ha utilizado el cálculo de FS en condiciones de tensiones totales y condiciones efectivas más sismicidad; debido a que la zona de investigación presenta una etapa de lluvia bastante importante entre los meses de octubre y abril con promedios de 315.4 mm precipitación como se indica en la tabla 12, así mismo encontramos que el área de investigación corresponde a la zona sísmica 3 (Figura 11), con aceleración sísmica máxima de 0.35.

Para realizar el cálculo de coeficiente de aceleración máxima horizontal y vertical (Kh) (Kv) respectivamente, se realizó con el Software LoadCap, obteniendo Kh=0.175 y Kv= 0.088 como se muestra en la Figura 12.

Tabla 13. Tabla de precipitaciones mensuales – Años 2018-2022.

PRECIPITACIONES (mm/año) PARA EL PERIODO 2018-2022						PROMEDIO MENSUAL
MESES/AÑO	2018	2019	2020	2021	2022	
ENERO	70.1	0.4	29.4	121.4	58	55.86
FEBRERO	27.9	84.9	29	13.9	117.8	54.7
MARZO	34	320.2	38.6	101.5	198	138.46
ABRIL	46.7	39.7	1.7	8	61.8	31.58
MAYO	0.4	0	0	8.5	0.1	1.8
JUNIO	0	0	0	2.6	0	0.52
JULIO	0	0	7.4	0	0	1.48
AGOSTO	0	0	0	0	0	0
SETIEMBRE	22.9	0	0	0.1	0.6	4.72
OCTUBRE	33.1	22	0	31.2	2.2	17.7
NOVIEMBRE	123.3	64.3	0.5	92.4	0	56.1
DICIEMBRE	66.5	153.1	120.3	84.7	11.2	87.16
PROMEDIO ANUAL	35.4	57.05	18.9	38.69	37.48	

Fuente: SENAMHI / DRD. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

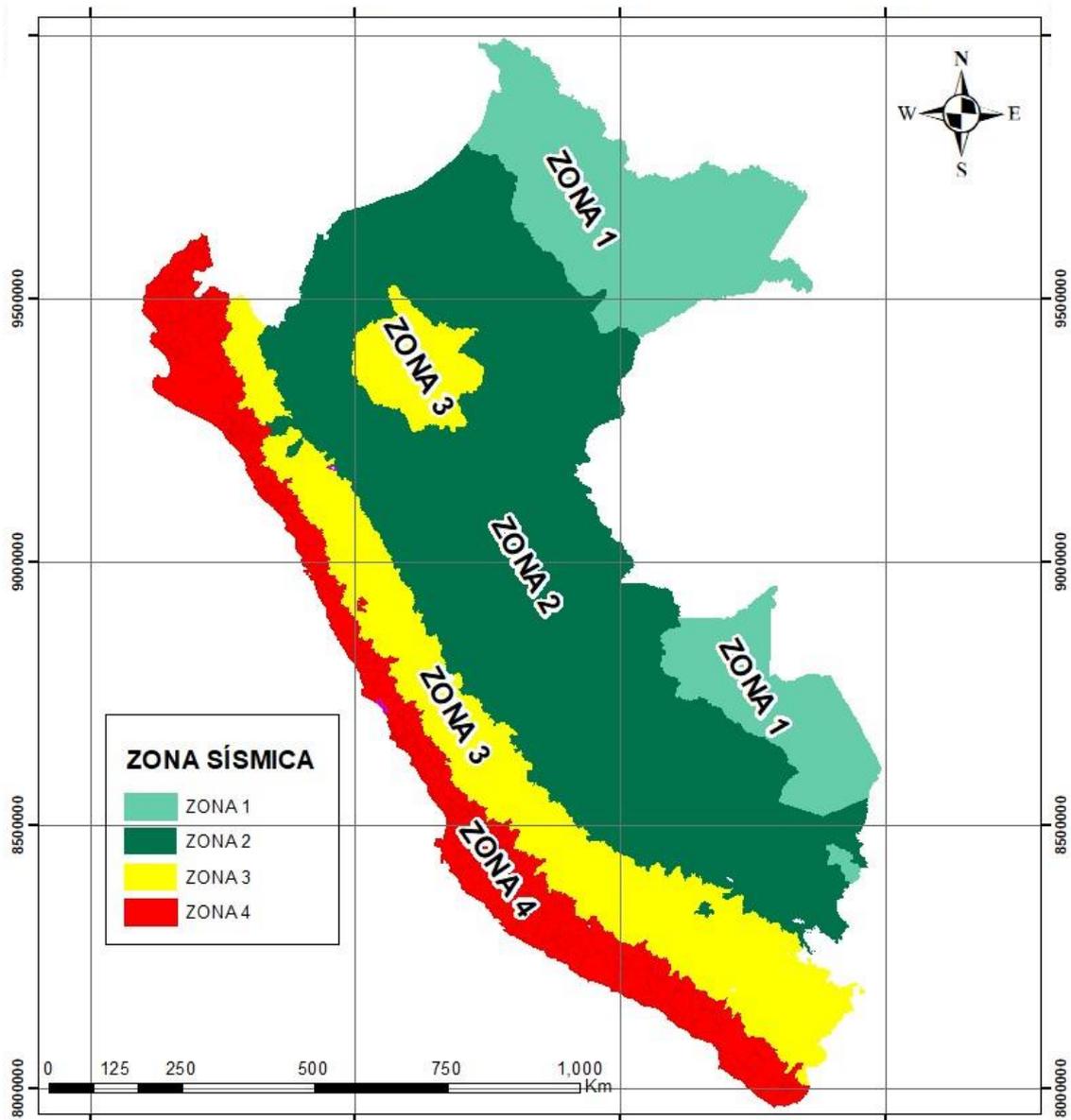


Figura 12. Zonas sísmicas del territorio peruano y vista de zona de investigación (Zona 3) con un factor de 0.35.

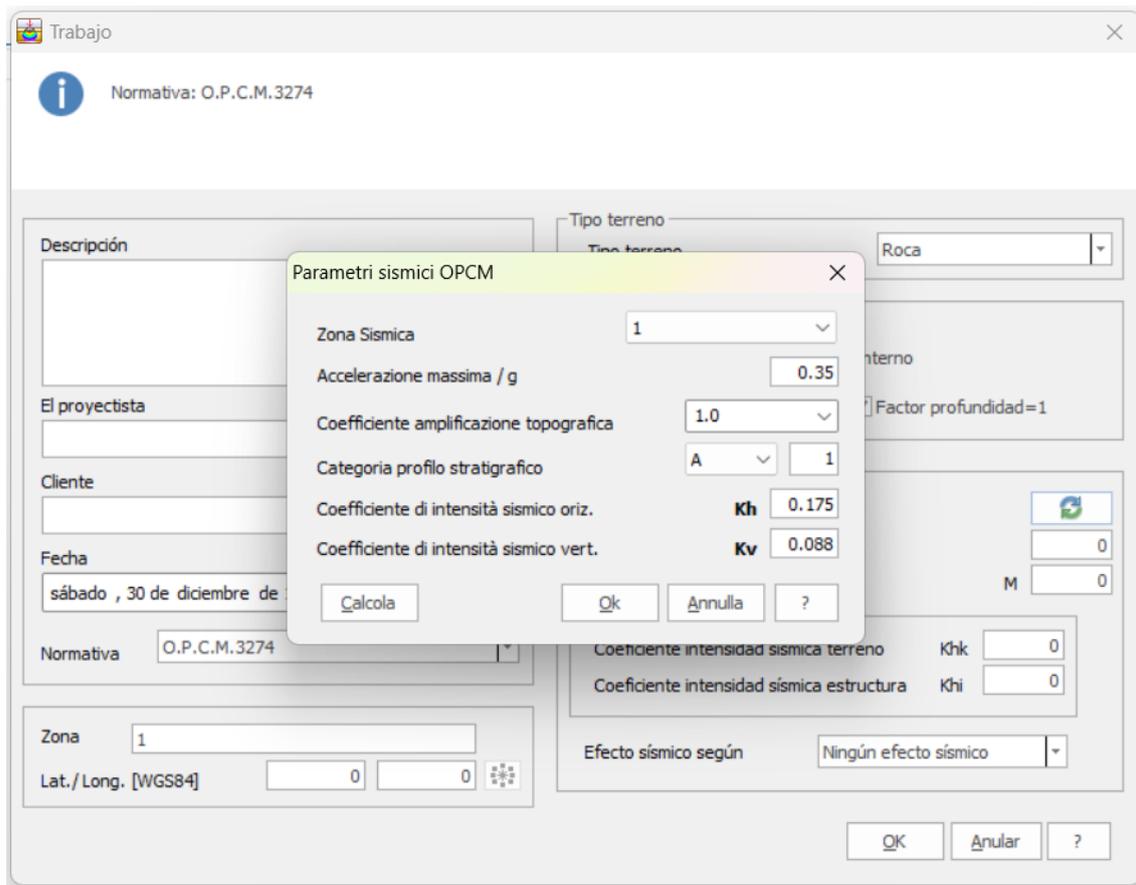


Figura 13. Cálculo de la aceleración sísmica horizontal ($K_h=0.175$) y vertical ($K_v=0.088$) con el Software LoadCap, según la Normativa O.P.C.M.3274.

3.9.1 Estación geotécnica EG-SM-C 01

El talud se encuentra en la progresiva 14+860 km de la carretera San Marcos- Cajabamba, está conformado por areniscas y arcillolitas de la Formación Carhuaz (Ki-ca). El macizo rocoso tiene un grado de meteorización y fracturamiento alto, posee 3 familias de discontinuidades, se registró un total de 142 discontinuidades en 8.20 m lineales. El talud tiene un ángulo de 52° y una altura de 12.38 m. Las familias de diaclasas presentan fallas tipo planar a favor del talud. (ver Fotografía 16).

				GEOMETRÍA DEL TALUD	
				ALTURA	12.379 m.
				PIE	8 m.
				DIP	52°
				CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO	
				METEORIZACION	Alta
				GRADO DE FRACTURAMIENTO	
				RQD	48
				GSI	
				GSI	44
				N° DISCONTINUIDADES	142
				LONGITUD	8.20 m.
ESTE	NORTE	COTA	LITOLOGIA/FORMACIÓN		
817933	9179017	2519	ARENISCAS-ARCILLOLITAS/ FM CARHUAZ		

Fotografía 16. Estación EG-SM-C 01 areniscas rojizas intercaladas con arcillolitas grises de la Formación Carhuaz (Ki- Ca), en la progresiva 14 + 860 Km de la carretera San Marcos- Cajabamba.

➤ **Cálculo de Rock Quality Designation (RQD)**

Tabla 14. Cálculo de RQD en función de número de discontinuidades (ND) y metros lineales (L).

$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$				CÁLCULO DEL RQD	
ND	L(m)	λ	RQD		
142	8.20	17.317	48.35		

➤ **Cálculo de Geological Strength Index (GSI)**

Tabla 15. Estimación del GSI en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI 1989).

ESTIMACIÓN DEL GSI					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$ CÁLCULO DEL RQD					
ND	L(m)				RQD
142	8.20		17.317		48.35
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI 1989					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	JCOND89
6	1	3	2	1	13
$GSI=1.5JCOND89 + RQD/2$					44
GSI					44

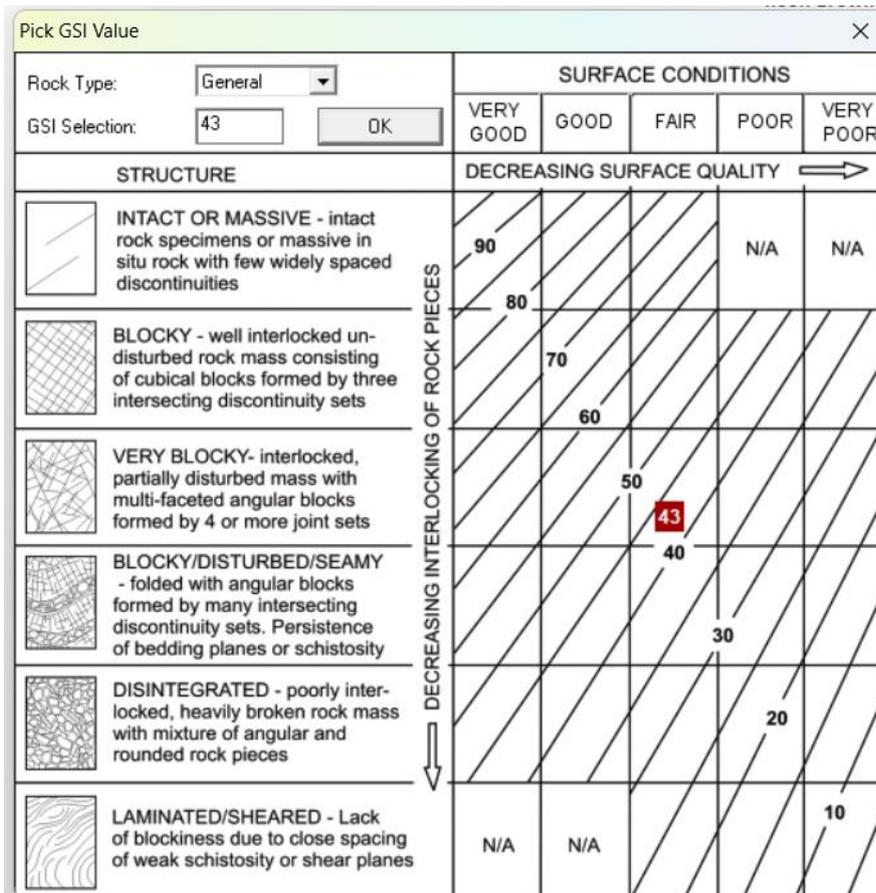


Figura 14. GSI=43 de la estación EG-SM-C 01, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0

Analysis of Rock Strength using RocData EG-SM-C 01

Hoek-Brown Classification

intact uniaxial compressive strength = 50 MPa
 GSI = 43 $m_i = 13$ Disturbance factor = 1

Hoek-Brown Criterion

$m_b = 0.222$ $s = 0.0001$ $a = 0.509$

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.109 MPa friction angle = 44.41 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.017 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.396 MPa
 global strength = 2.984 MPa
 modulus of deformation = 2362.95 MPa

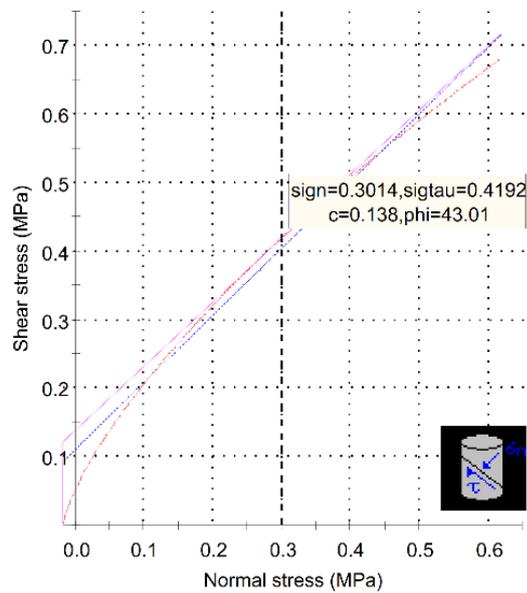
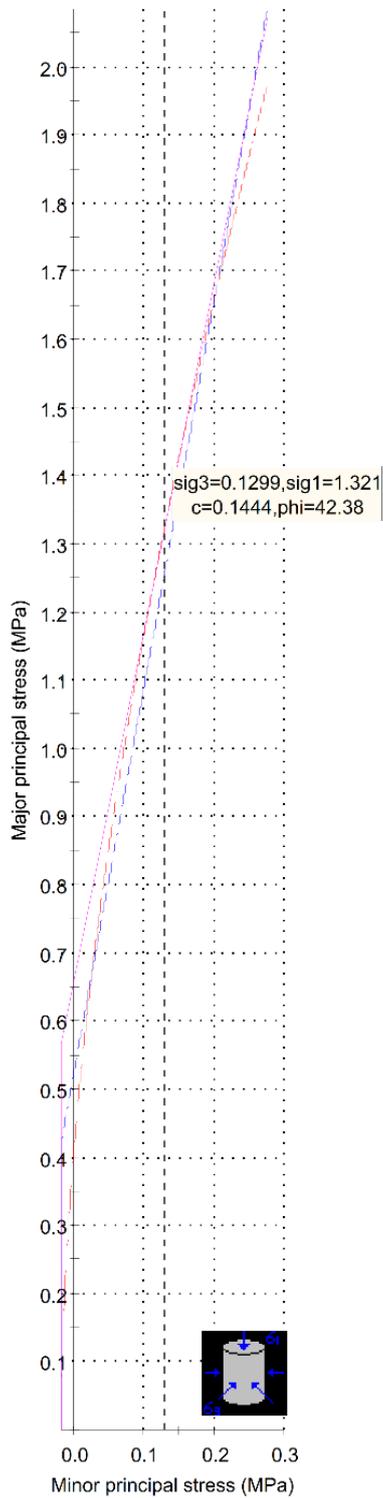
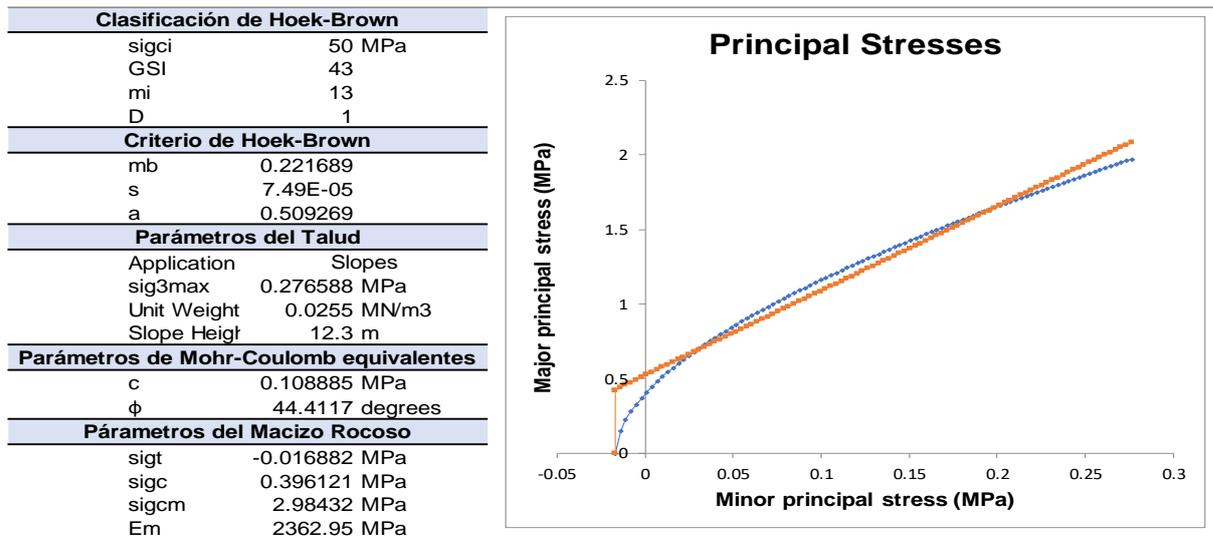


Figura 15. Análisis de la resistencia del macizo rocoso utilizando RocData y Graficas de esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (Izquierda) y esfuerzo normal – esfuerzo de Corte (derecha) de las areniscas de la Fm. Carhuaz para cálculo de cohesión y ángulo de fricción.

Tabla 16. Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 01.



➤ **Cálculo de RMR₈₉**

Tabla 17. Valor de RMR₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 01.

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES					
1	Resistencia de Roca intacta	Ensayo carga puntual	>10 MPa	4 –10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Compresión simple (MPa)
		Compresión simple	>250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5 – 25 MPa 1 – 5 MPa < 1 MPa
	VALOR		15	12	7	4	2
2	RQD		90 – 100 %	75 – 90 %	50 – 75 %	25 – 50%	< 25%
	VALOR		20	17	12	8	3
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0.6 – 2 m	0.2 – 0.6 m	0.6 – 0.2 m	< 0.06m
	VALOR		20	15	10	8	5
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m
		VALOR	6	4	2	1	0
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1 – 1.0mm	1 – 5 mm	> 5 mm
		VALOR	6	5	4	1	0
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
		VALOR	6	5	3	1	0
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm
		VALOR	6	4	2	2	0
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	descompuesta
		VALOR	6	5	3	1	0
	VALOR	30	23	13	6	0	
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación presión agua/tensión principal mayor	0	0 – 0.1	0.1 - 0.2	0.2 – 0.5	>0.5
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo
	VALOR	15	10	7	4	0	
VALOR TOTAL RMR			42				

Fuente: Clasificación geomecánica RMR₈₉. Bieniawski, (1989).

La calidad de macizo rocoso en función al RMR_{89} es de 42, Clase III de calidad regular ver tabla 18.

Tabla 18. Valor de RMR_{89} para Macizo

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

Fuente: Bieniawski, (1989).

➤ ***Análisis Cinemático y Estereográfico DIPS.***

A continuación, se realizará el análisis cinemático y estereográfico DIPS en tipo planar y tipo cuña de la ESTACIÓN N°01,

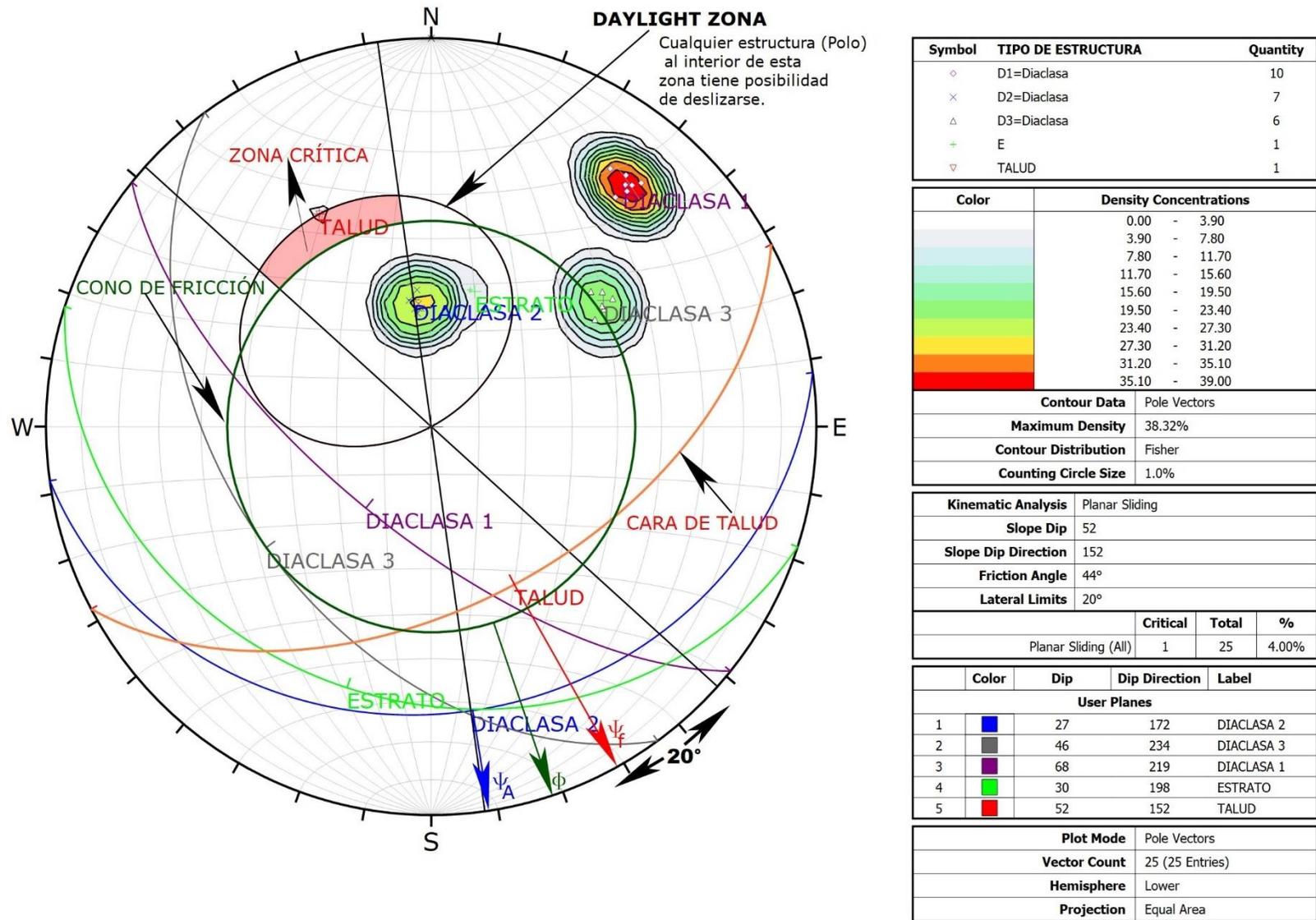


Figura 16. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 01, indicando una probabilidad de falla de 4.00 %.

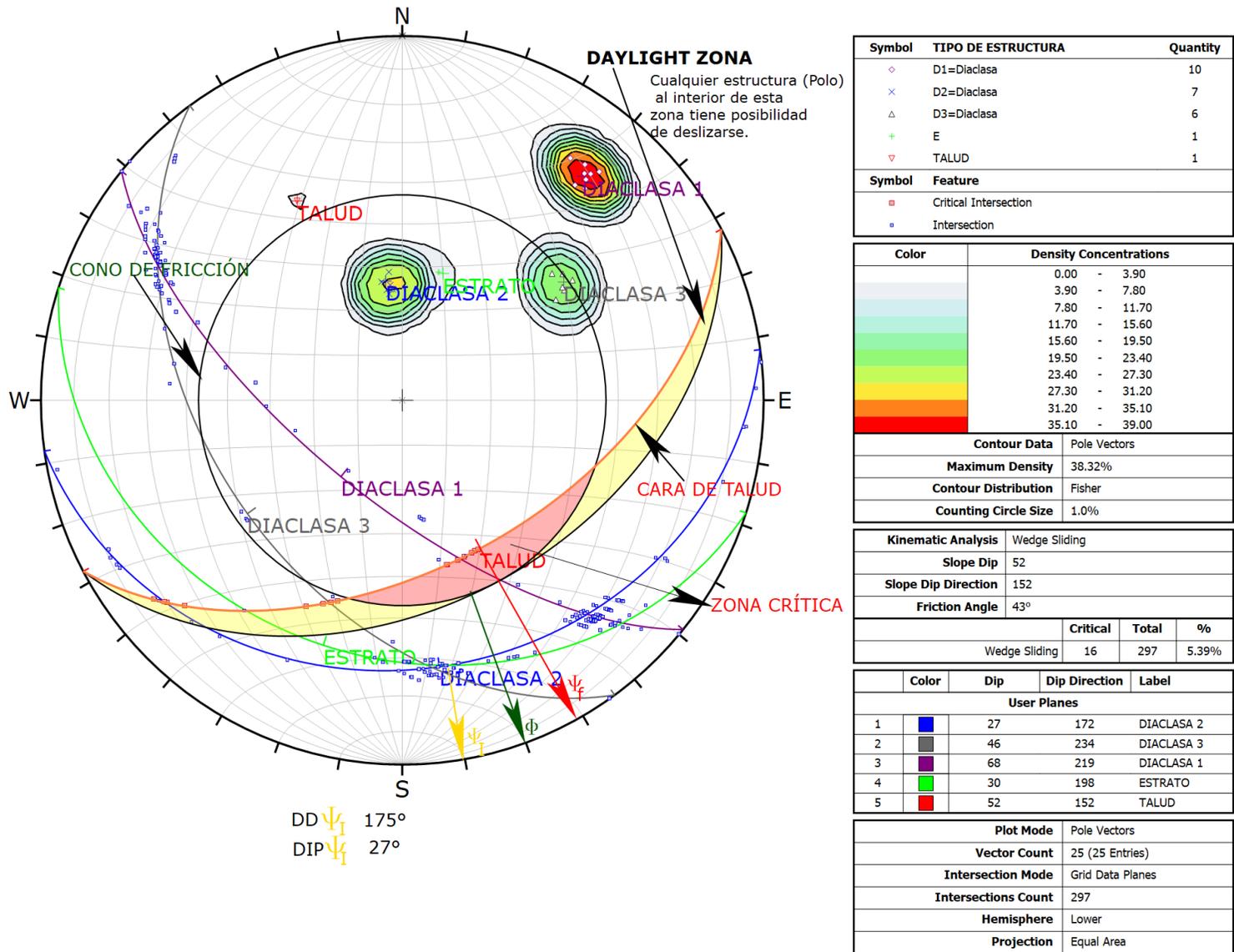


Figura 17. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud en el talud de la estación EG-SM-C 01, indicando una probabilidad de falla de 5.39 %.

Análisis y cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide v7.0

Se empleó cuatro métodos de análisis Bishop Simplificado, Jambu Simplificado, Spencer y GLE/ Morgenstern Price. En cuanto a la superficie de análisis fueron no circulares por tratarse de roca. La figura 18 muestra las dimensiones y propiedades del talud EG-SM-C 01.

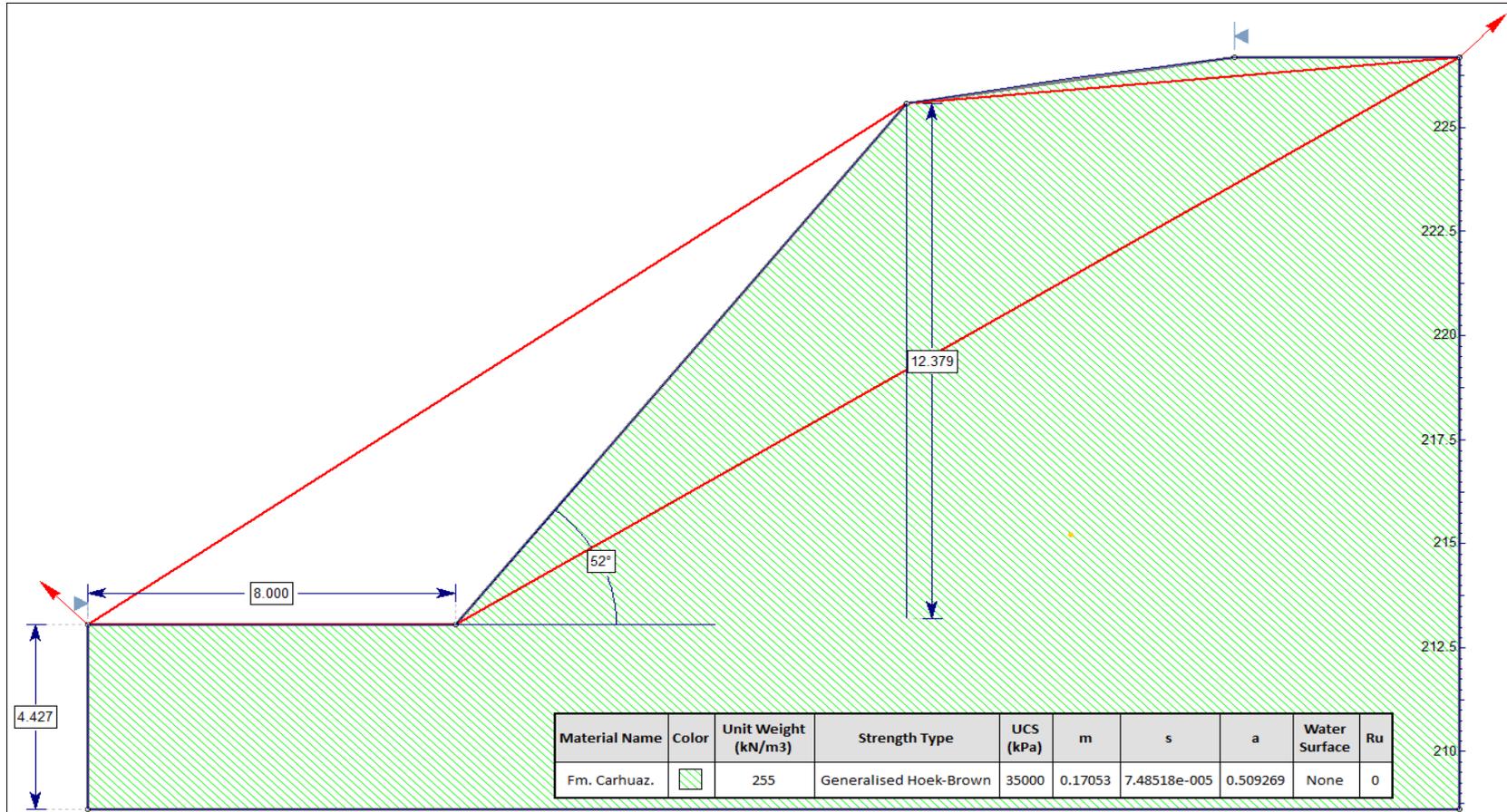


Figura 18. Estación EG-SM-C 01, dimensiones y propiedades del talud.

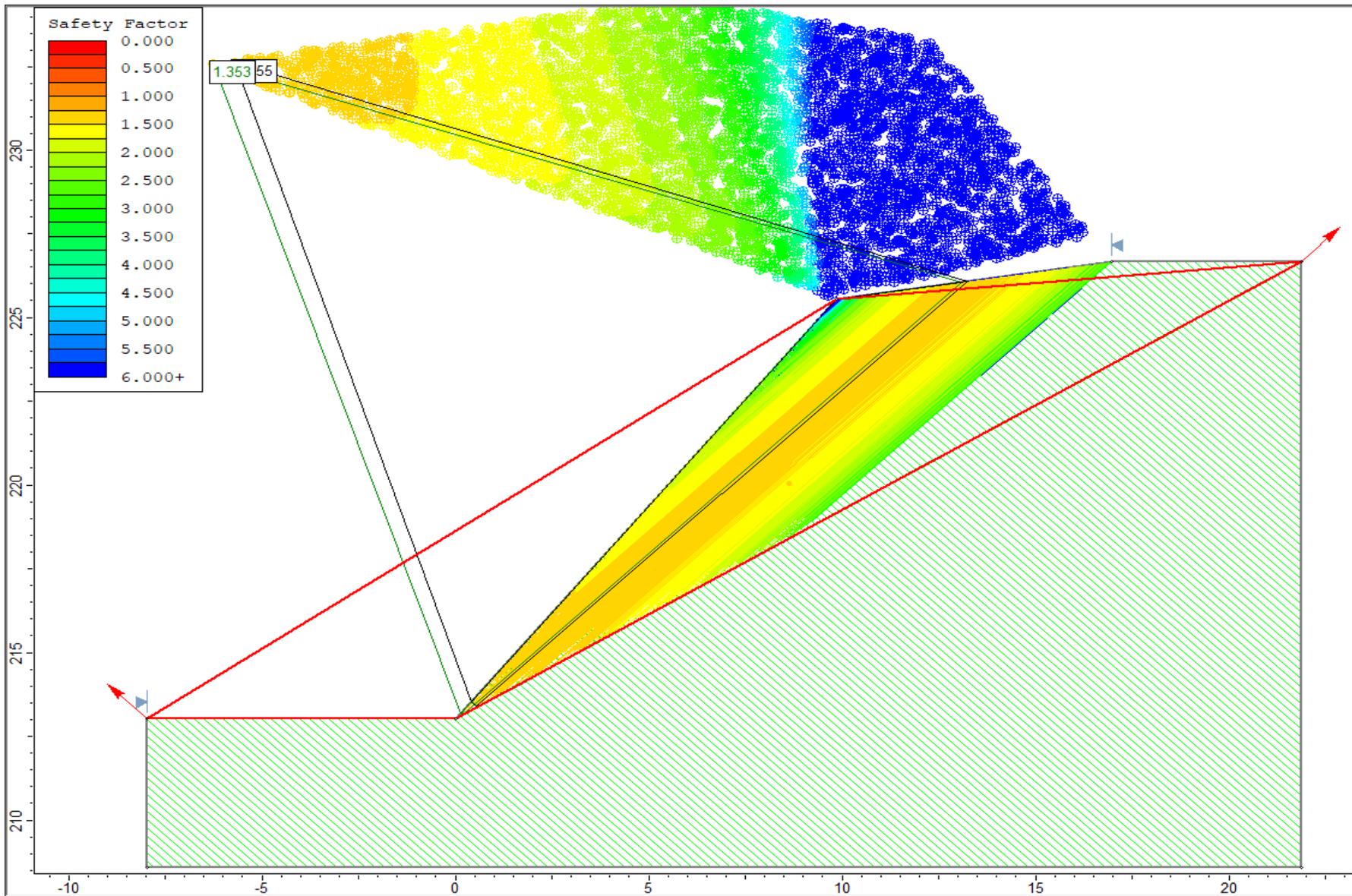


Figura 19. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.353) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

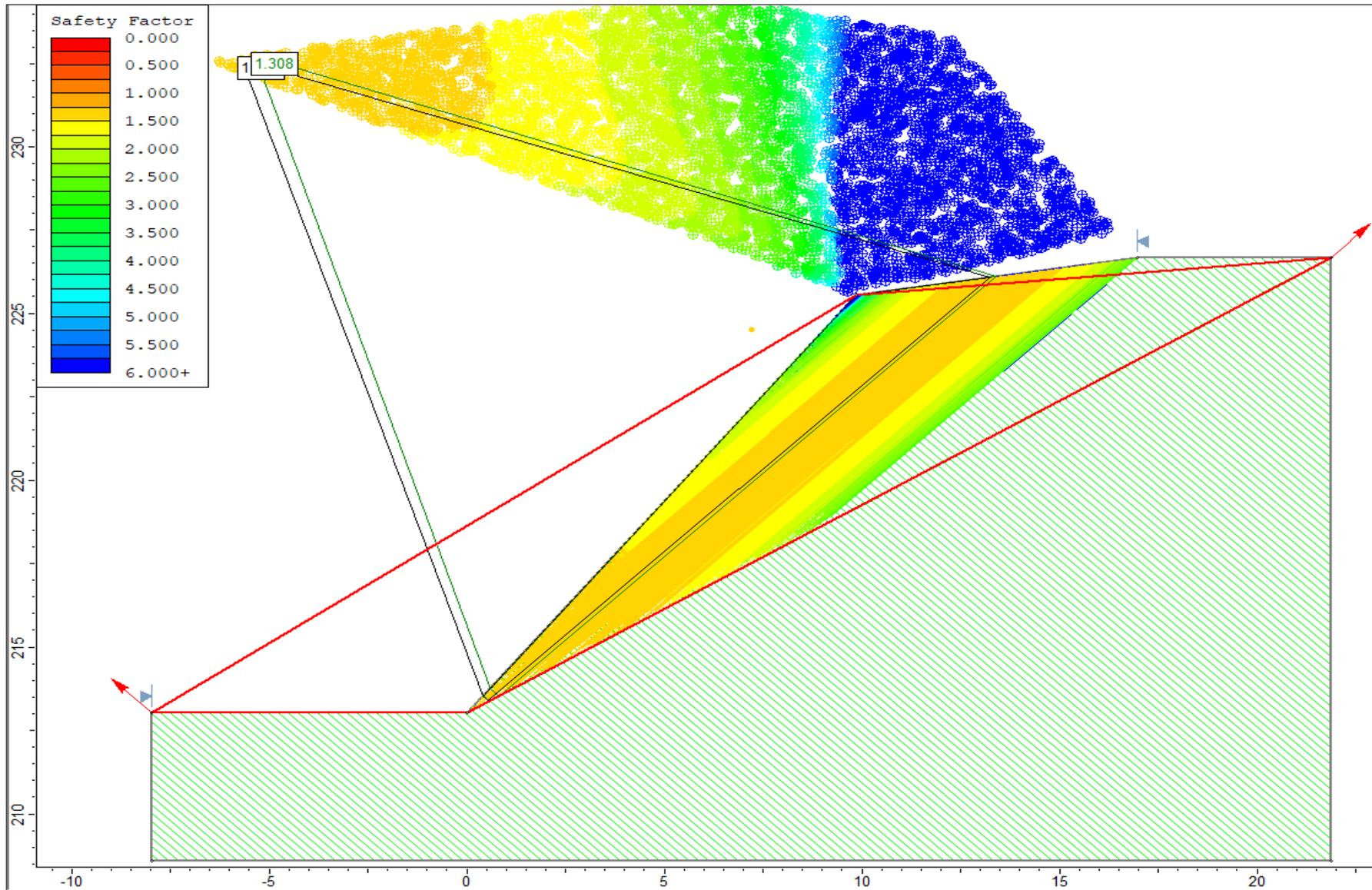


Figura 20. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.308) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

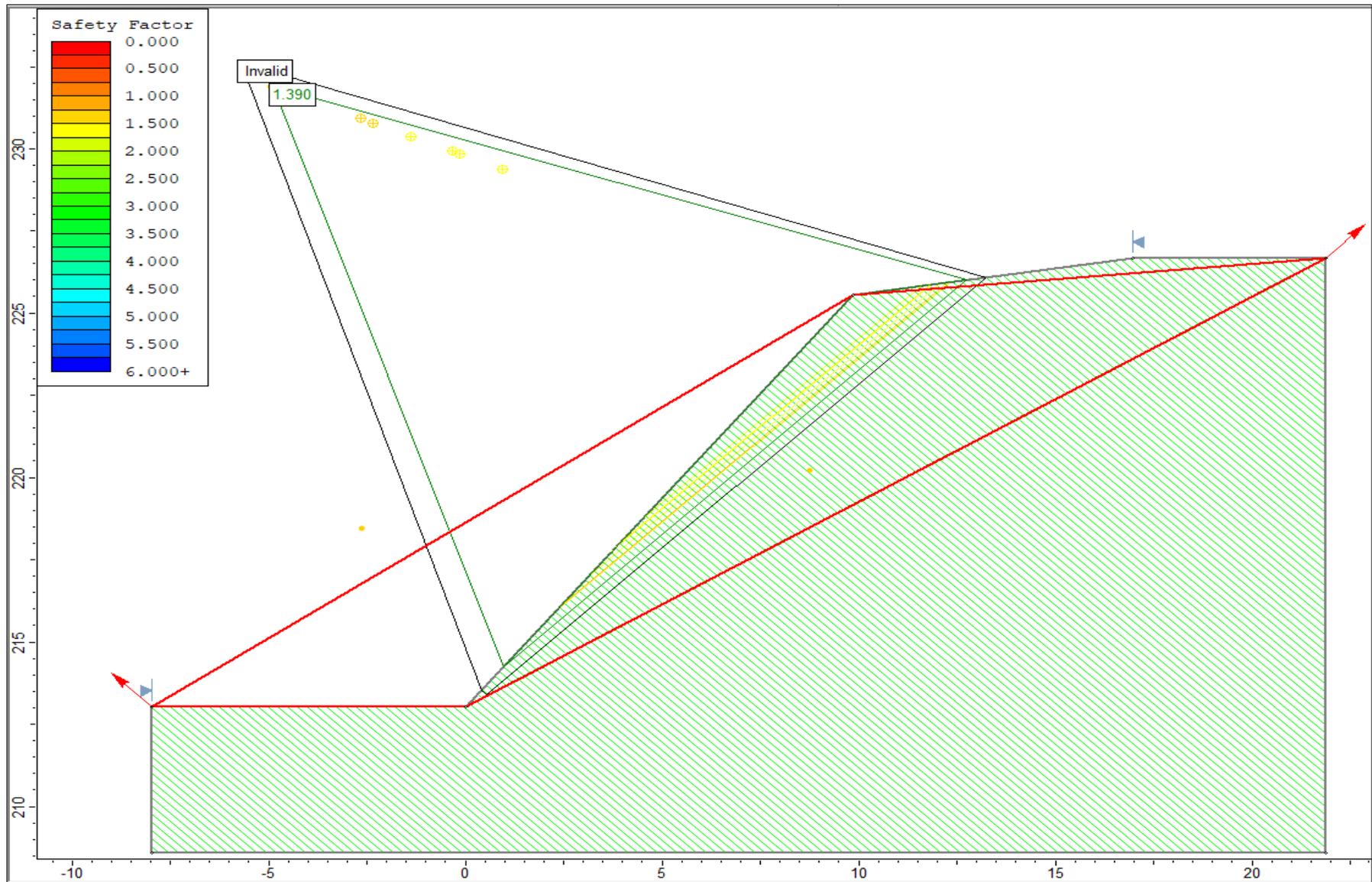


Figura 21. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.390) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.

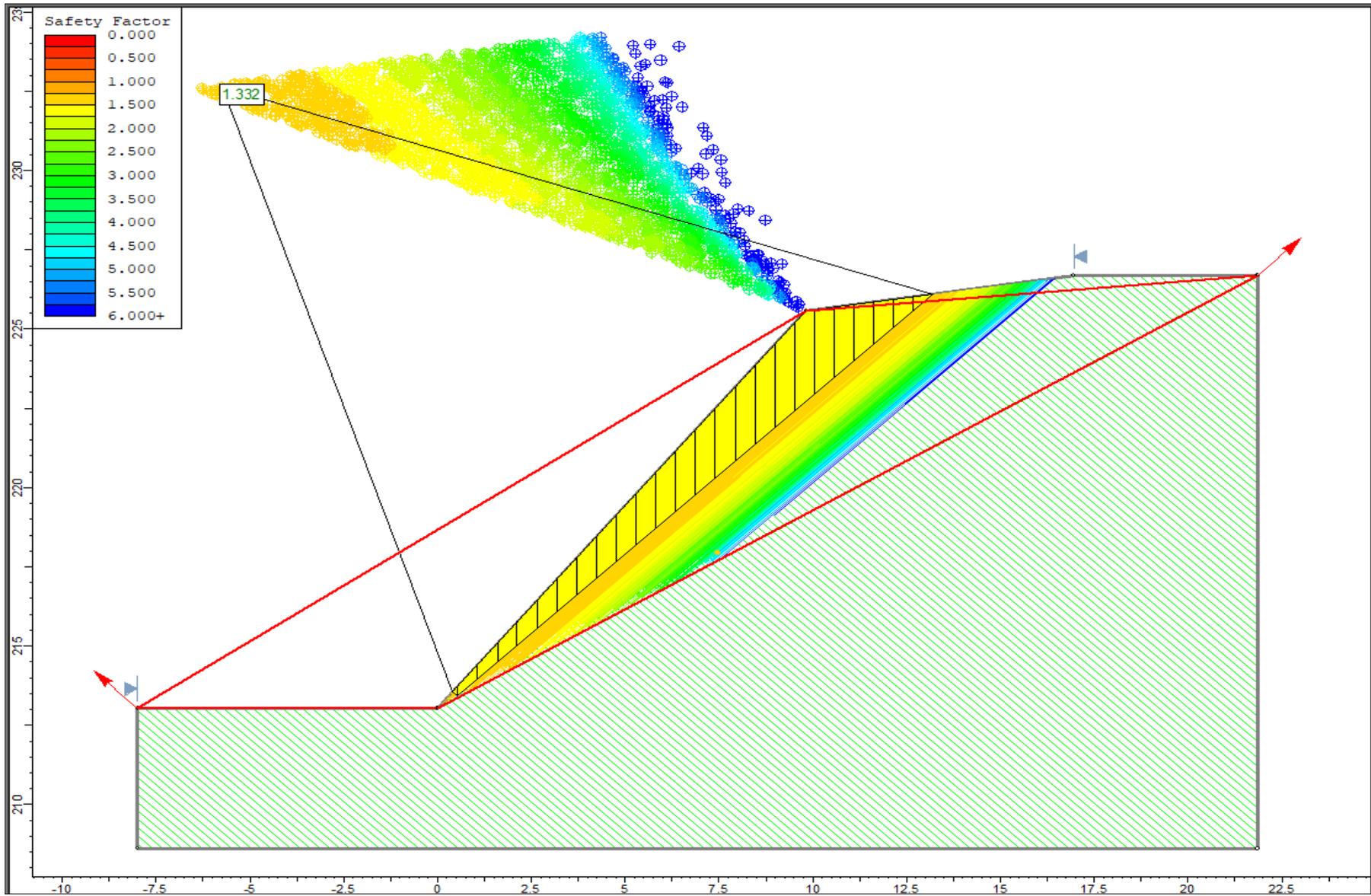


Figura 22. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.332) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Totales.

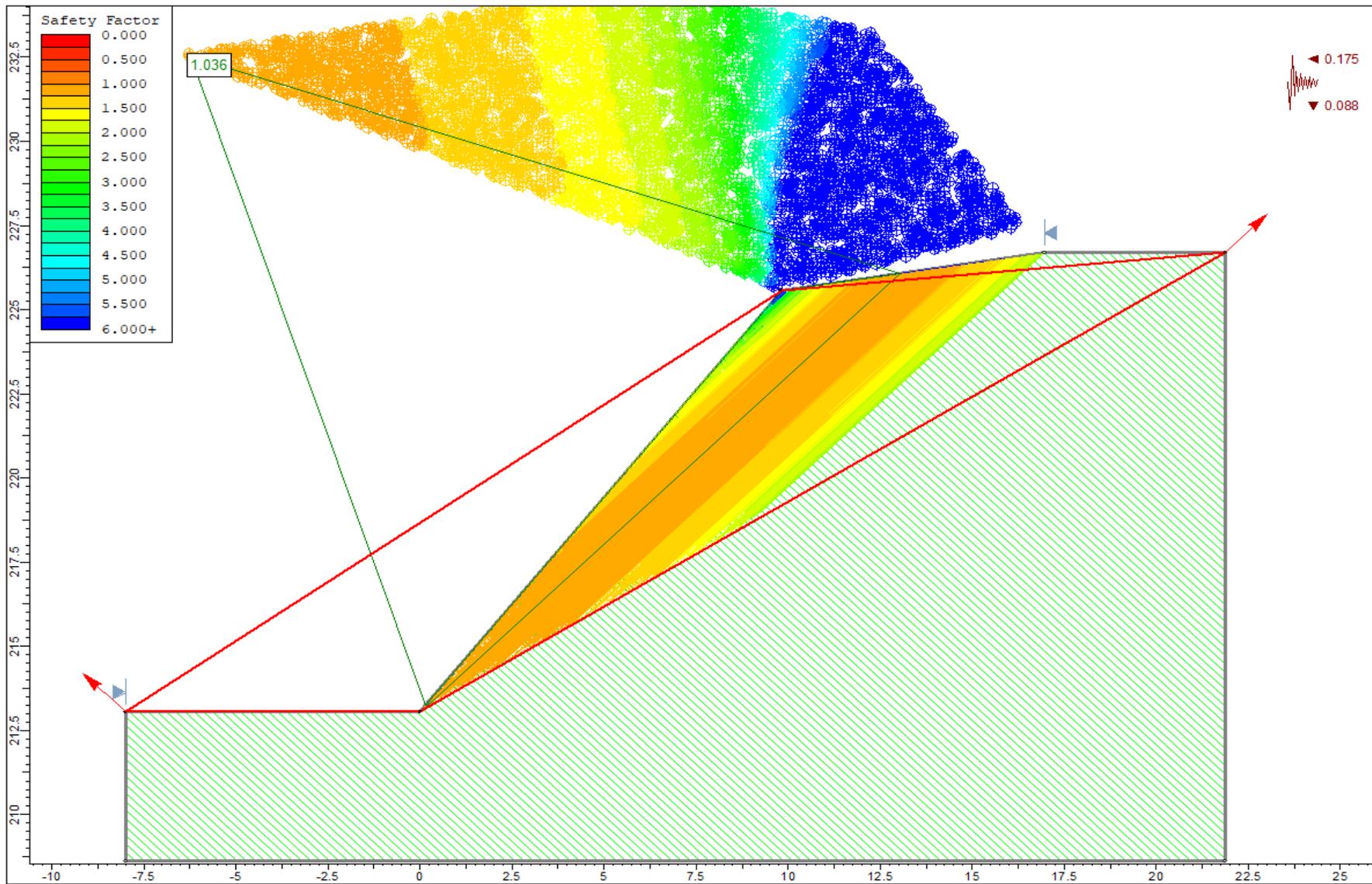


Figura 23. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.036) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

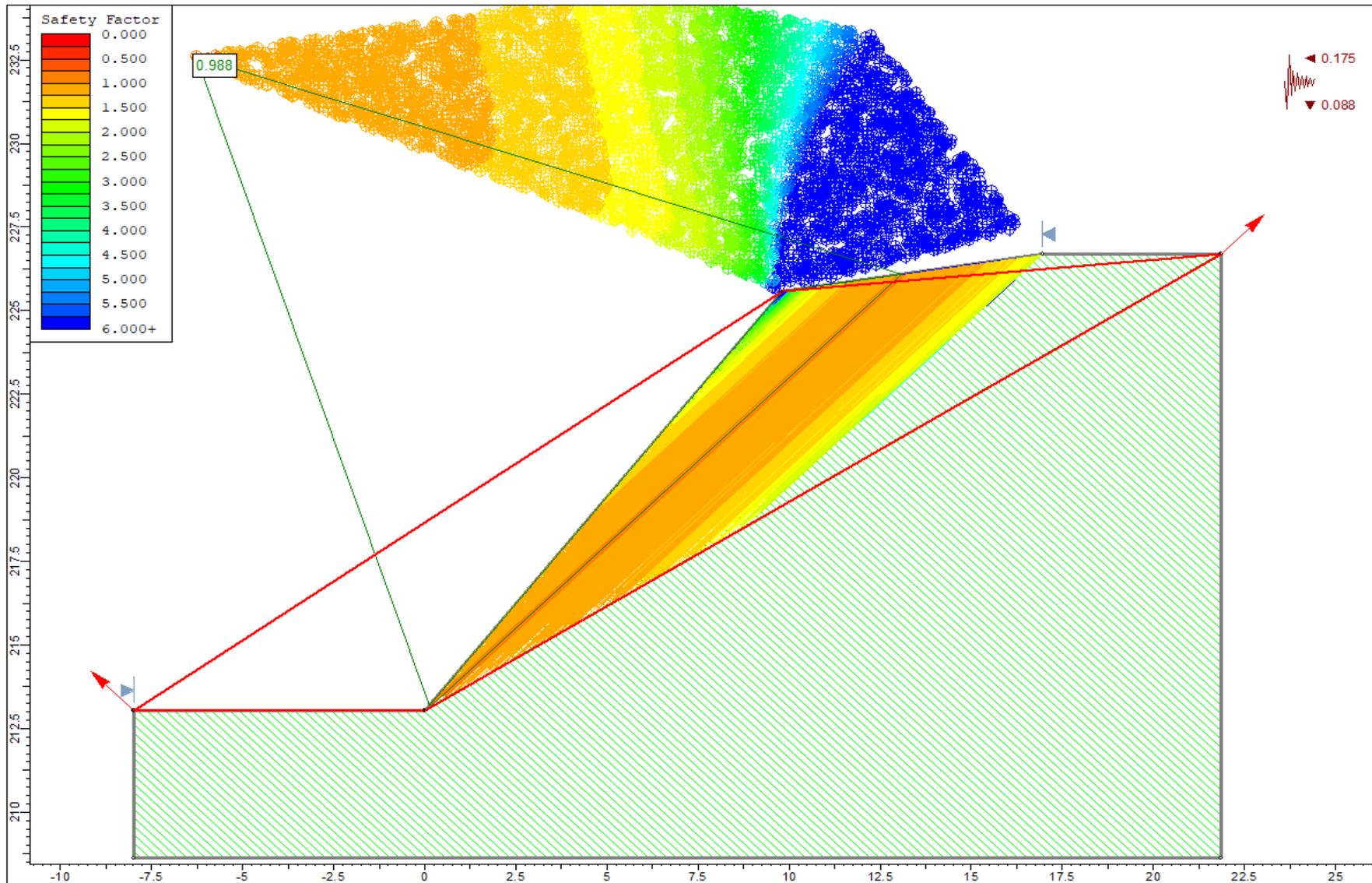


Figura 24. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (0.988) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

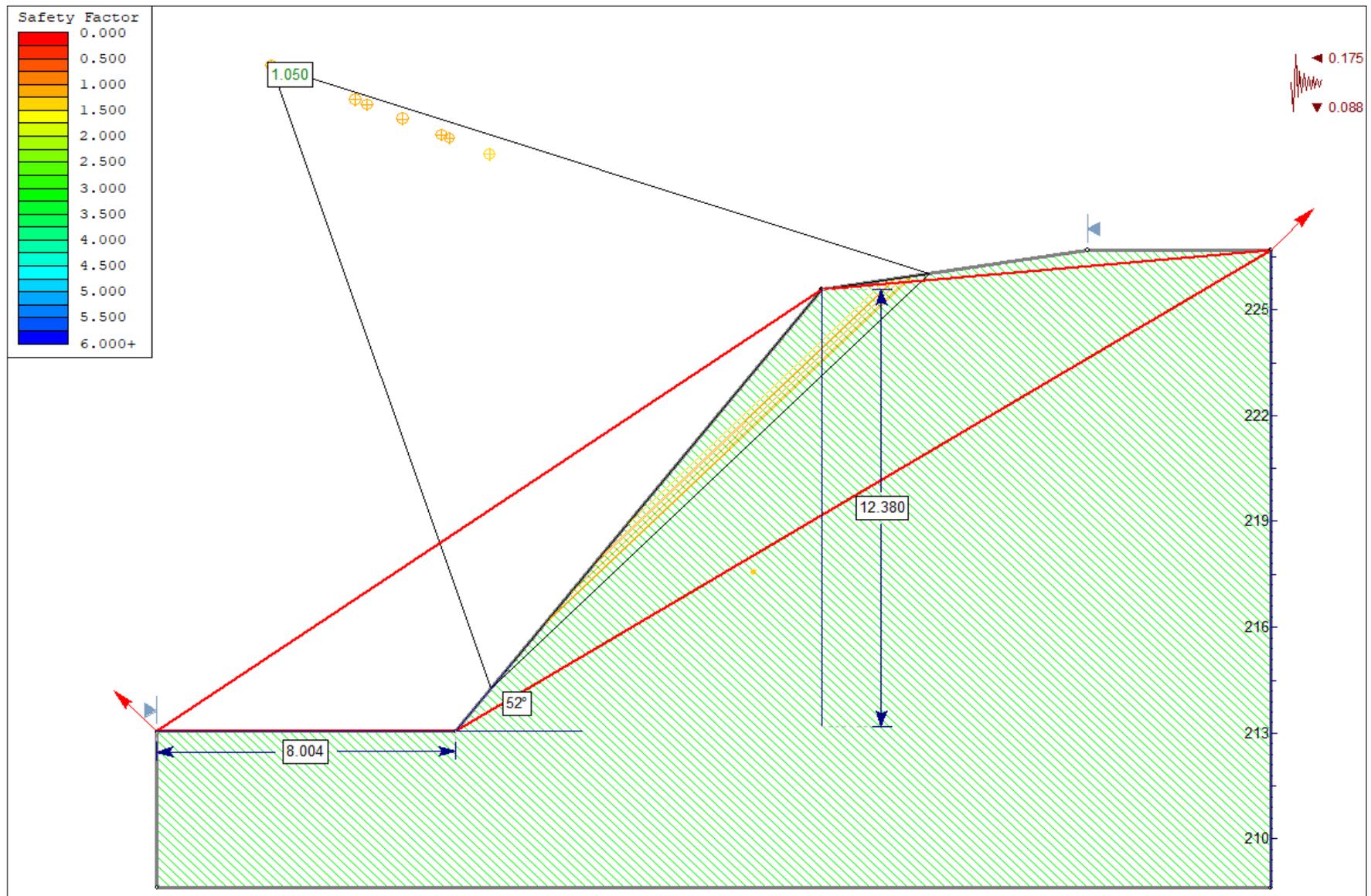


Figura 25. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.050) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

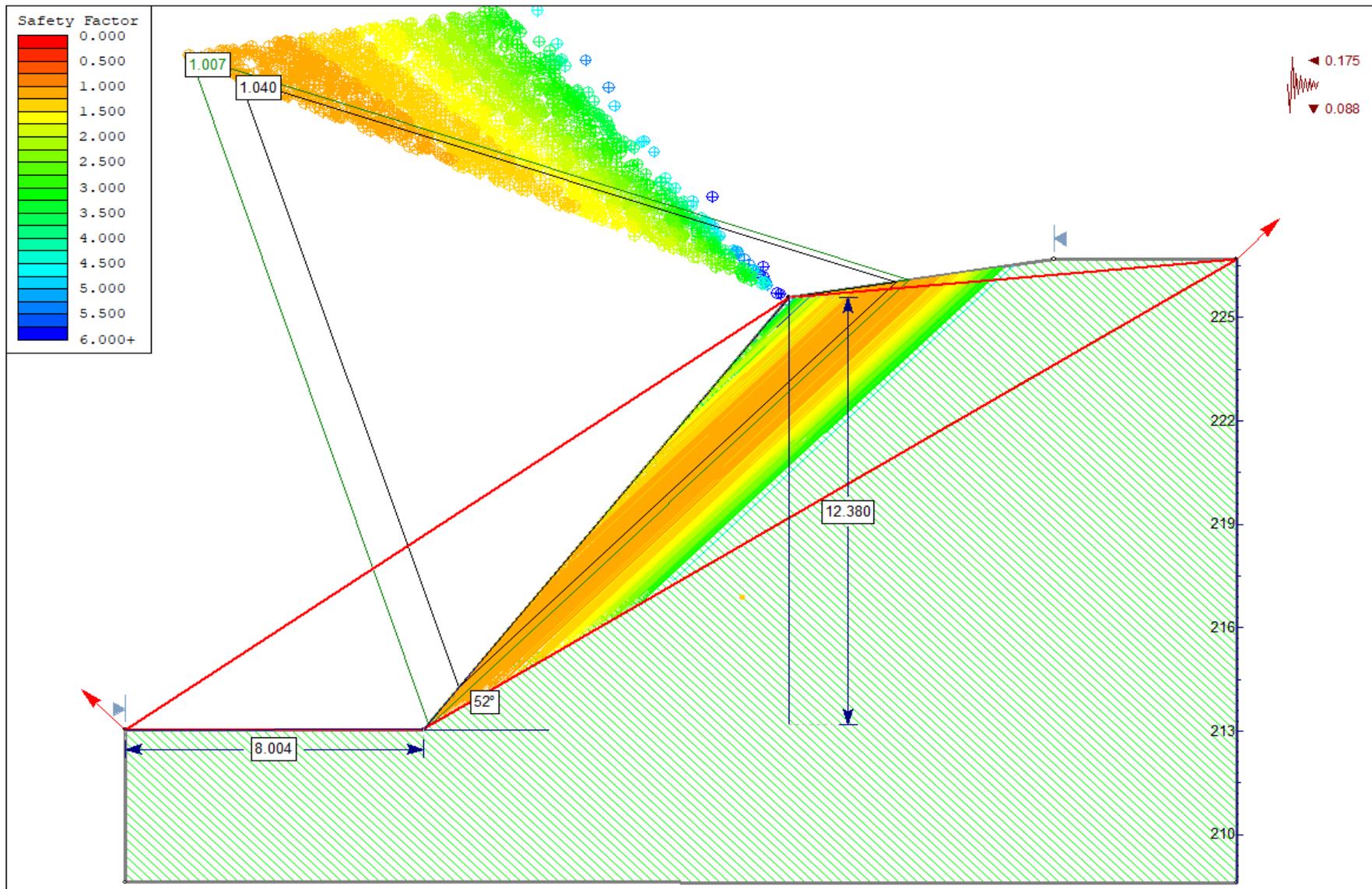


Figura 26. Estación EG-SM-C 01, Factor de Seguridad (1.007) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

3.9.2 Estación geotécnica EG-SM-C 02

El talud se encuentra en la progresiva 15+260 km de la carretera San Marcos-Cajabamba, está conformado por areniscas y arcillolitas de la Formación Carhuaz (Ki-Ca). El macizo rocoso tiene un grado de meteorización alto y fracturamiento medio, posee 3 familias de discontinuidades, se registró un total de 290 discontinuidades en 17.70 m lineales. El talud tiene un ángulo de 55° y una altura de 12.38 m. Las familias de diaclasas presentan fallas tipo planar a favor del talud. (ver Fotografía 17).

				GEOMETRÍA DEL TALUD	
				ALTURA	14.8
				PIE	8 m.
				DIP	55
				DD	351
				CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO	
				METEORIZACIÓN	alta
				GRADO DE FRACTURAMIENTO	Medio
				RQD	51
				GSI	48
ESTE	NORTE	COTA	LITOLOGIA/FORMACIÓN	N° DISCONTINUIDADES	290
817879	9178886	2489 m.s.n.m	ARENISCAS-ARCILLOLITAS/ FM CARHUAZ	LONGITUD	17.7

Fotografía 17 Estación EG-SM-C 02 areniscas rojizas intercaladas con arcillolitas grises de la Formación Carhuaz (Ki- Ca), en la progresiva 15 + 260 Km de la carretera San Marcos-Cajabamba.

➤ **Cálculo de Rock Quality Designation (RQD)**

Tabla 19. Cálculo de RQD de la estación EG-SM-C 02 en función de número de discontinuidades (ND) y metros lineales (L).

$$RQD = 100e^{-0.11L} (0.11L + 1) \quad \text{CÁLCULO DEL RQD}$$

ND	L(m)	RQD
290	17.70	16.384
		51.26

➤ **Cálculo de Geological Strength Index (GSI)**

Tabla 20. Estimación del GSI de la estación EG-SM-C 02 en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI 1989)

$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$		ESTIMACIÓN DEL GSI			
CÁLCULO DEL RQD					
ND	L(m)	λ	RQD		
290	17.70	16.38	51.26		
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI 1989					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND89
1	4	3	4	3	15
GSI=1.5JCOND89 + RQD/2				48.13	
GSI			48.13		

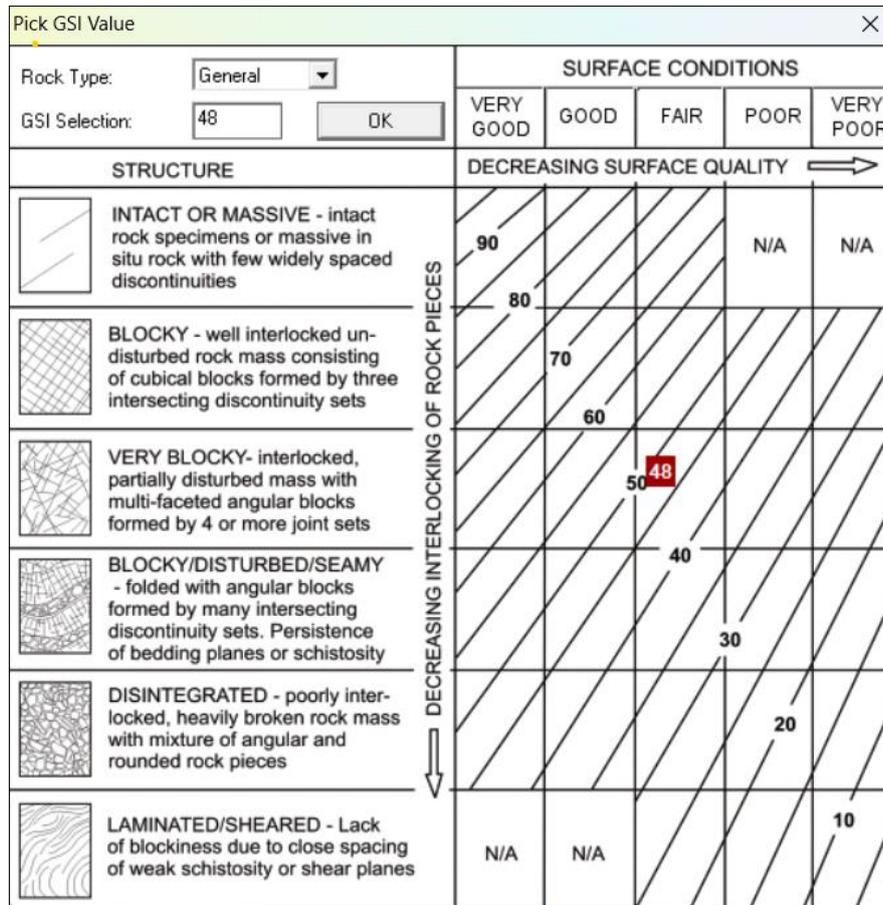


Figura 27. GSI=48 de la estación EG-SM-C 02, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0

Analysis of Rock EG-SM-C 02 Strength using RocData

Hoek-Brown Classification

intact uniaxial compressive strength = 85 MPa
 GSI = 48 mi = 11 Disturbance factor = 0.7

Hoek-Brown Criterion

mb = 0.632 s = 0.0005 a = 0.507

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.295 MPa friction angle = 54.29 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.072 MPa
 uniaxial compressive strength = 1.868 MPa
 global strength = 8.826 MPa
 modulus of deformation = 5341.00 MPa

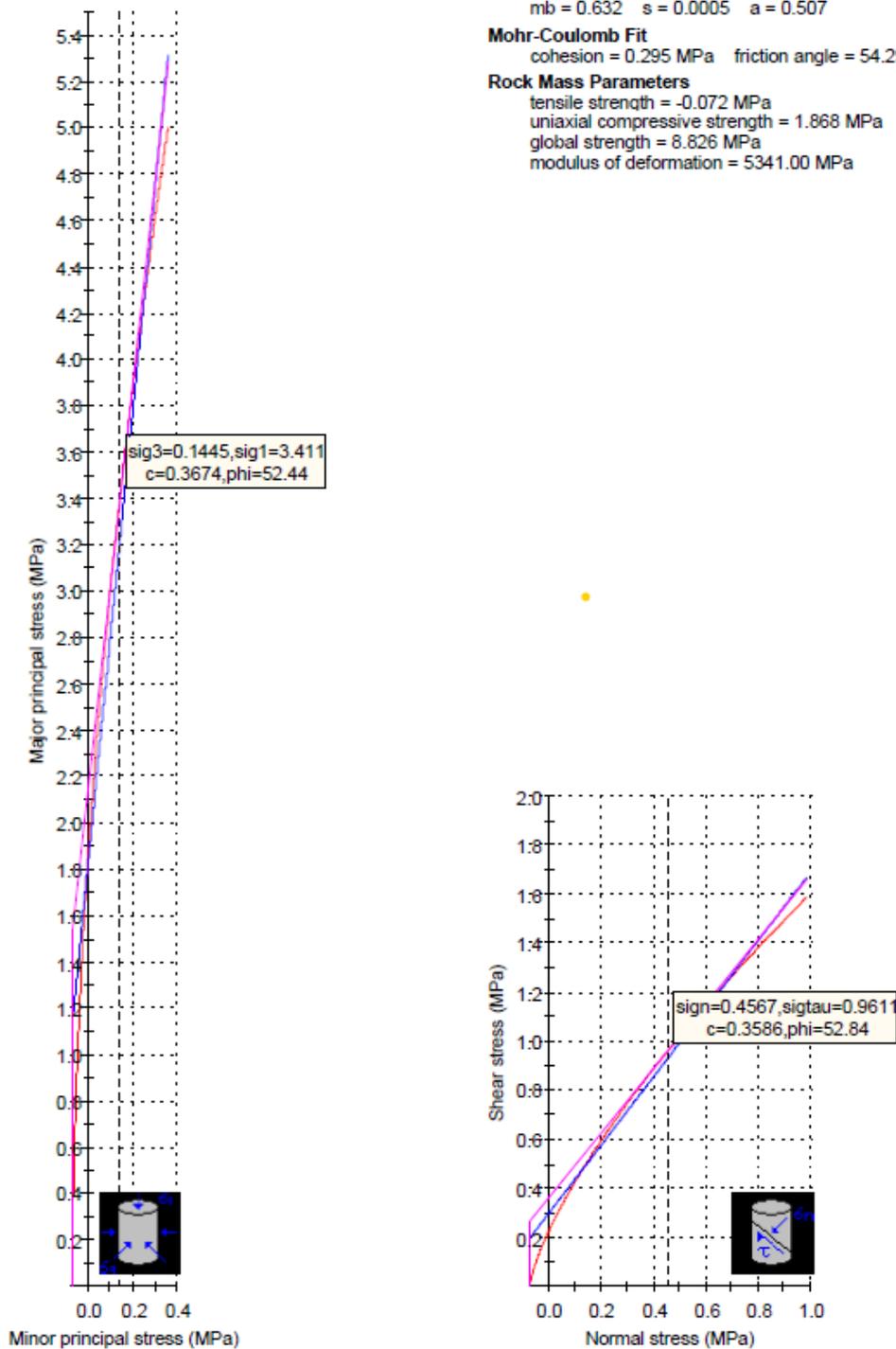
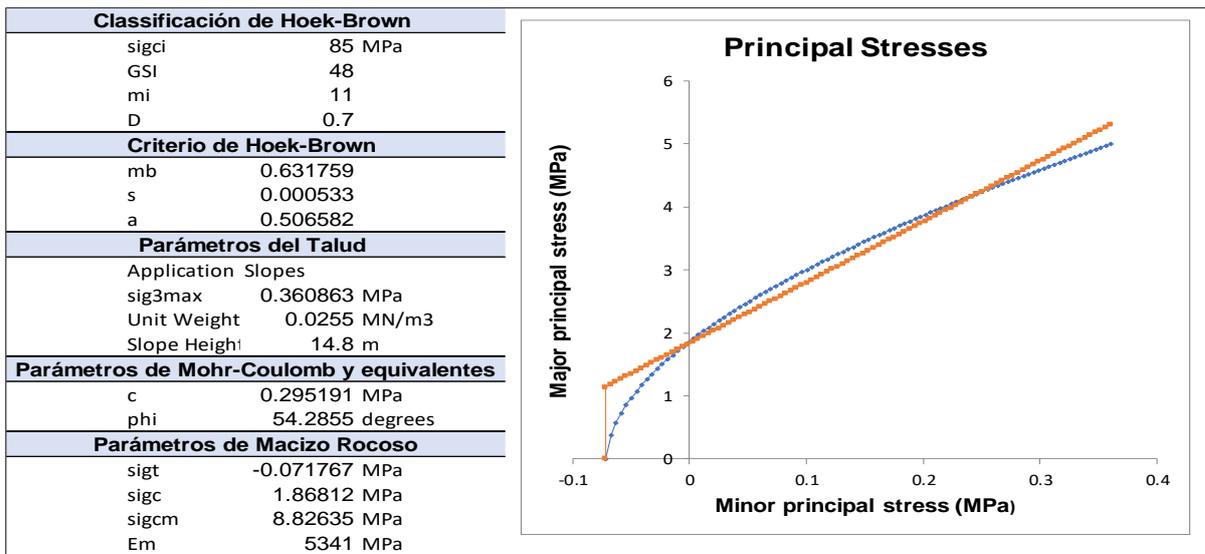


Figura 28. Análisis de la resistencia de macizo rocoso utilizando RocData en la estación EG-SM-C 02; Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las areniscas de la Fm. Carhuaz para cálculo de cohesión, ángulo de fricción y parámetros de Hoek-Brown.

Tabla 21. Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 02.



➤ **Cálculo de RMR₈₉**

Tabla 22. Valor de RMR₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 02.

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES						
1	Resistencia de Roca intacta	Ensayo carga puntual	>10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Compresión simple (MPa)	
	Compresión simple	>250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	< 1 MPa	5 – 25 MPa	
	VALOR	15	12	7	4	2	1 – 5 MPa	
2	RQD	90 – 100 %	75 – 90 %	50 – 75 %	25 – 50 %	< 25 %		
	VALOR	20	17	12	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades	> 2 m	0.6 – 2 m	0.2 – 0.6 m	0.06 – 0.2 m	< 0.06m		
	VALOR	20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m	
		VALOR	6	4	2	1	0	
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1 – 1.0mm	1 – 5 mm	> 5 mm	
		VALOR	6	5	4	1	0	
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave	
		VALOR	6	5	3	1	0	
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm	
		VALOR	6	4	2	2	0	
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	descompuesta	
		VALOR	6	5	3	1	0	
	VALOR	30	23	13	6	0		
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación presión agua/tensión principal mayor	0	0 – 0.1	0.1 - 0.2	0.2 – 0.5	>0.5	
	Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
	VALOR	15	10	7	4	0		
VALOR TOTAL RMR				54				

Fuente: Clasificación geomecánica RMR₈₉. Bieniawski, (1989).

➤ **Análisis cinemático y estereográfico DIPS.**

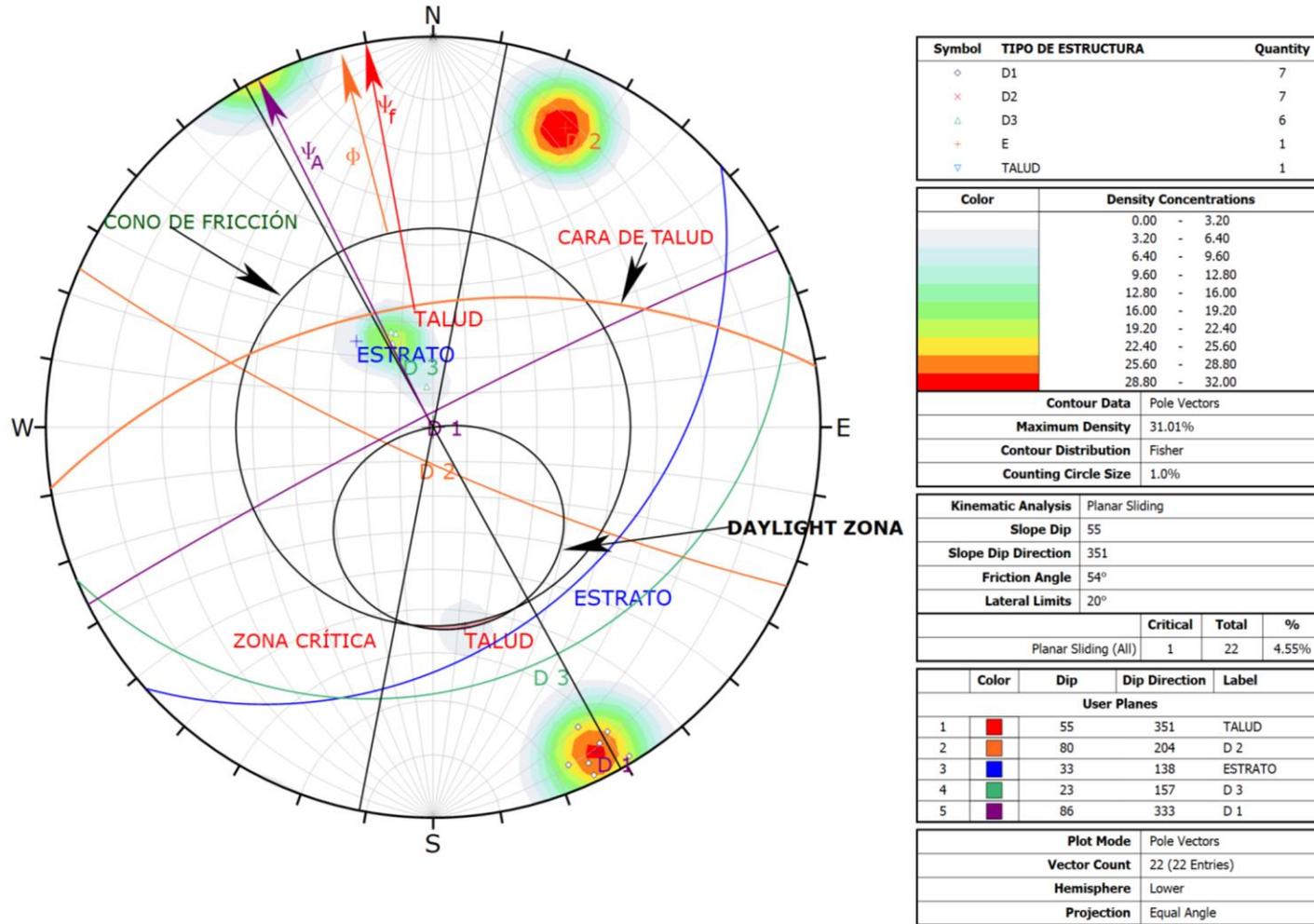
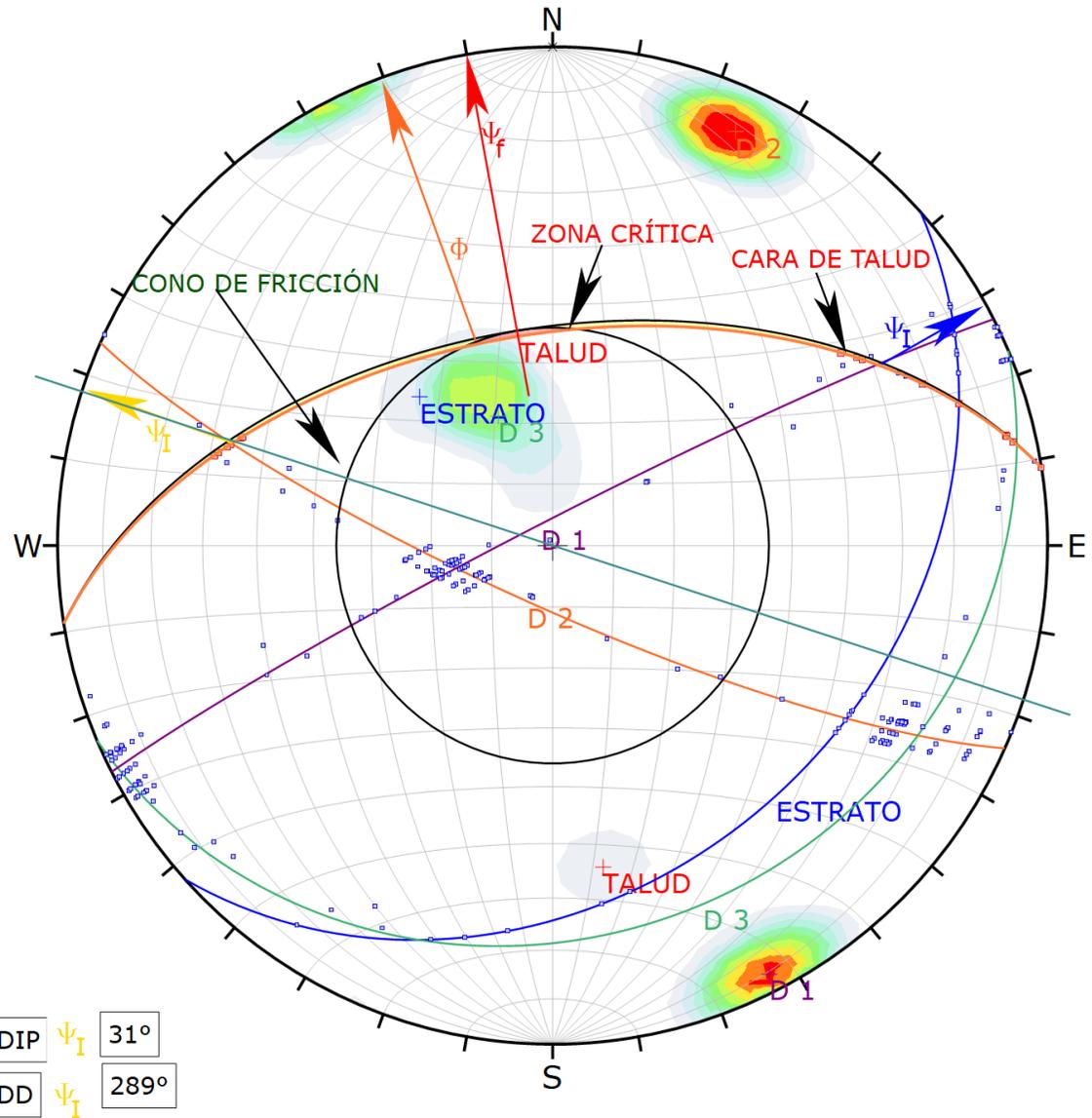


Figura 29. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 02, indicando una probabilidad de falla de 4.55 %.



Symbol	Feature
■	Critical Intersection
□	Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.10
	3.10 - 6.20
	6.20 - 9.30
	9.30 - 12.40
	12.40 - 15.50
	15.50 - 18.60
	18.60 - 21.70
	21.70 - 24.80
	24.80 - 27.90
	27.90 - 31.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	30.95%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	55
Slope Dip Direction	351
Friction Angle	54°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	15	231	6.49%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	55	351	TALUD
2	■	80	204	D 2
3	■	33	138	ESTRATO
4	■	23	157	D 3
5	■	86	333	D 1

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	22 (22 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	231
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

DIP	ψ_I	31°
DD	ψ_I	289°

Figura 30. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 02, indicando una probabilidad de falla de 6.49 %.

➤ **Análisis y cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide V.6.0**

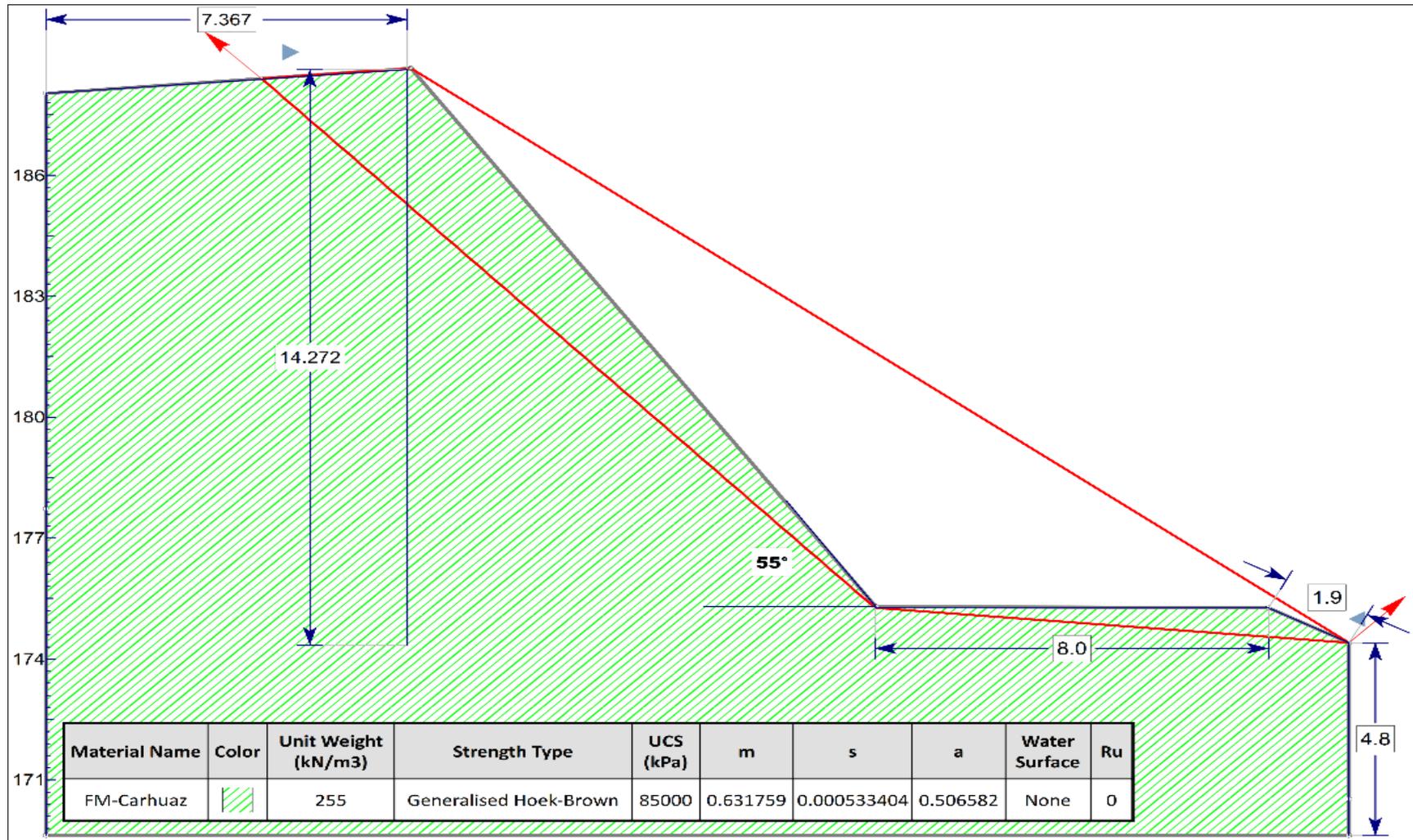


Figura 31. Estación EG-SM-C 02, dimensiones y propiedades del del talud.

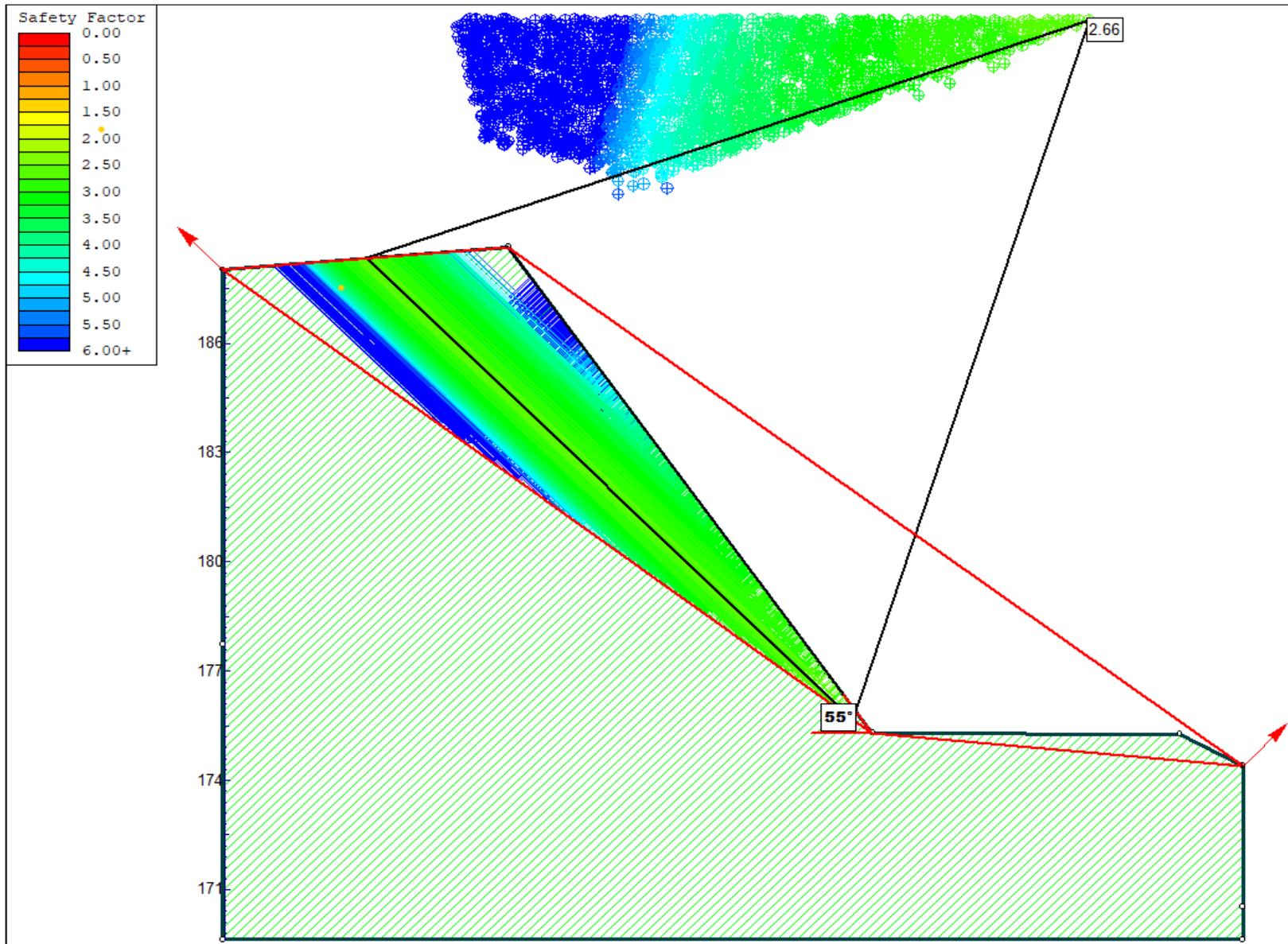


Figura 32. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.66) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

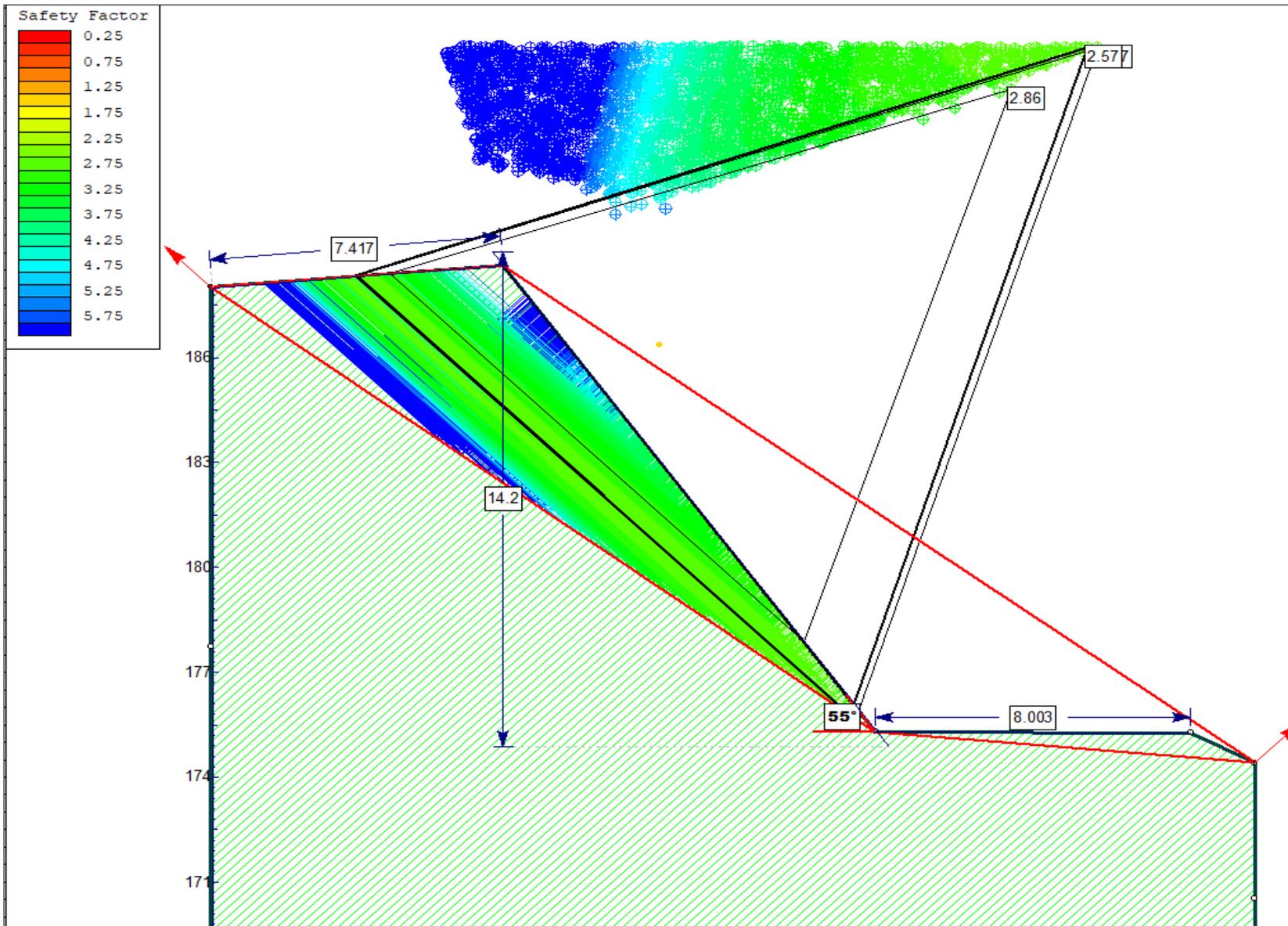


Figura 33. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.57; 2.86) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

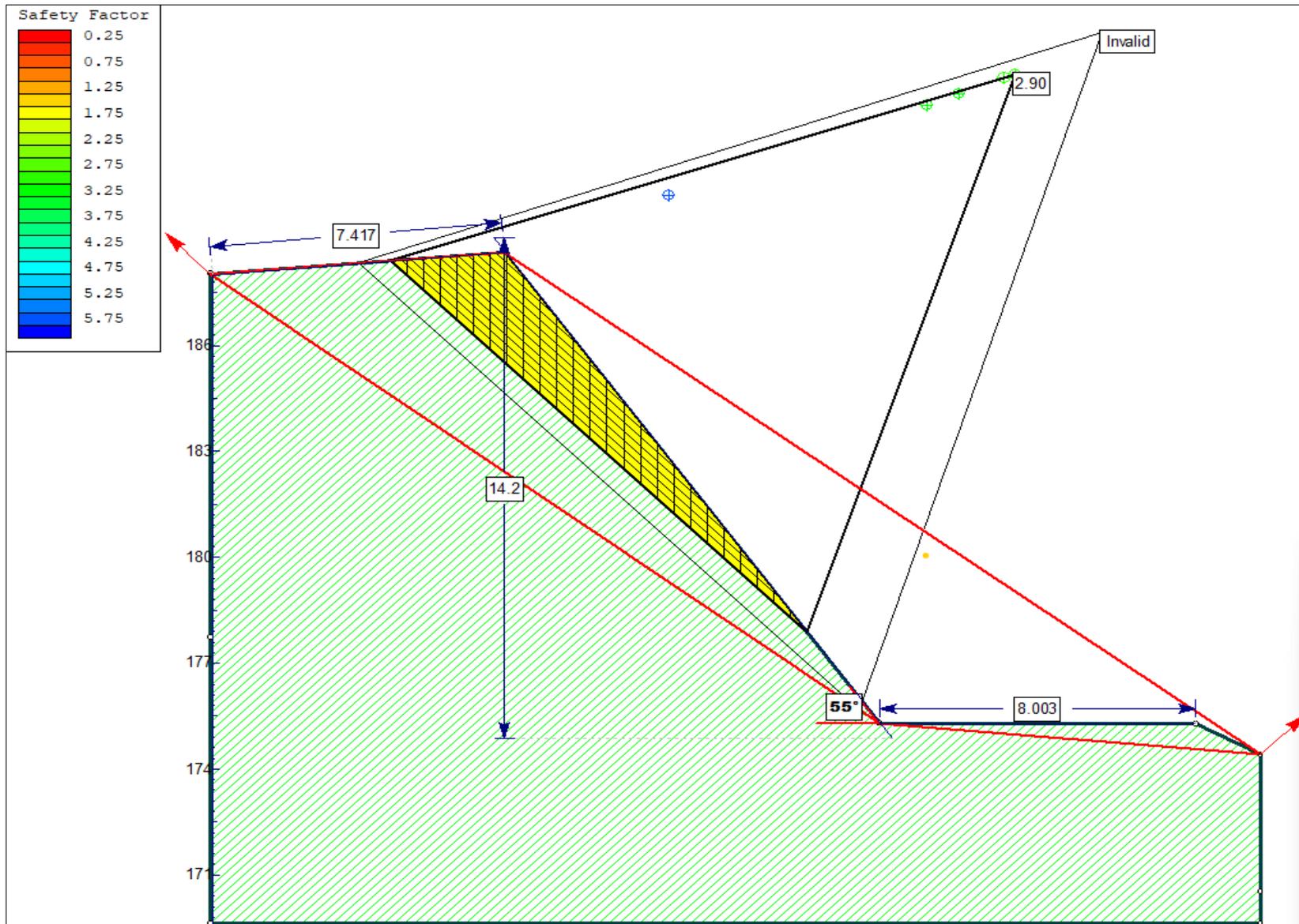


Figura 34. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.90) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.

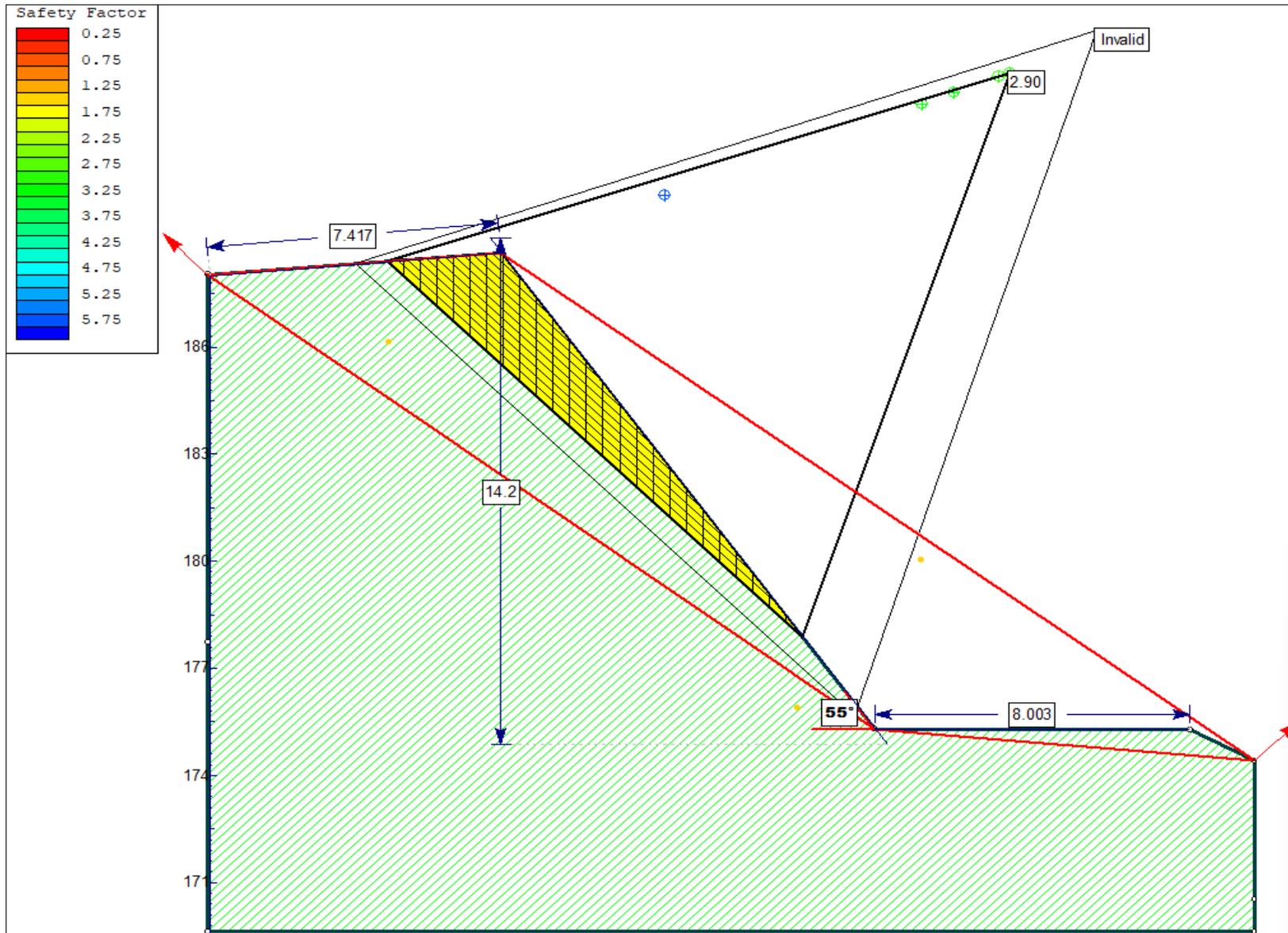


Figura 35. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.90) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Totales.

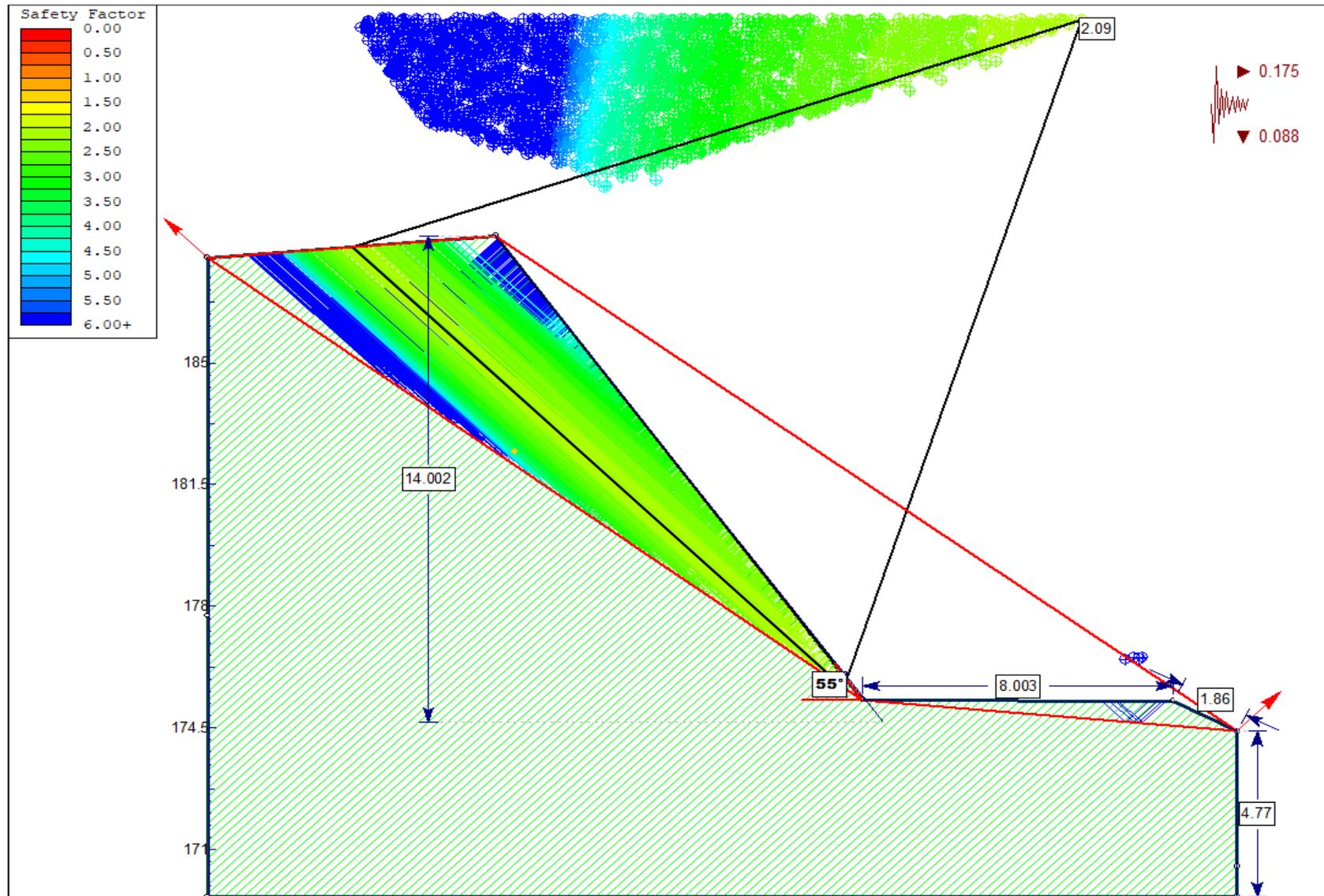


Figura 36. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.09) por Método de Bishop simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

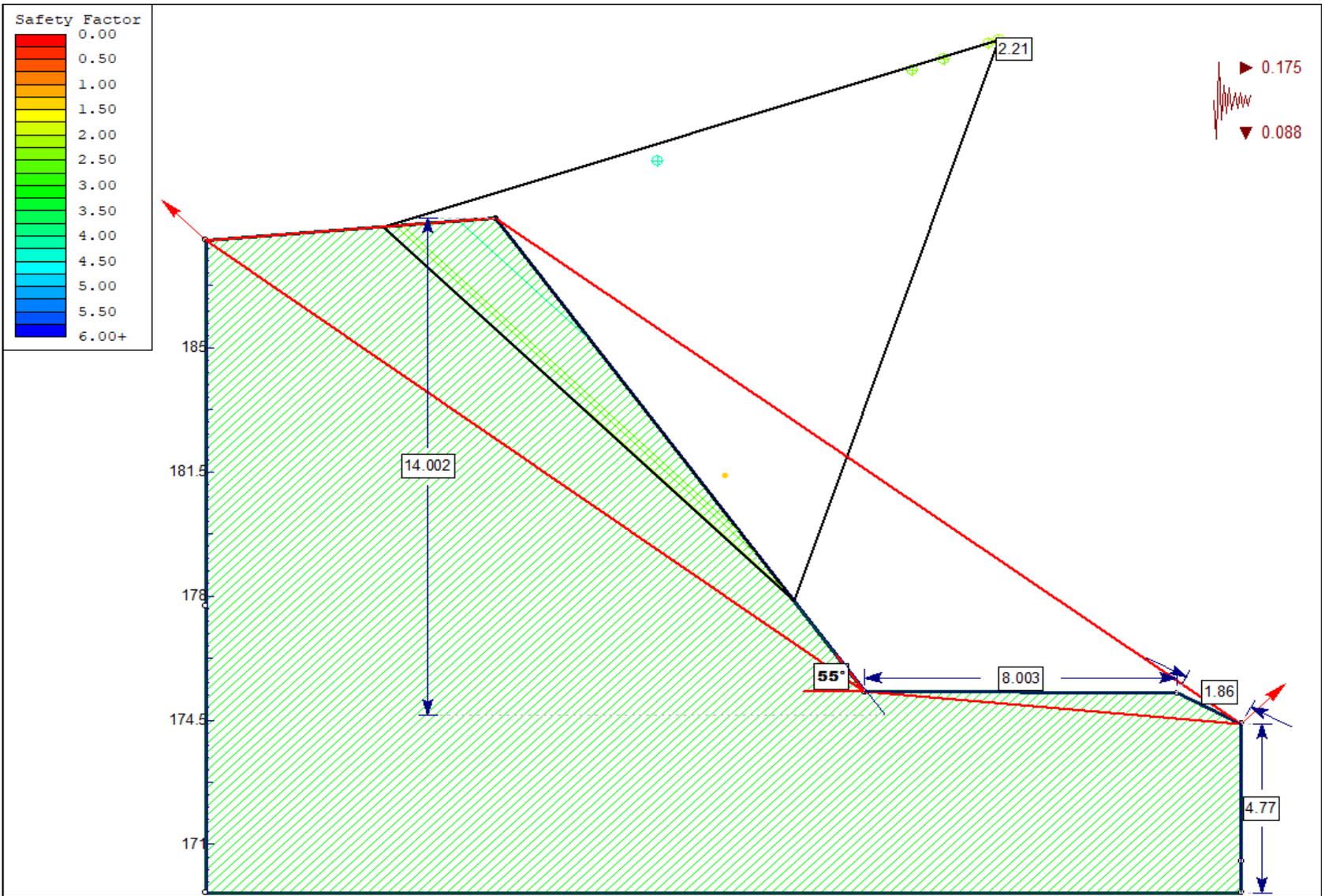


Figura 38. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.21) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

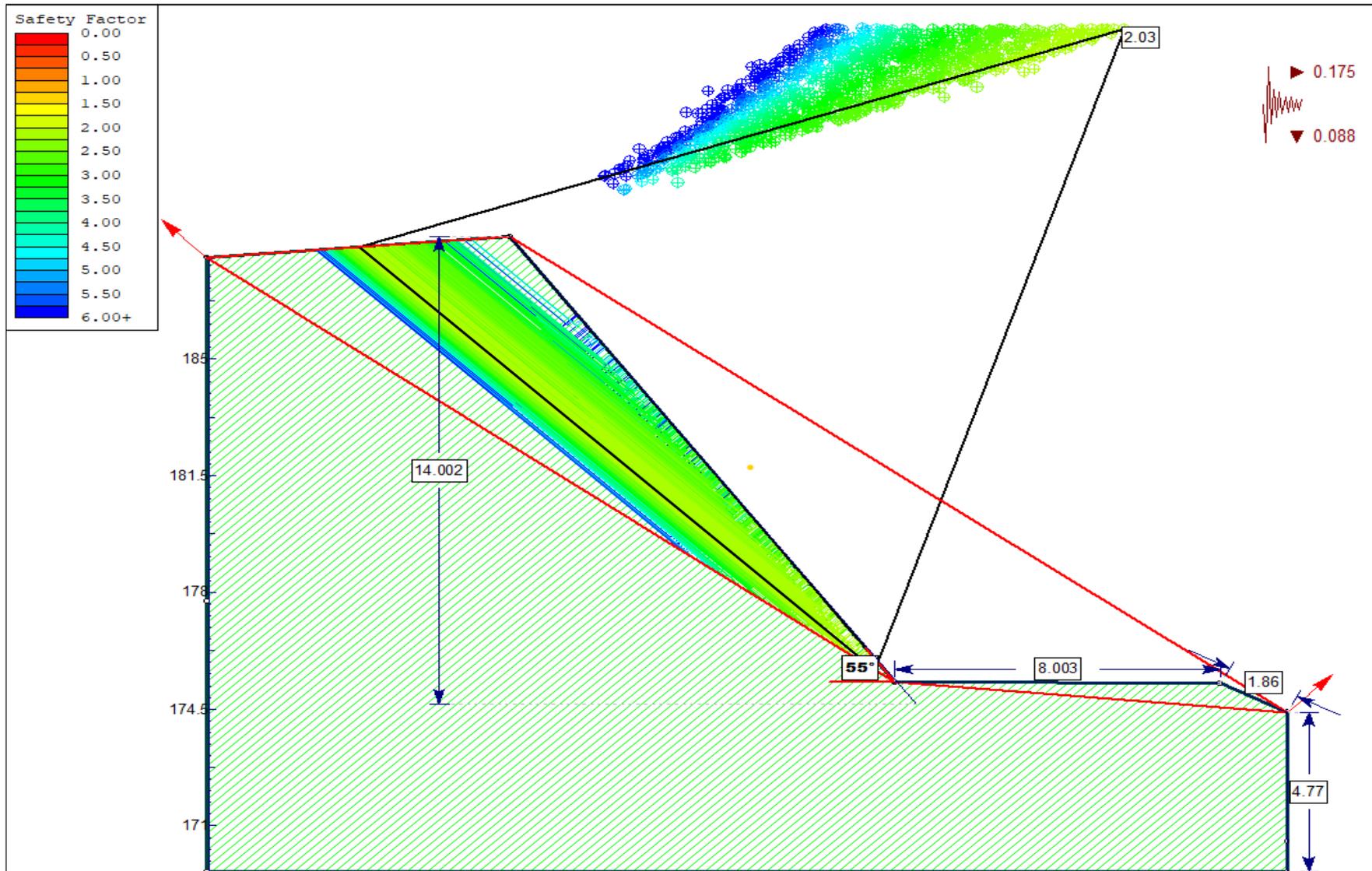


Figura 39. Estación EG-SM-C 02, Factor de Seguridad (2.03) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

3.9.3 Estación geotécnica EG-SM-C 03

El talud se encuentra en la progresiva 15+610 km de la carretera San Marcos- Cajabamba, está conformado por areniscas y arcillolitas de la Formación Carhuaz (Ki-Ca). El macizo rocoso tiene un grado de meteorización alto y fracturamiento alto, posee 3 familias de discontinuidades, se registró un total de 468 discontinuidades en 28.90 m lineales. En cuanto a la geometría del talud tiene un ángulo de 52° y una altura de 8.2 m. El Macizo también presenta fallas normales que favorece a su inestabilidad. (ver Fotografía 18).

				GEOMETRÍA DEL TALUD	
				ALTURA	8.2 m.
				PIE	8 m.
				DIP	76°
				DD	325
				CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO	
				METEORIZACION	Alta
				GRADO DE FRACTURAMIENTO	Alto
				RQD	51.86
				GSI	48.43
				N° DISCONTINUIDADES	468
				LONGITUD	28.90 m.
ESTE	NORTE	COTA	LITOLOGIA/FORMACIÓN		
818054	9178703	2485	ARENISCAS-ARCILLOLITAS/ FM CARHUAZ		

Fotografía 18. Estación EG-SM-C 03 areniscas rojizas intercaladas con arcillolitas grises de la Formación Carhuaz (Ki- Ca), presenta fallas normales, se encuentra en la progresiva 15 + 610 Km de la carretera San Marcos- Cajabamba.

➤ **Cálculo de Rock Quality Designation (RQD)**

Tabla 23. Cálculo de RQD en función de numero de discontinuidades (ND) y metros lineales (L).

$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$				CÁLCULO DEL RQD	
ND	L(m)	λ	RQD		
468	28.90	16.19	51.87		

➤ **Cálculo de Geological Strength Index (GSI)**

Tabla 24. Estimación del GSI en la estación EG-SM-C 03 en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI 1989)

ESTIMACIÓN DEL GSI					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$ CÁLCULO DEL RQD					
	ND	L(m)			RQD
	468	28.90	16.19		51.87
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI 1989					
					VALORACIÓN
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	JCOND89
6	1	3	2	3	15
$GSI=1.5JCOND89 + RQD/2$					48.43
GSI					48.43

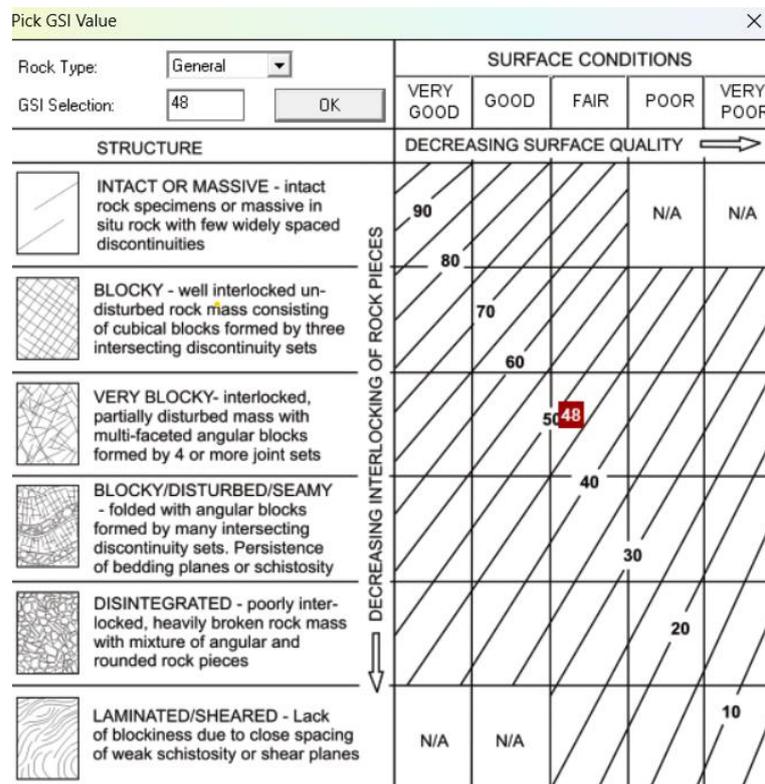


Figura 40. GSI=48 de la estación EG-SM-C 03, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0.

Analysis of Rock Strength EG-SM-C 03 using RocData

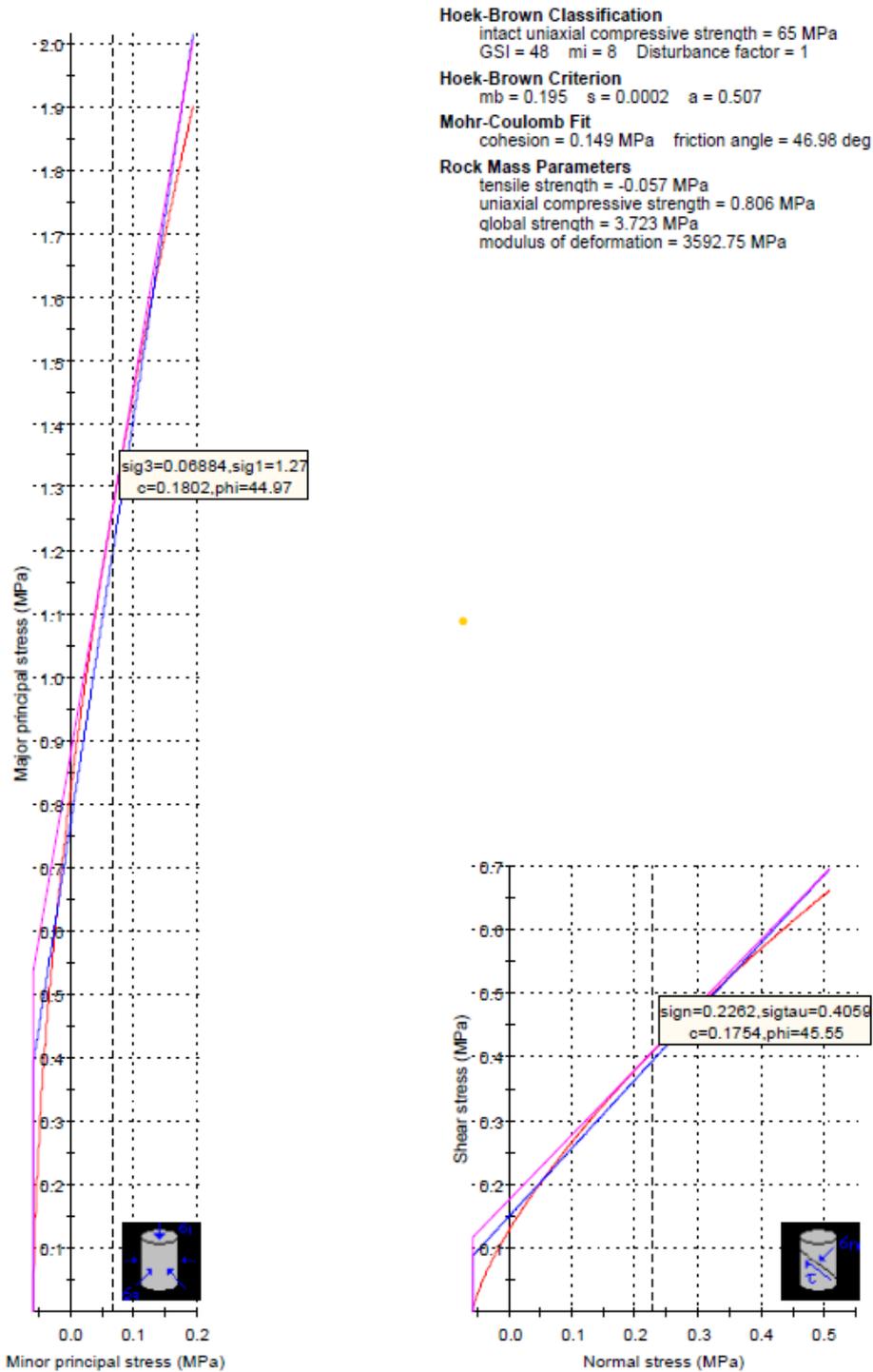
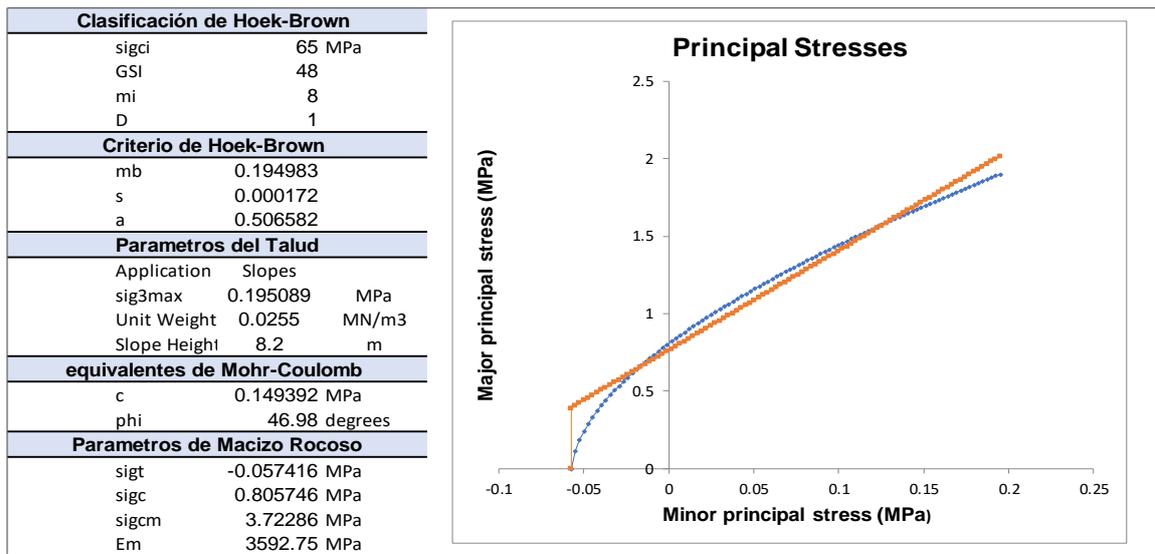


Figura 41. Análisis de la resistencia de macizo rocoso utilizando RocData en la estación EG-SM-C 03; Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las areniscas de la Fm. Carhuaz para cálculo de cohesión, ángulo de fricción y parámetros de Hoek-Brown.

Tabla 25. Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 03.



➤ **Cálculo de RMR₈₉**

Tabla 26. Valor de RMR₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 03.

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES					
1	Resistencia de Roca intacta	Ensayo carga puntual	>10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Compresión simple (MPa)
		Compresión simple	>250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5 – 25 MPa 1 – 5 MPa < 1 MPa
	VALOR		15	12	7	4	2
2	RQD		90 – 100 %	75 – 90 %	50 – 75 %	25 – 50%	< 25%
	VALOR		20	17	12	8	3
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0.6 – 2 m	0.2 – 0.6 m	0.06 – 0.2 m	< 0.06cm
	VALOR		20	15	10	8	5
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m
		VALOR	6	4	2	1	0
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1 – 1.0mm	1 – 5 mm	> 5 mm
		VALOR	6	5	4	1	0
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
		VALOR	6	5	3	1	0
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm
		VALOR	6	4	2	2	0
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	descompuesta
		VALOR	6	5	3	1	0
	VALOR		30	23	13	6	0
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación presión agua/tensión principal mayor	0	0 – 0.1	0.1 - 0.2	0.2 – 0.5	>0.5
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo
		VALOR	15	10	7	4	0
VALOR TOTAL RMR			54				

Fuente: Clasificación geomecánica RMR₈₉. Bieniawski, (1989).

➤ **Análisis cinemático y estereográfico DIPS.**

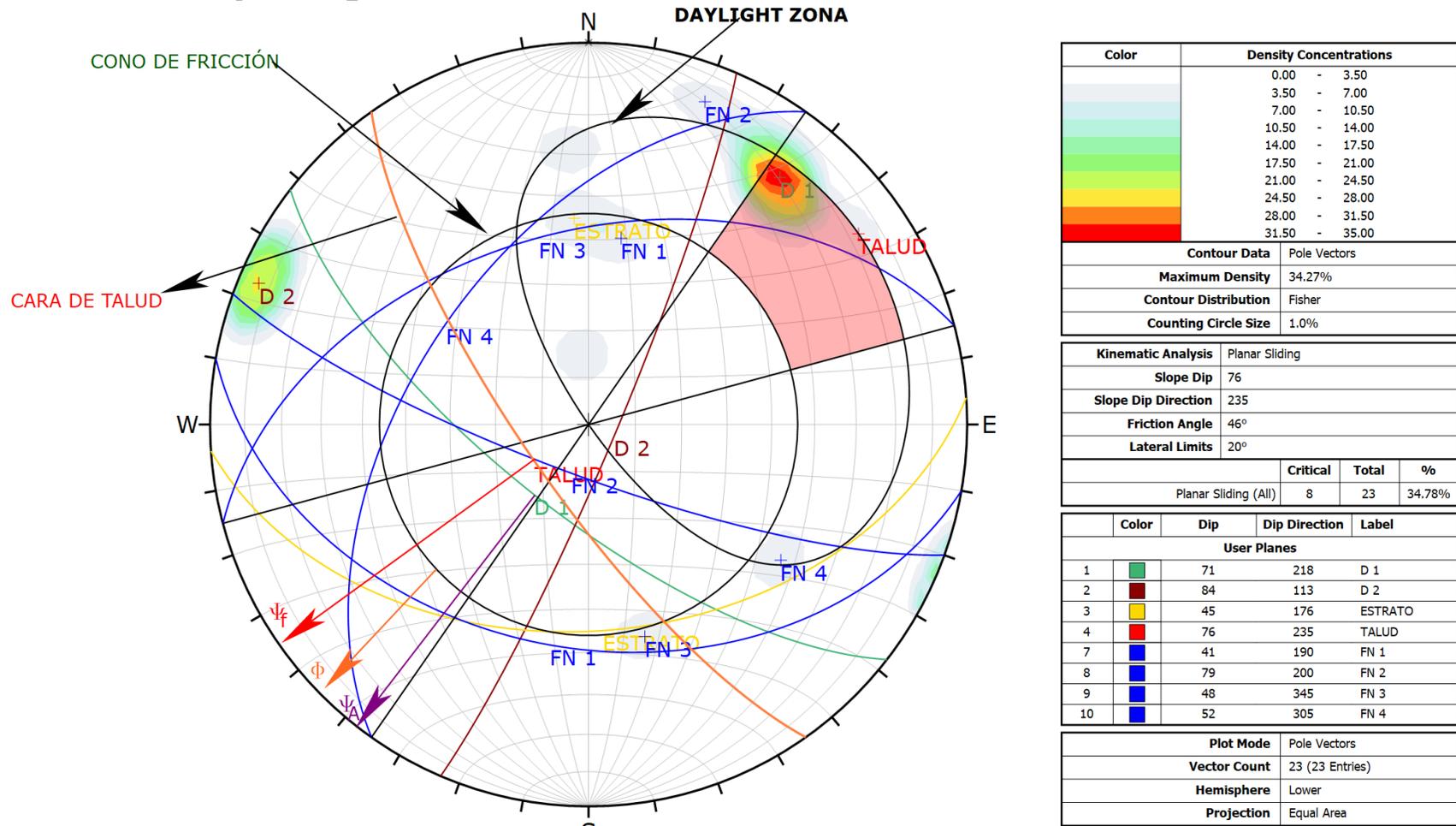
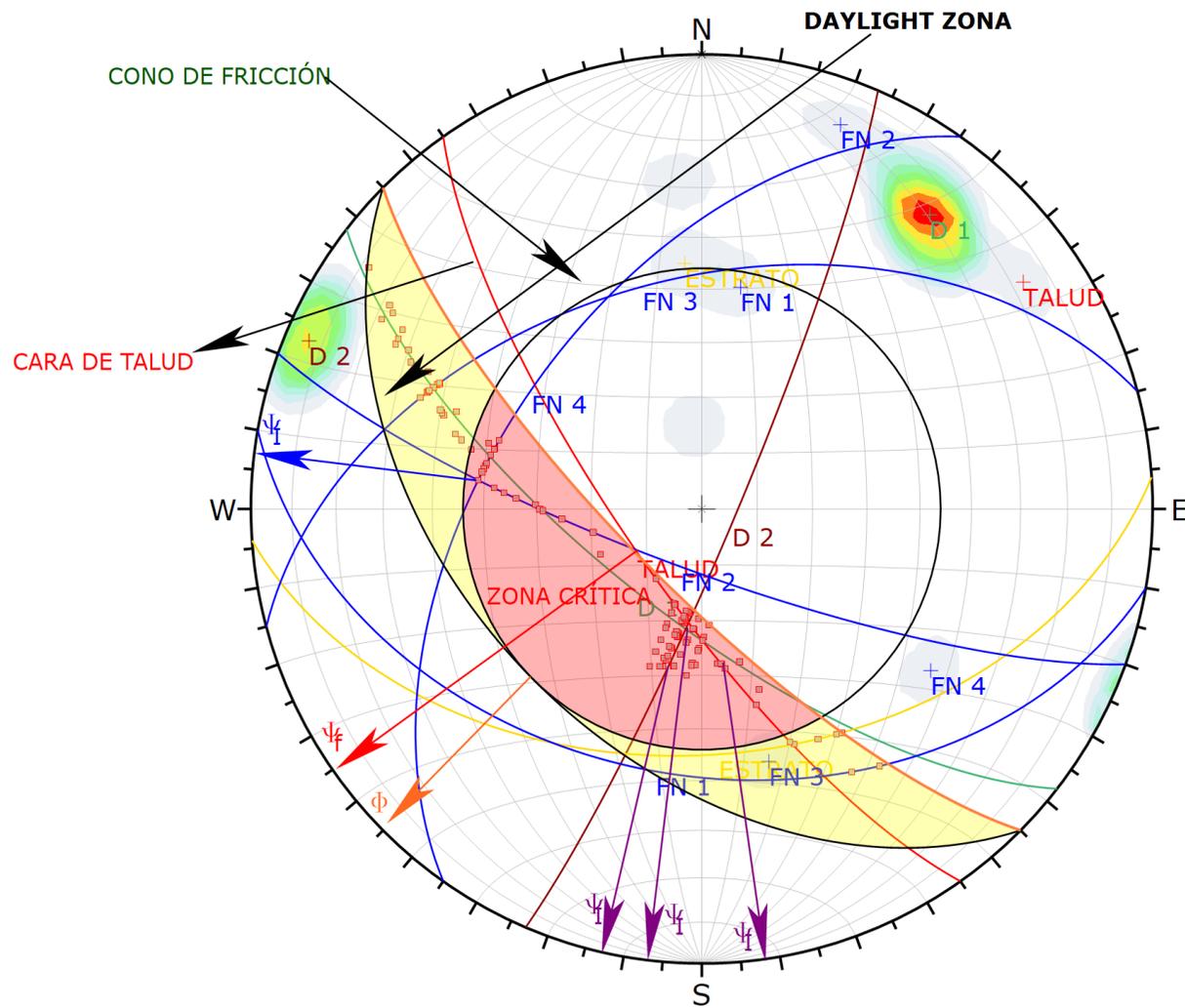


Figura 42. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 03, indicando una probabilidad de falla de 34.78%.



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.50
	3.50 - 7.00
	7.00 - 10.50
	10.50 - 14.00
	14.00 - 17.50
	17.50 - 21.00
	21.00 - 24.50
	24.50 - 28.00
	28.00 - 31.50
	31.50 - 35.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	34.27%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding		
Slope Dip	76		
Slope Dip Direction	225		
Friction Angle	46°		
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	133	252	52.78%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	71	218	D 1
2	■	84	113	D 2
3	■	45	176	ESTRATO
4	■	76	235	TALUD
7	■	41	190	FN 1
8	■	79	200	FN 2
9	■	48	345	FN 3
10	■	52	305	FN 4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	23 (23 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	252
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 43. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 03, indicando una probabilidad de falla de 52.79 %.

➤ **Análisis y cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide V.6.0**

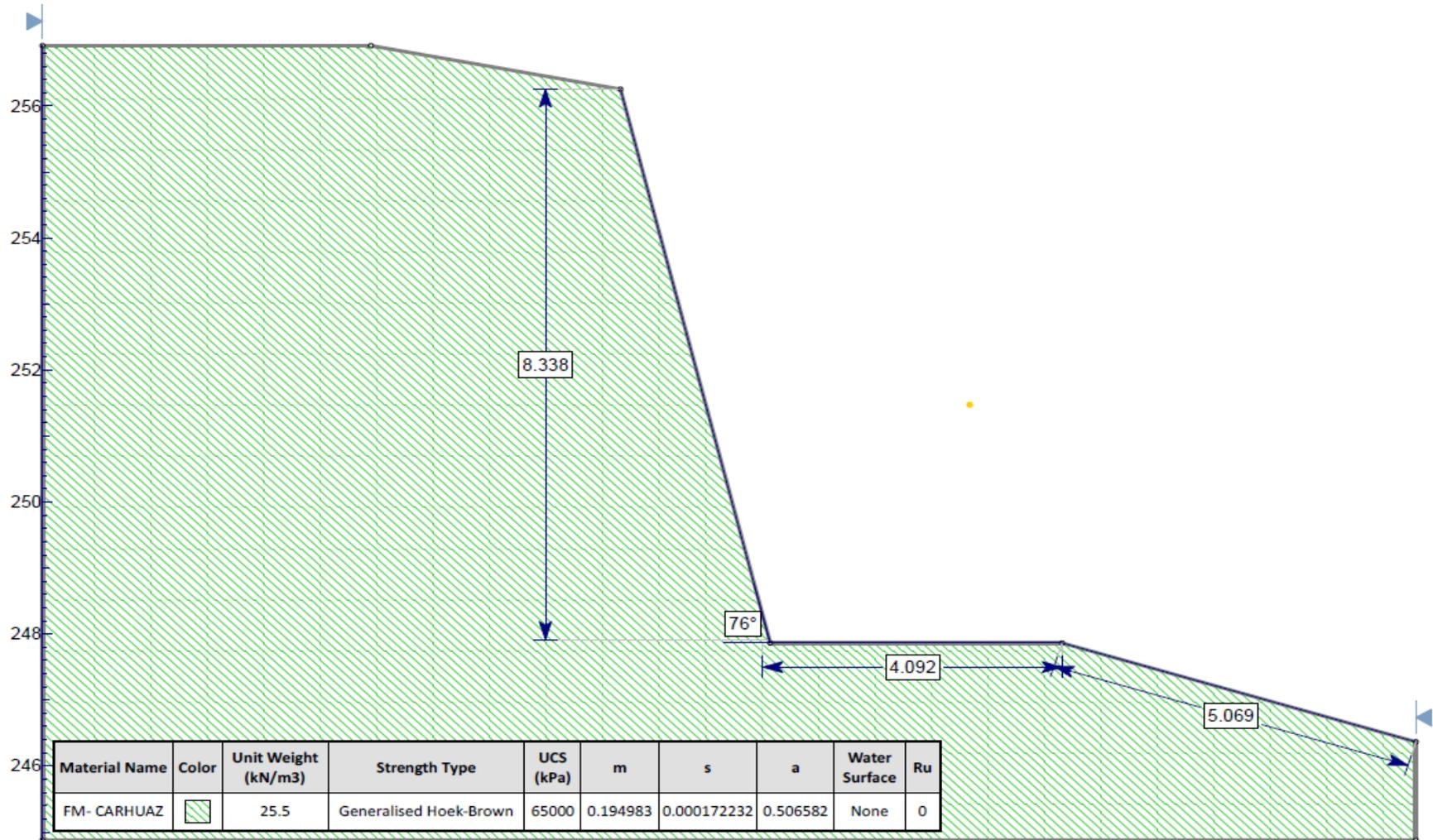


Figura 44. Estación EG-SM-C 03, dimensiones y propiedades del del talud.

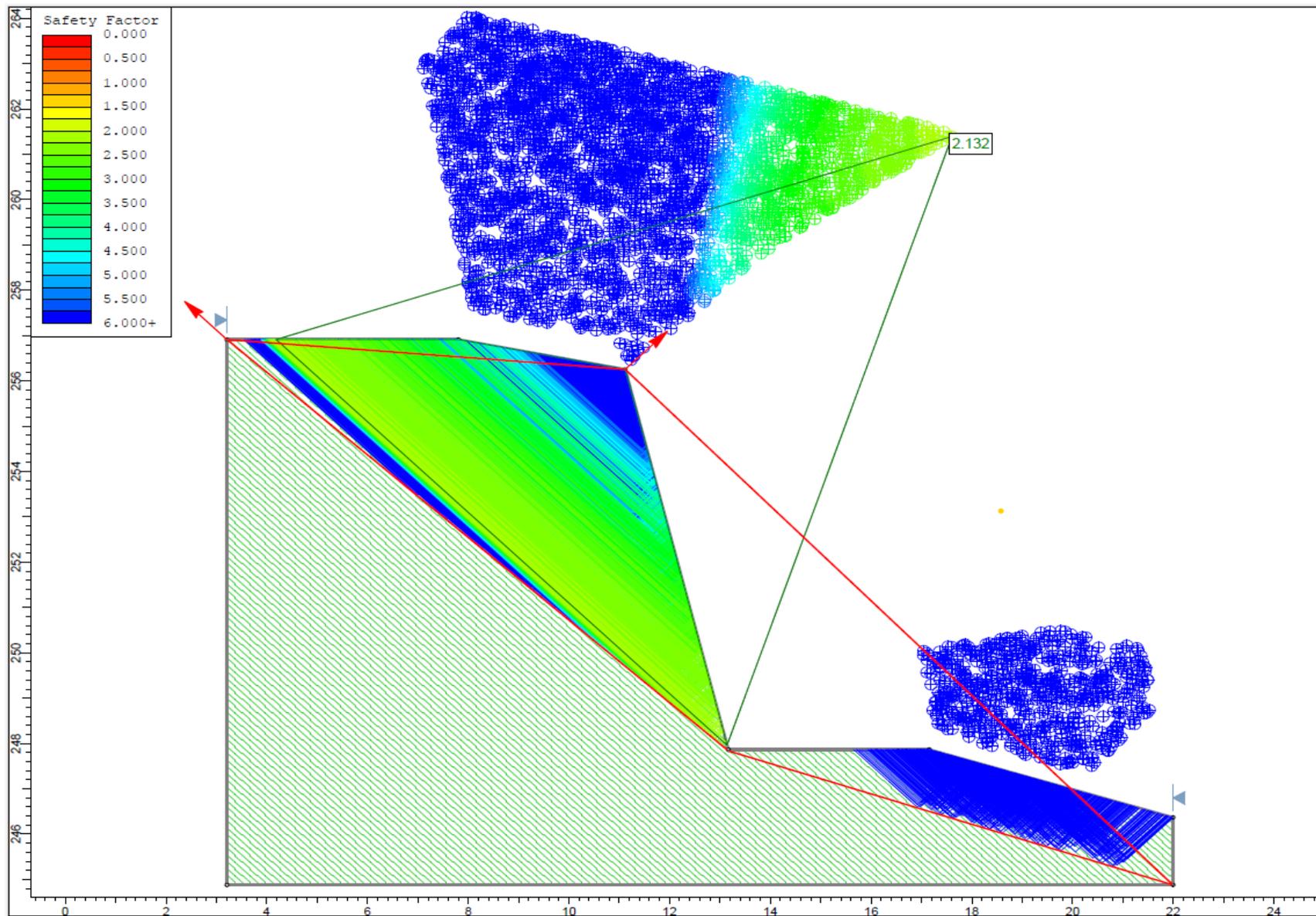


Figura 45. Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (2.132) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

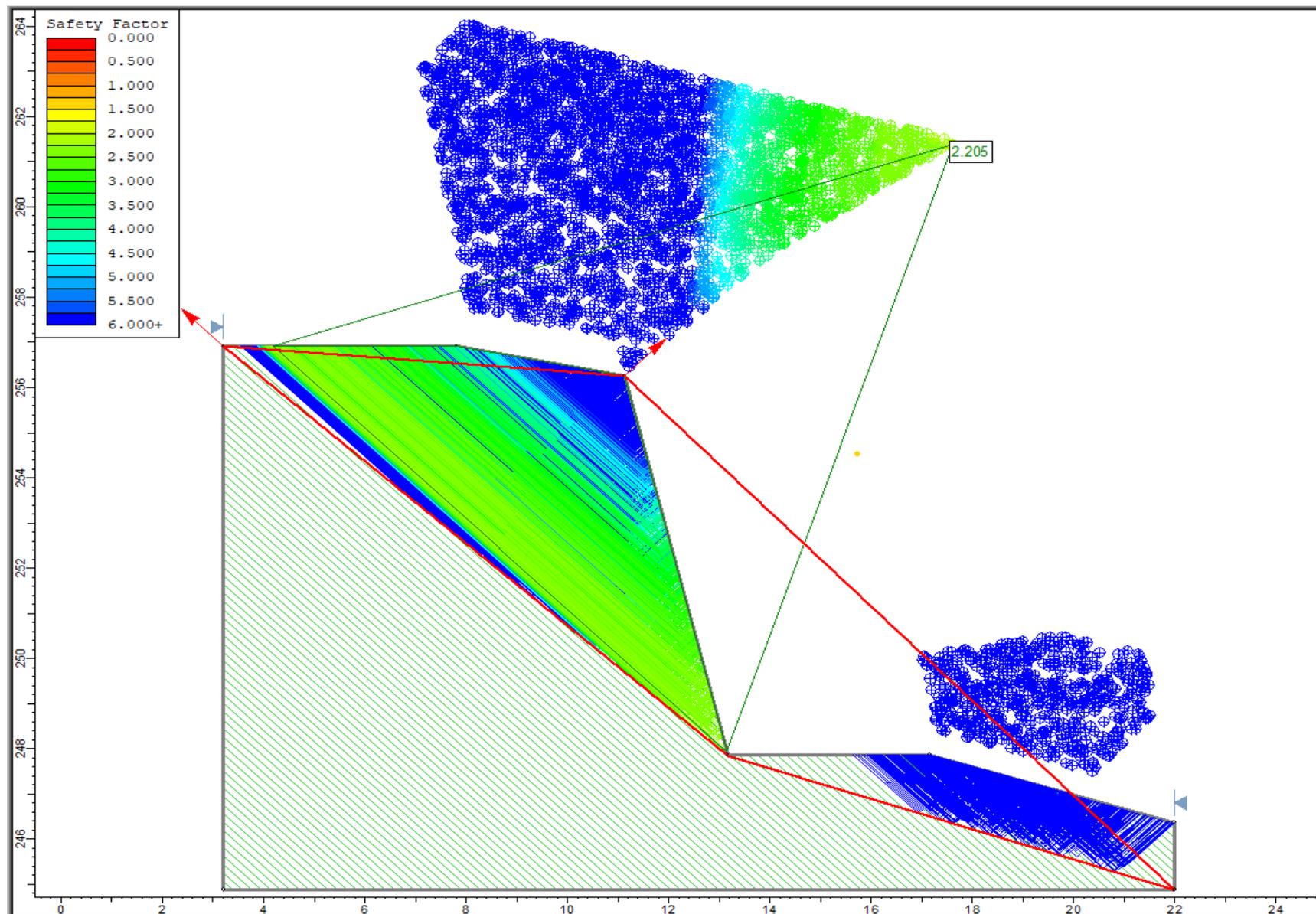


Figura 46. Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (2.205) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

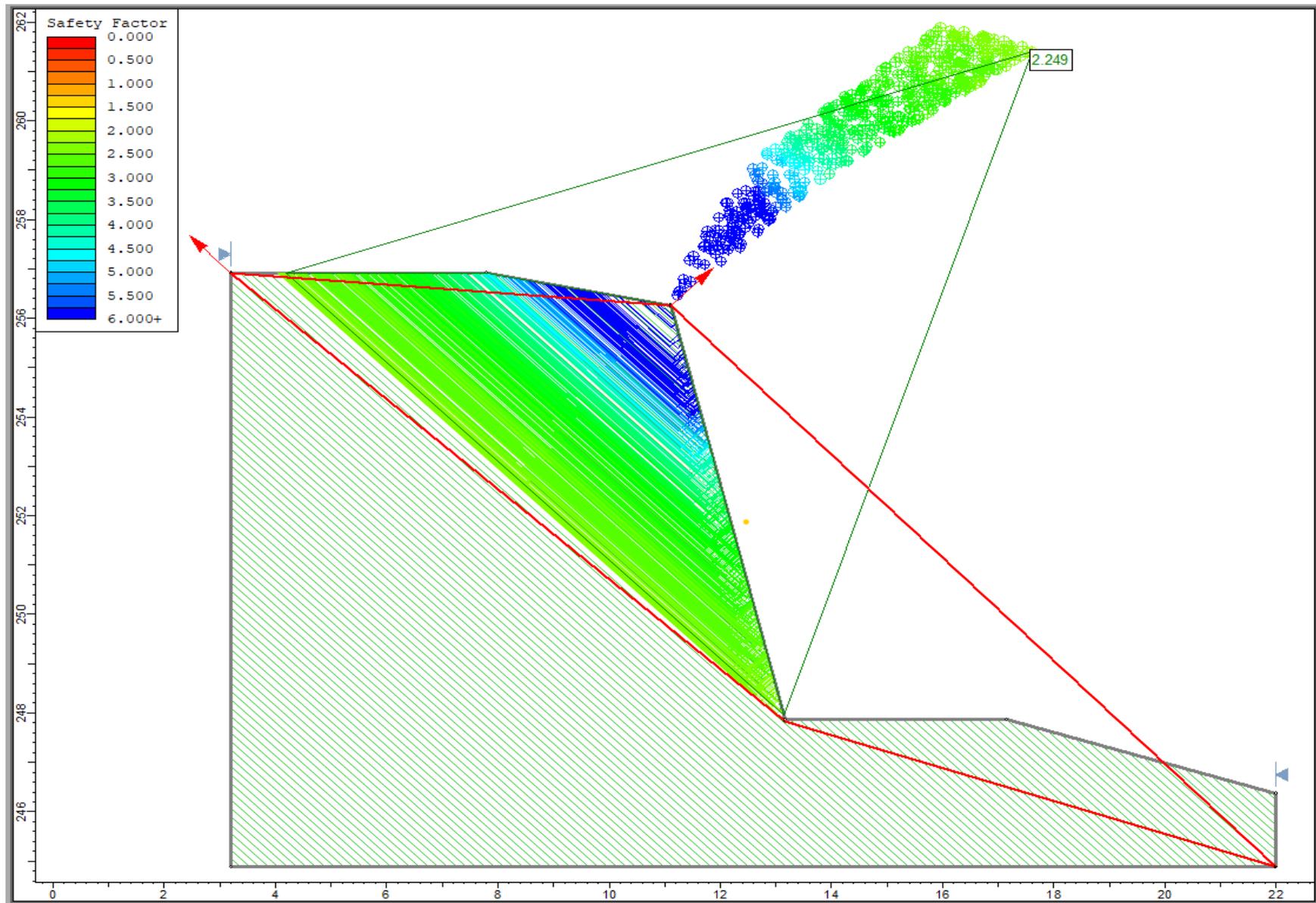


Figura 47. Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (2.249) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.

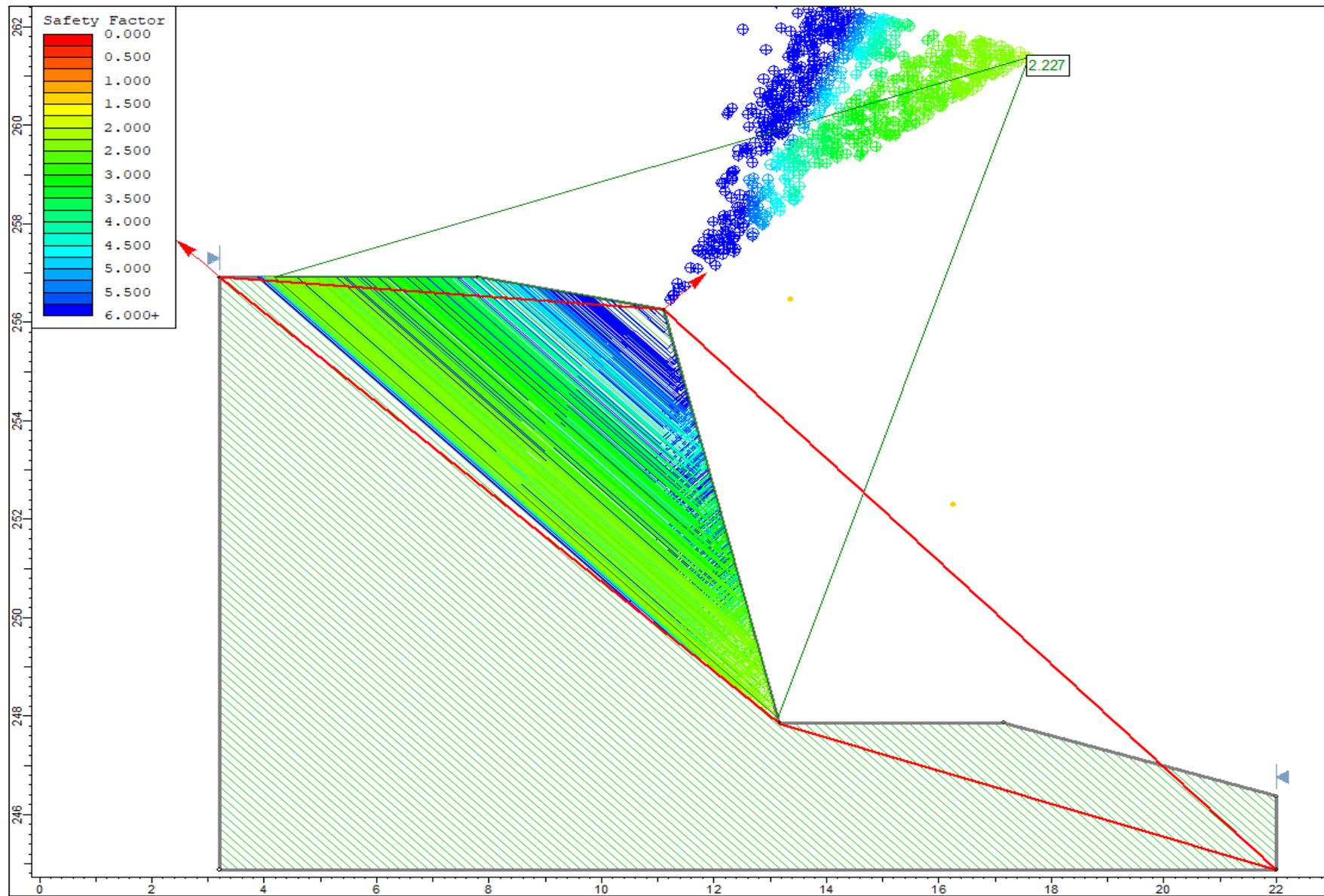


Figura 48. Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (2.227) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Totales.

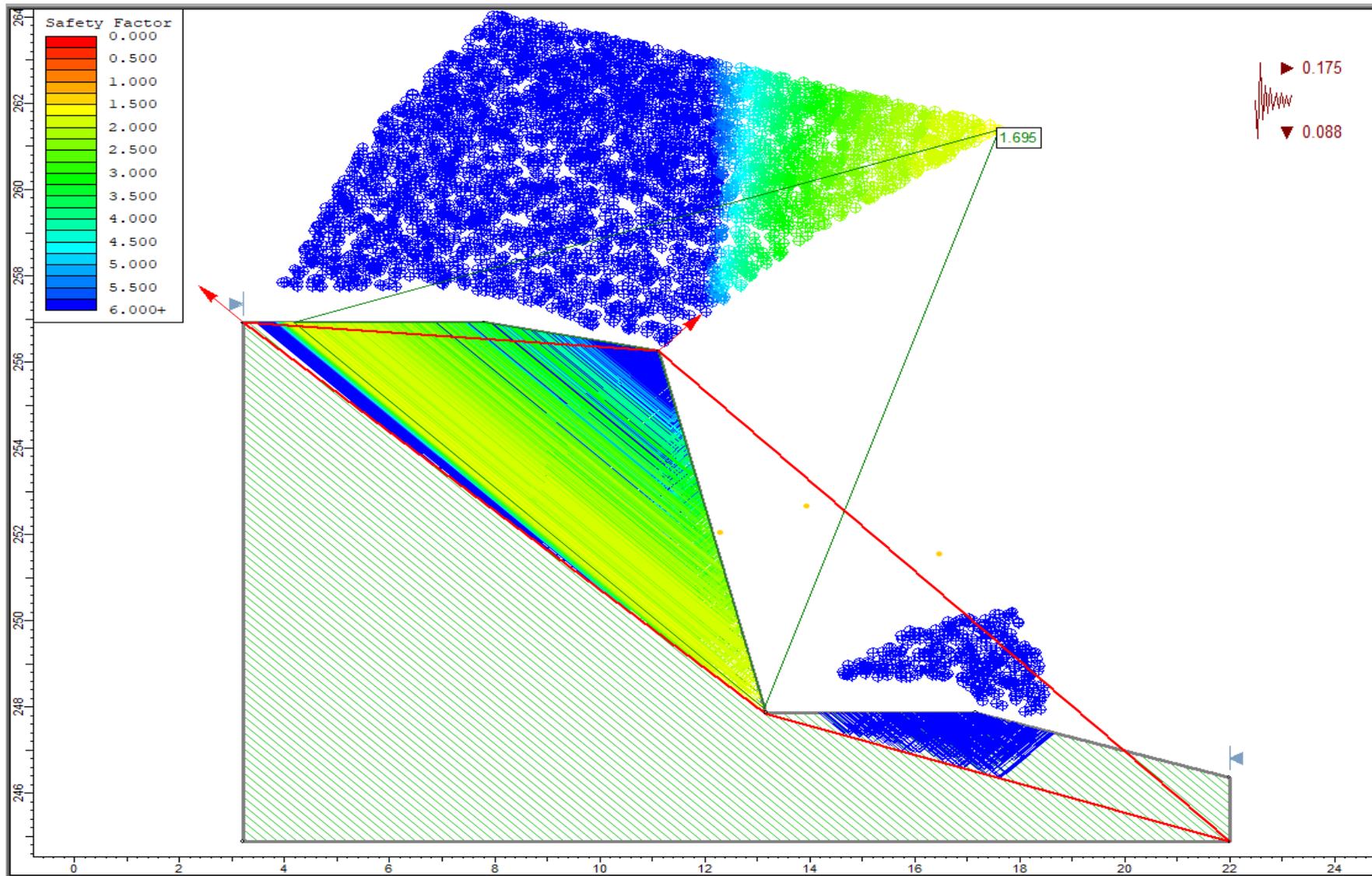


Figura 49. Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (1.695) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

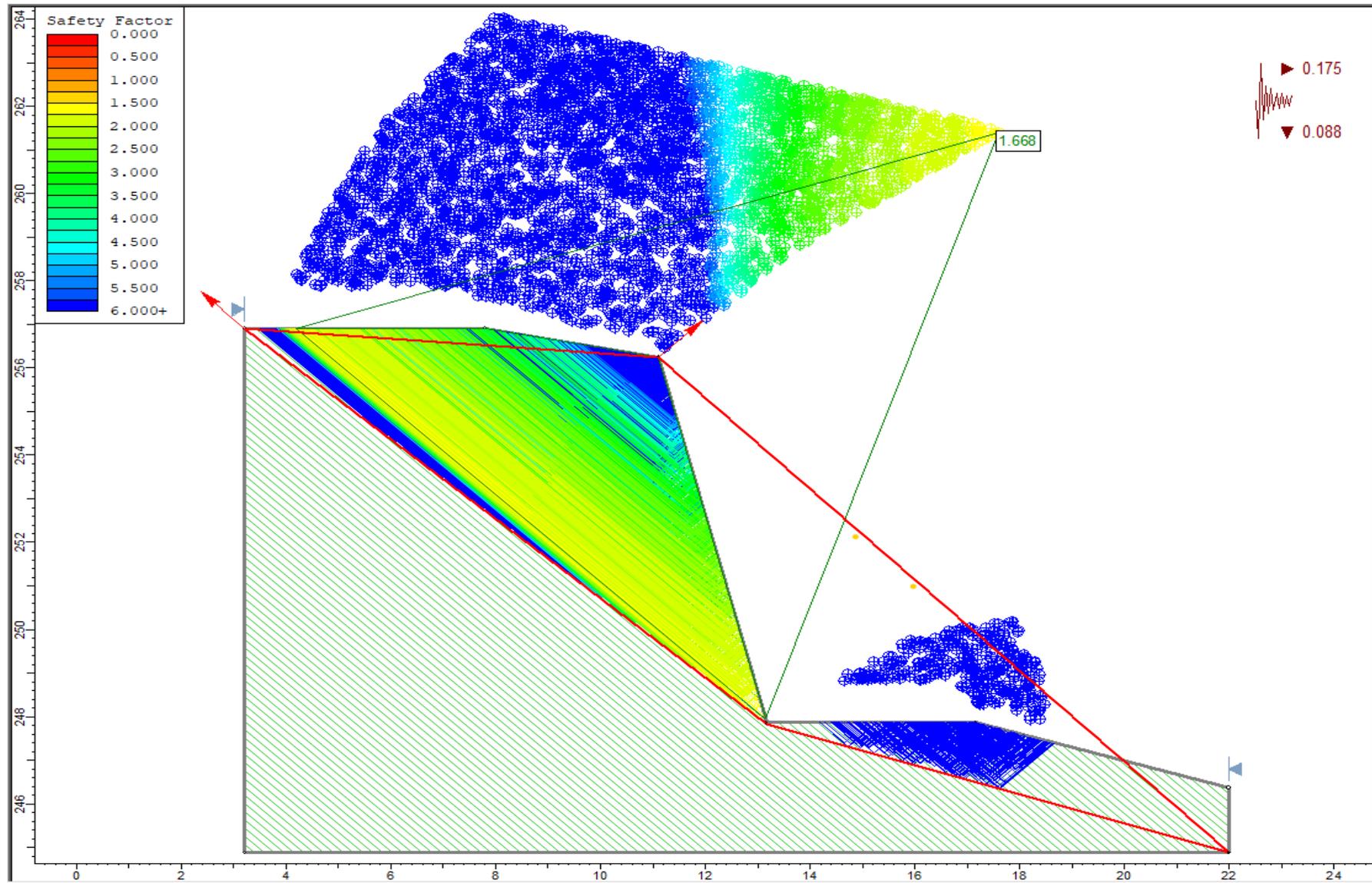


Figura 50. Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (1.668) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

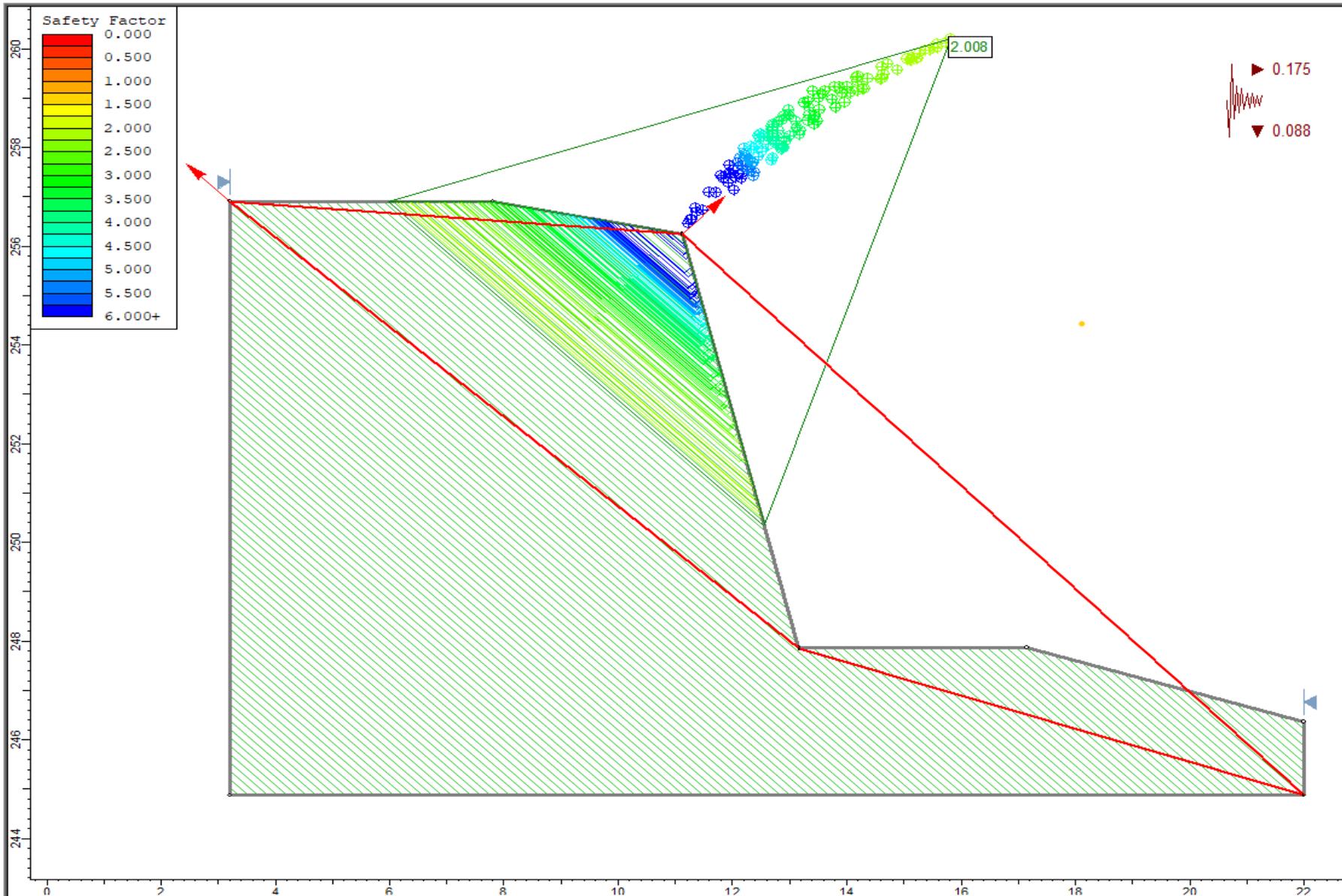


Figura 51. Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (2.008) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

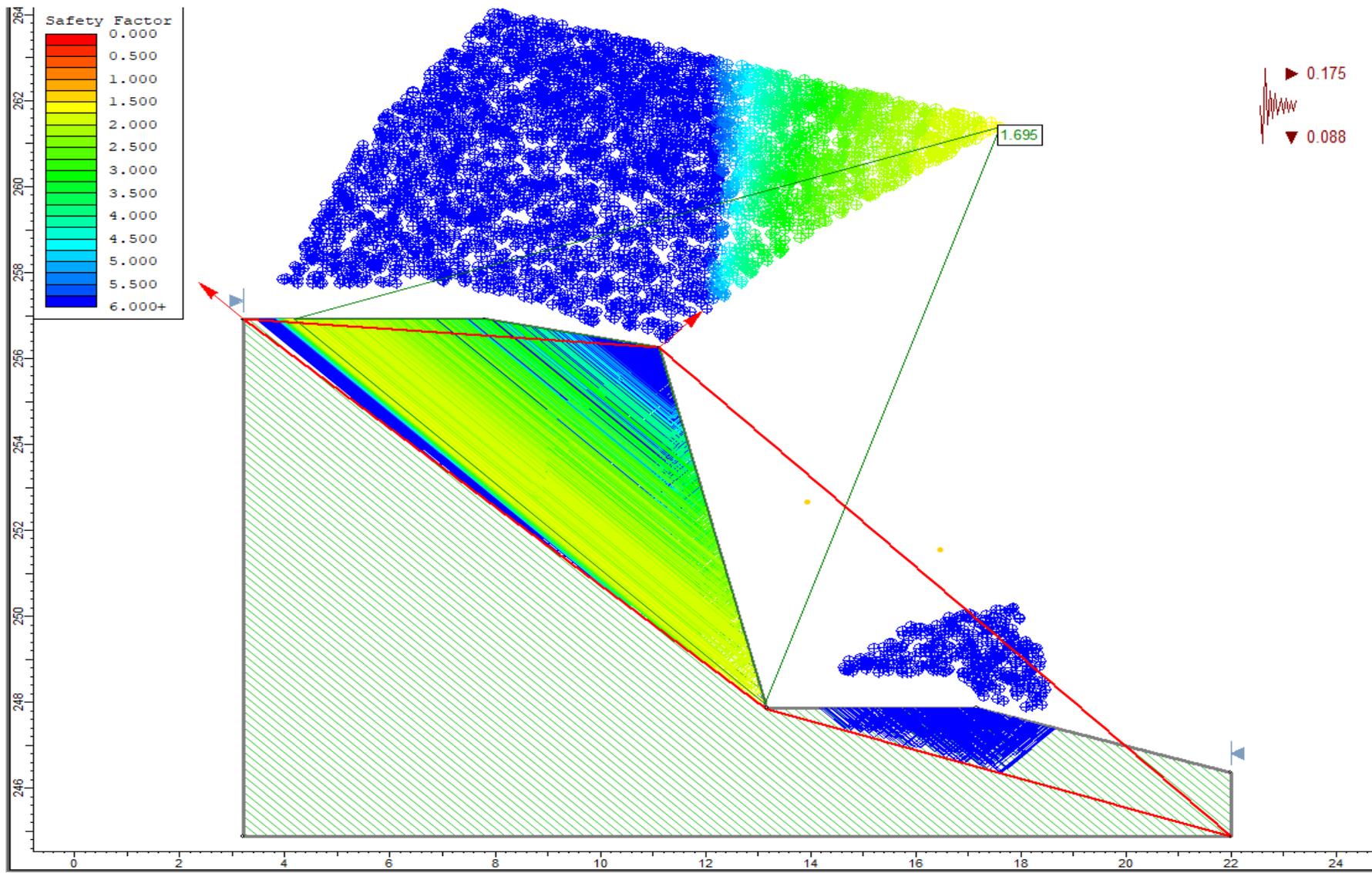


Figura 52. Estación EG-SM-C 03, Factor de Seguridad (1.695) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

3.9.4 Estación geotécnica EG-SM-C 04

El talud se encuentra en la progresiva 15+910 km de la carretera San Marcos- Cajabamba, está conformado por areniscas y arcillolitas de la Formación Carhuaz (Ki-Ca). El macizo rocoso tiene un grado de meteorización alto y fracturamiento alto, posee 3 familias de discontinuidades, se registró un total de 285 discontinuidades en 15.10 m lineales. En cuanto a la geometría del talud tiene un ángulo de 62° y una altura de 18 m. (ver Fotografía 19).

				GEOMETRÍA DEL TALUD	
				ALTURA	18 m.
				PIE	8 m.
				DIP	62°
				DD	211°
				CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO	
				METEORIZACION	Alta
				GRADO DE FRACTURAMIENTO	Alto
				RQD	43.73
				GSI	45.86
				N° DISCONTINUIDADES	285
				LONGITUD	15.10 m.
ESTE	NORTE	COTA	LITOLOGIA/FORMACIÓN		
818088	9178611	2447	ARENISCAS-ARCILLOLITAS/ FM CARHUAZ		

Fotografía 19. Estación EG-SM-C 04 areniscas rojizas intercaladas con lutitas grises de la Formación Carhuaz (Ki- Ca).

➤ **Cálculo de Rock Quality Designation (RQD).**

Tabla 27. Cálculo de RQD en la estación EG-SM-C 04 en función de numero discontinuidades (ND) y metros lineales (L).

$RQD = 100e^{-0.11(0.11 + 1)}$ CÁLCULO DEL RQD				
	ND	L(m)		RQD
ECUACIÓN	285	15.10	18.874	43.73

➤ **Cálculo de Geological Strength Index (GSI)**

Tabla 28. Estimación del GSI de la estación EG-SM-C 04 en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI, 1989).

ESTIMACIÓN DEL GSI					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$		CÁLCULO DEL RQD			
ND	L(m)				RQD
285	15.10		18.874		43.73
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI 1989					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	JCOND89
6	1	1	0	5	13
GSI=1.5JCOND89 + RQD/2				41.37	
GSI				41.37	

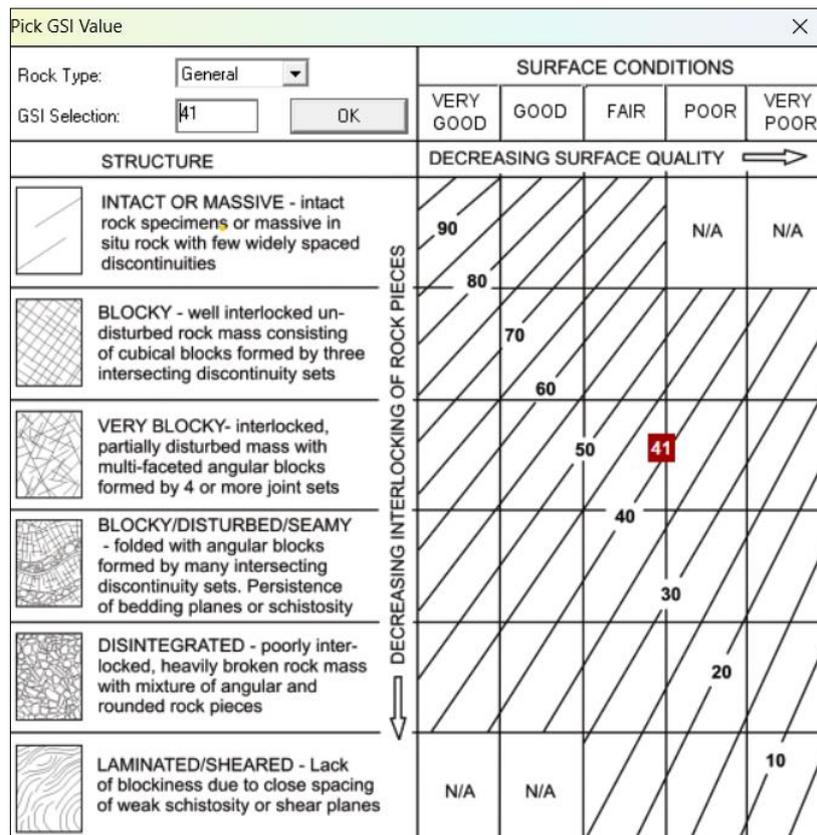


Figura 53. GSI=41 de la estación EG-SM-C 04, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0.

Analysis of Rock Strength EG-SM-C 04 using RocData

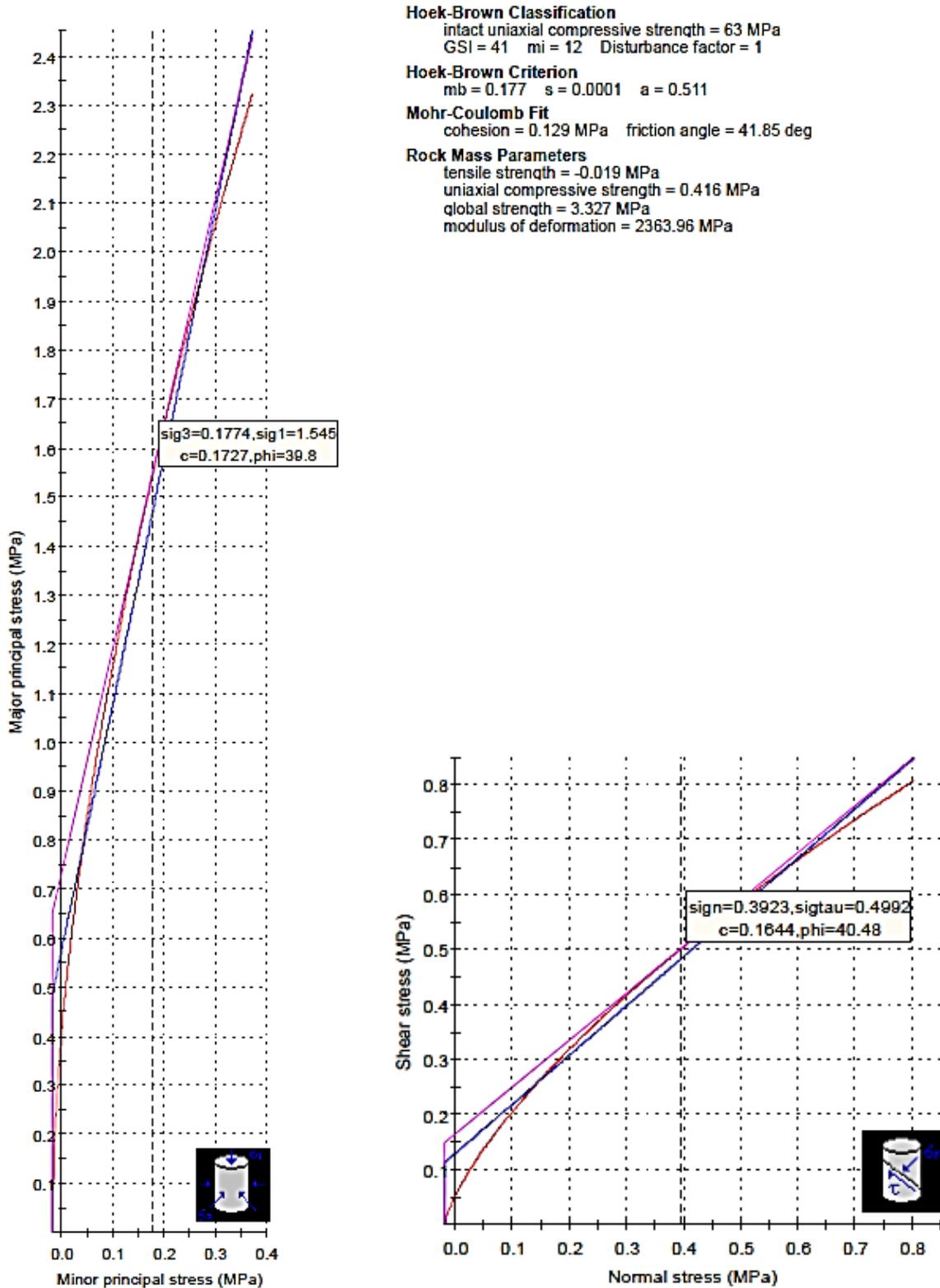
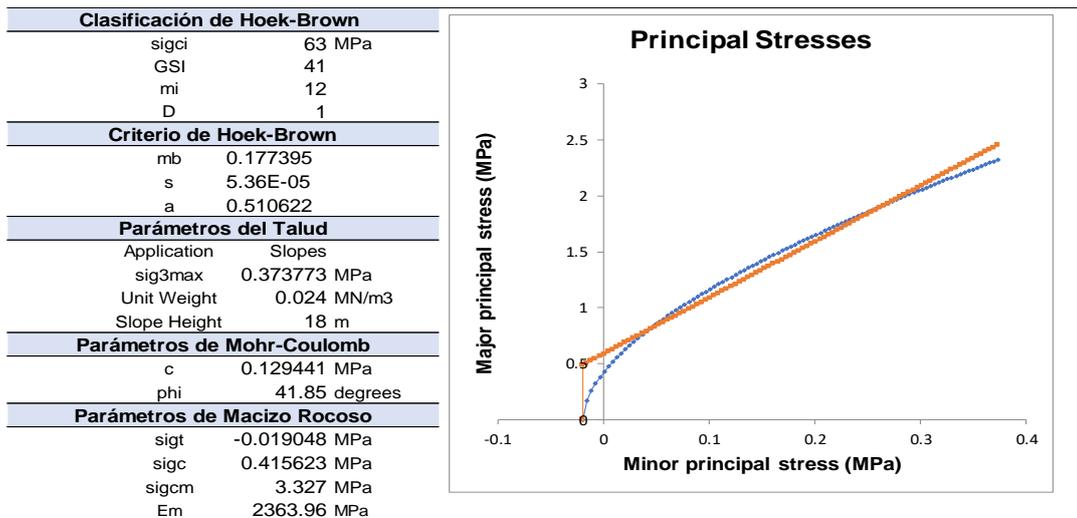


Figura 54. Análisis de la resistencia de macizo rocoso de la estación EG-SM-C 04 utilizando RocData y Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo – E. de Corte (derecha) de las areniscas de la Fm. Carhuaz para cálculo de cohesión, ángulo de fricción y parámetros de Hoek-Brown.

Tabla 29. Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 04.



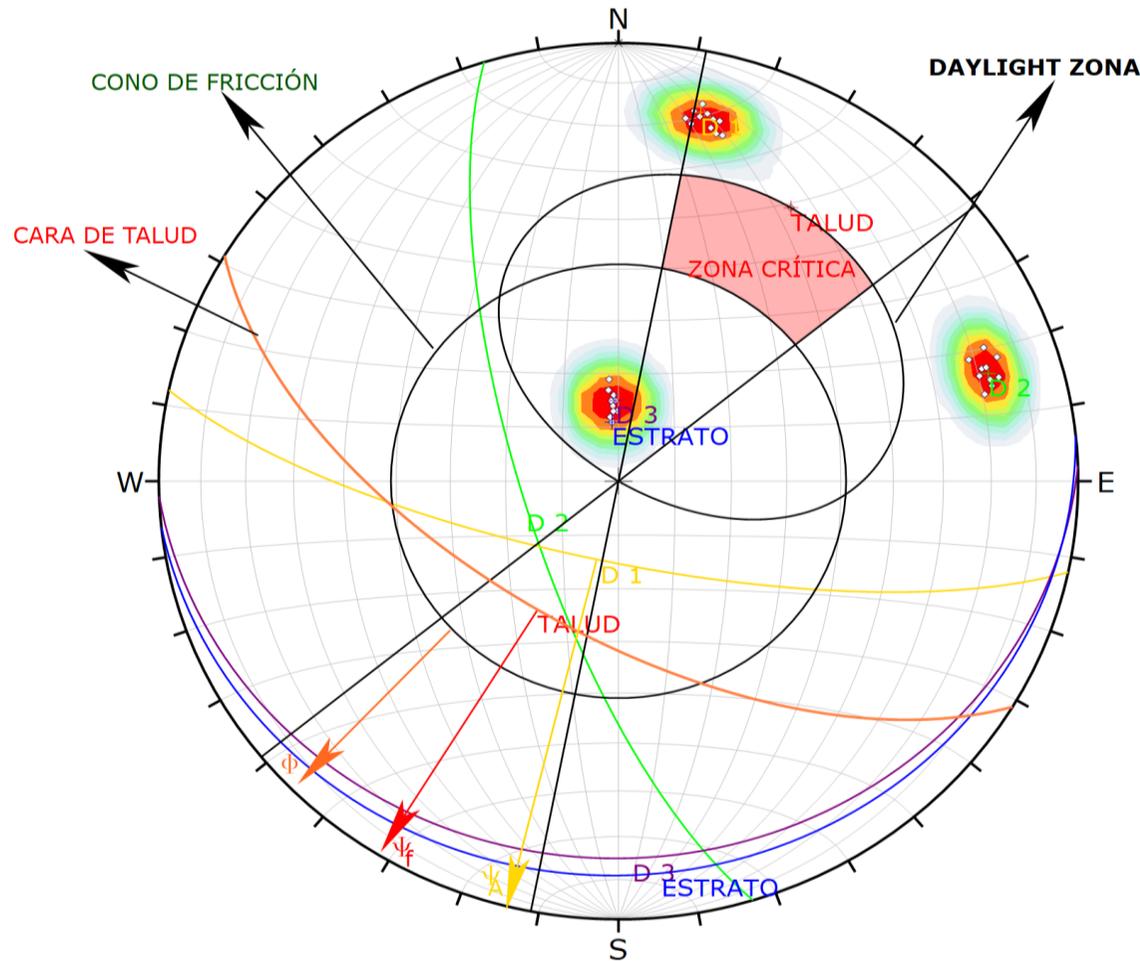
➤ **Cálculo de RMR_{89}**

Tabla 30. Valor de RMR_{89} para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 04.

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES					
1	Resistencia de Roca intacta	Ensayo carga puntual	>10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Compresión simple (MPa)
		Compresión simple	>250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5 – 25 1 – 5 < 1 MPa MPa MPa
	VALOR		15	12	7	4	2 1 0
2	RQD		90 – 100 %	75 – 90 %	50 – 75 %	25 – 50%	< 25%
	VALOR		20	17	12	8	3
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0.6 – 2 m	0.2 – 0.6 m	0.06 – 0.2 m	< 0.06 m
	VALOR		20	15	10	8	5
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m
		VALOR	6	4	2	1	0
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1 – 1.0mm	1 – 5 mm	> 5 mm
		VALOR	6	5	4	1	0
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
		VALOR	6	5	3	1	0
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm
		VALOR	6	4	2	2	0
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	descompuesta
		VALOR	6	5	3	1	0
	VALOR		30	23	13	6	0
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación presión agua/tensión principal mayor	0	0 – 0.1	0.1 - 0.2	0.2 – 0.5	>0.5
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo
		VALOR	15	10	7	4	0
VALOR TOTAL RMR			48				

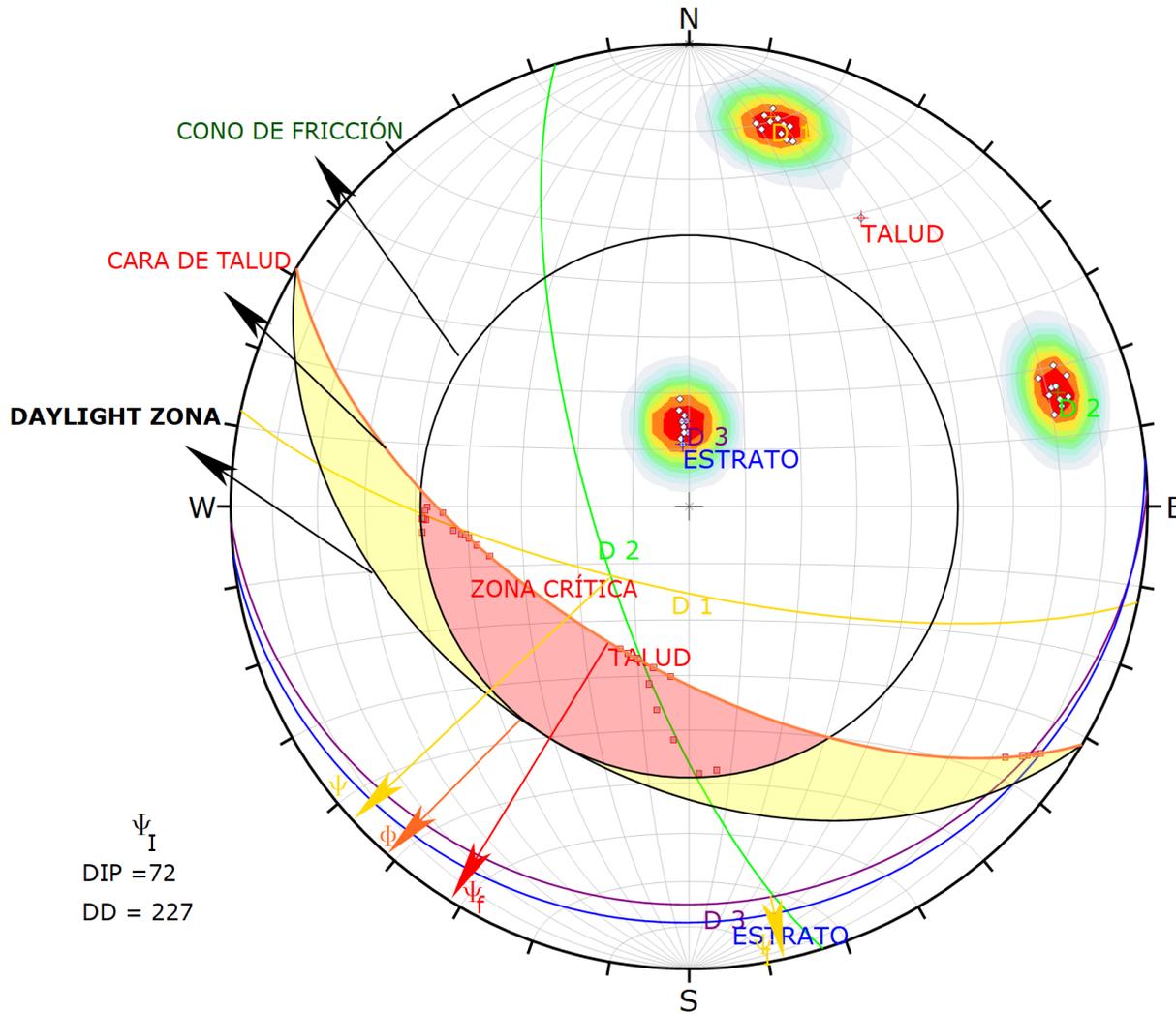
Fuente: Clasificación Geomecánica RMR_{89} . Bieniawski, (1989)

➤ **Análisis Cinemático y Estereográfico DIPS.**



Symbol	TIPO DE ESTRUCTURA	Quantity		
Color	Density Concentrations			
	0.00 - 3.20			
	3.20 - 6.40			
	6.40 - 9.60			
	9.60 - 12.80			
	12.80 - 16.00			
	16.00 - 19.20			
	19.20 - 22.40			
	22.40 - 25.60			
	25.60 - 28.80			
28.80 - 32.00				
Contour Data		Pole Vectors		
Maximum Density		31.33%		
Contour Distribution		Fisher		
Counting Circle Size		1.0%		
Kinematic Analysis		Planar Sliding		
Slope Dip		62		
Slope Dip Direction		211		
Friction Angle		41°		
Lateral Limits		20°		
		Critical	Total	%
Planar Sliding (All)		1	34	2.94%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	73	253	D 2	
2	62	211	TALUD	
3	75	192	D 1	
4	15	178	D 3	
5	11	174	ESTRATO	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		34 (34 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Figura 55. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 04, indicando una probabilidad de falla de 2.94 %.



Symbol	TIPO DE ESTRUCTURA	Quantity
Symbol	Feature	
■	Critical Intersection	

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.20
	3.20 - 6.40
	6.40 - 9.60
	9.60 - 12.80
	12.80 - 16.00
	16.00 - 19.20
	19.20 - 22.40
	22.40 - 25.60
	25.60 - 28.80
	28.80 - 32.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	31.33%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	62
Slope Dip Direction	211
Friction Angle	41°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	34	560	6.07%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	73	253	D 2
2	62	211	TALUD
3	75	192	D 1
4	15	178	D 3
5	11	174	ESTRATO

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	34 (34 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	560
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 56. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 04, indicando una probabilidad de falla de 6.07 %.

➤ **Análisis y cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide V.6.0**

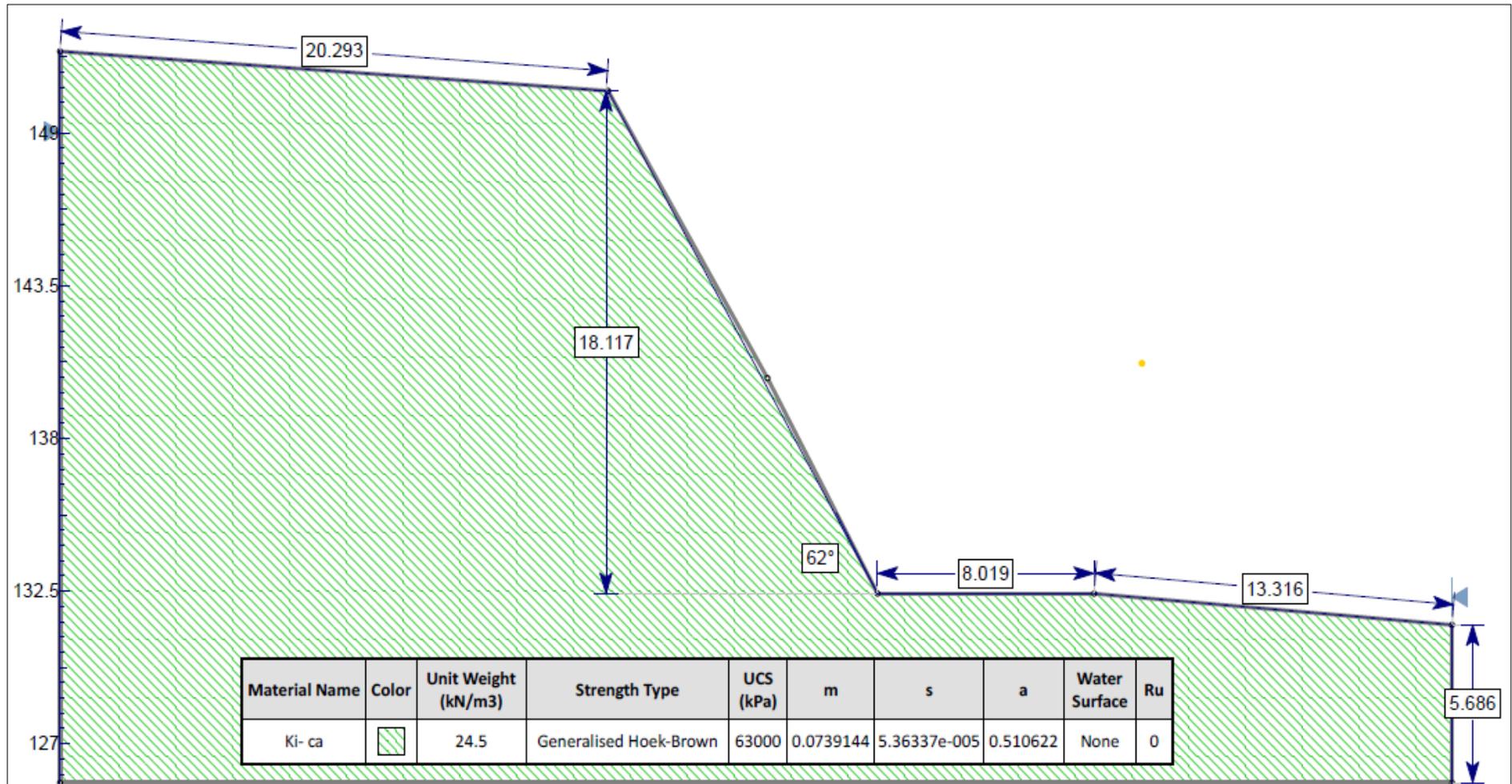


Figura 57. Estación EG-SM-C 04, dimensiones y propiedades del del talud.

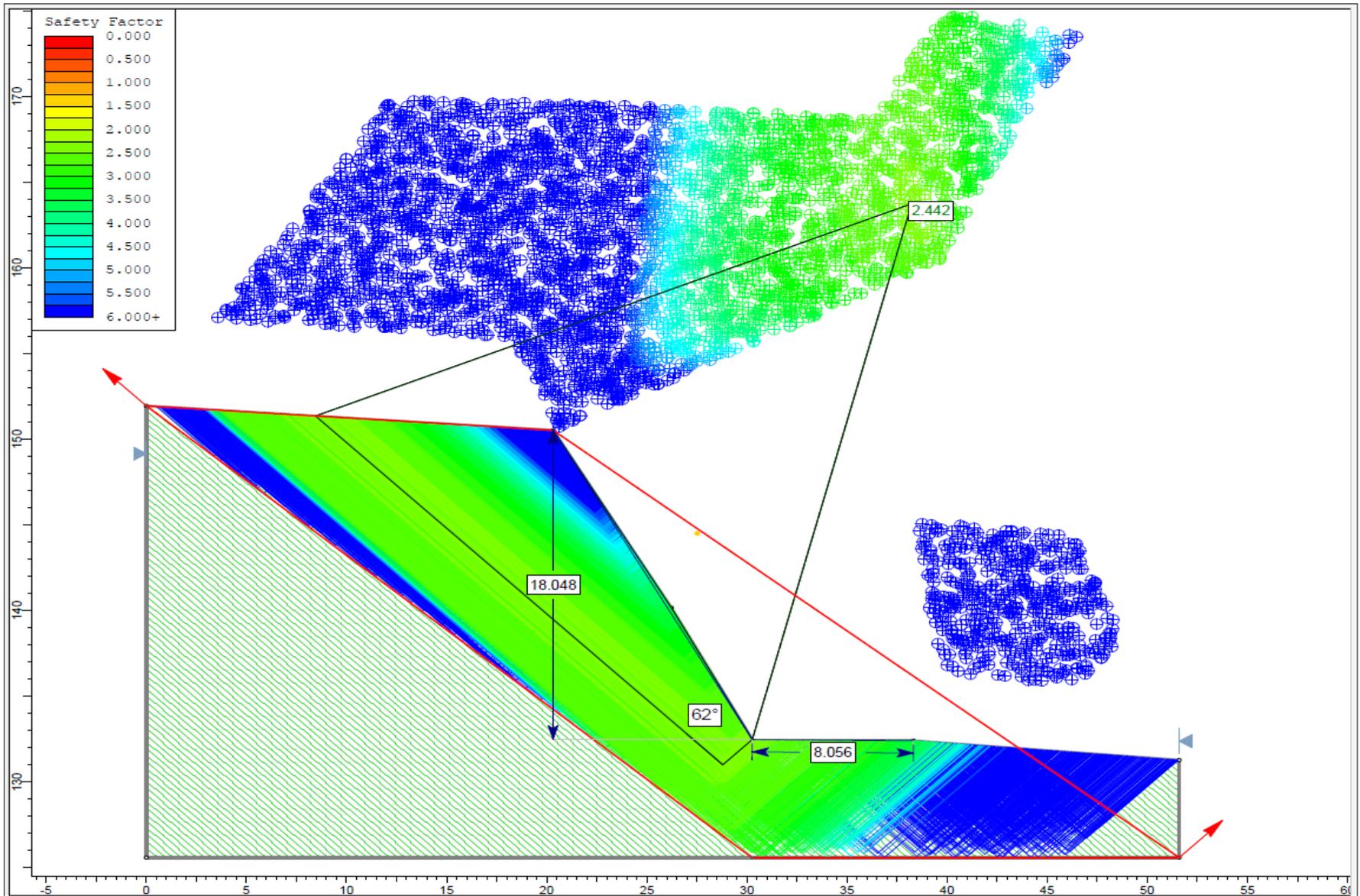


Figura 58. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (2.442) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

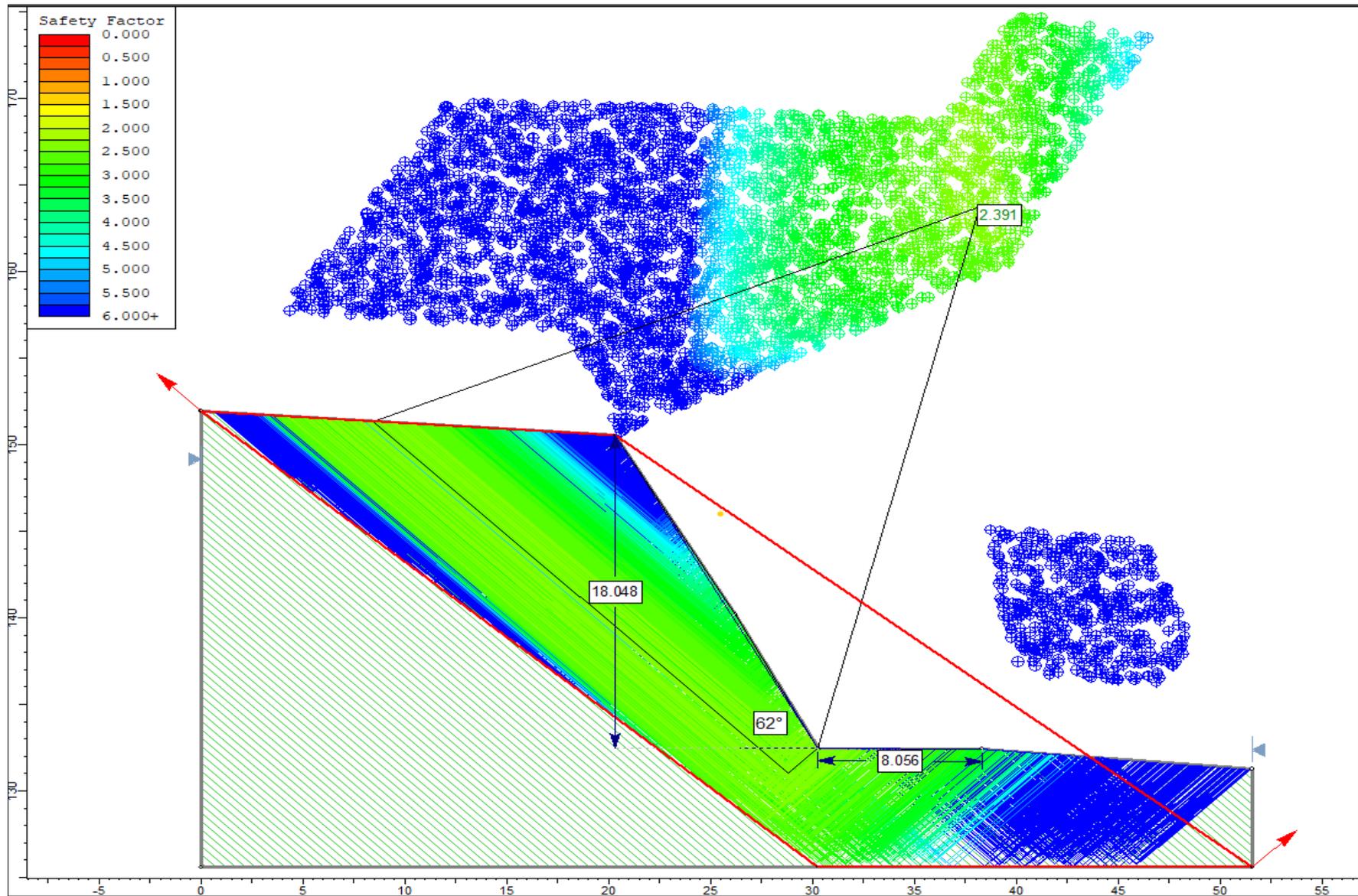


Figura 59. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (2.391) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

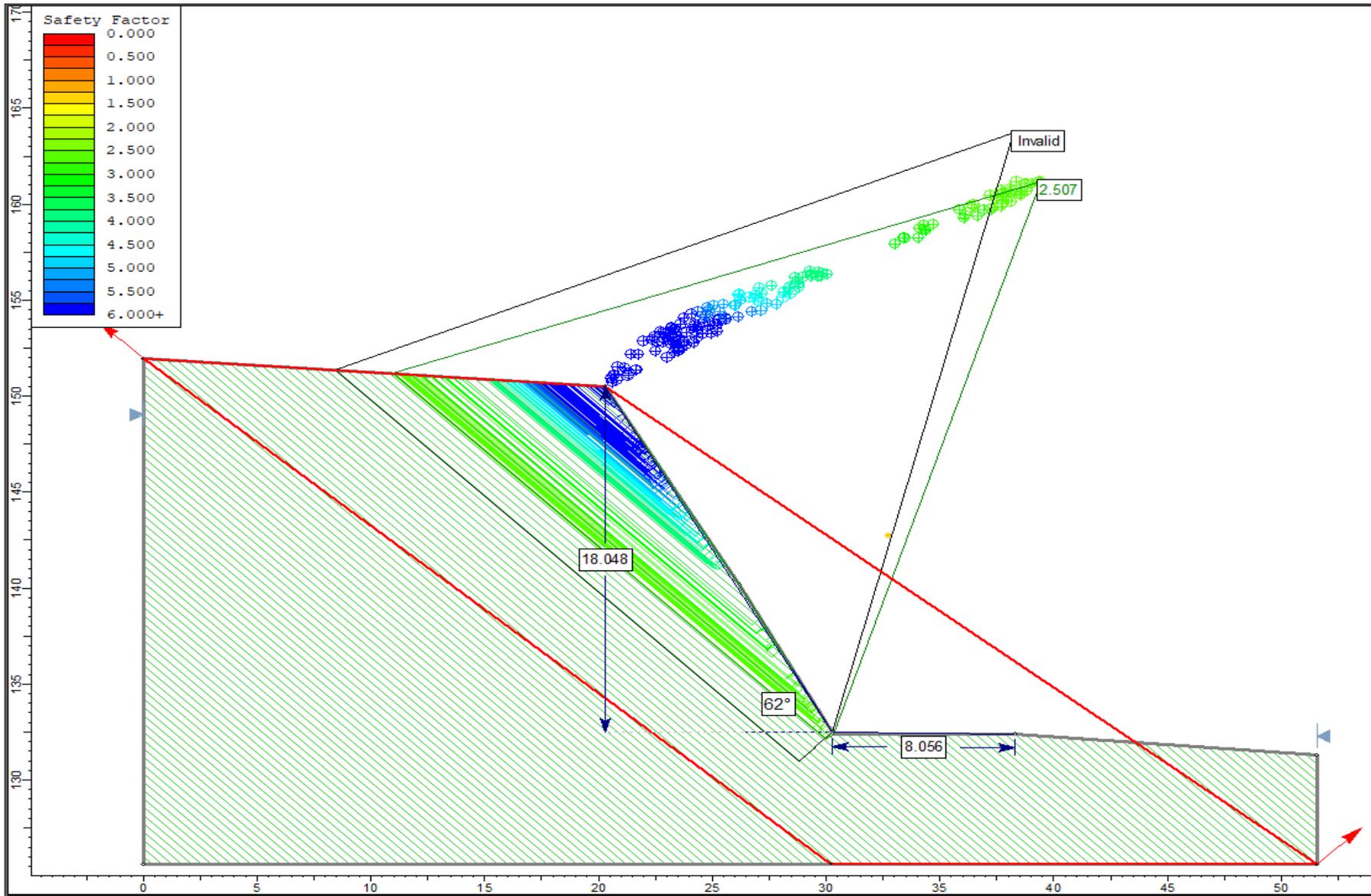


Figura 60. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (2.507) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.

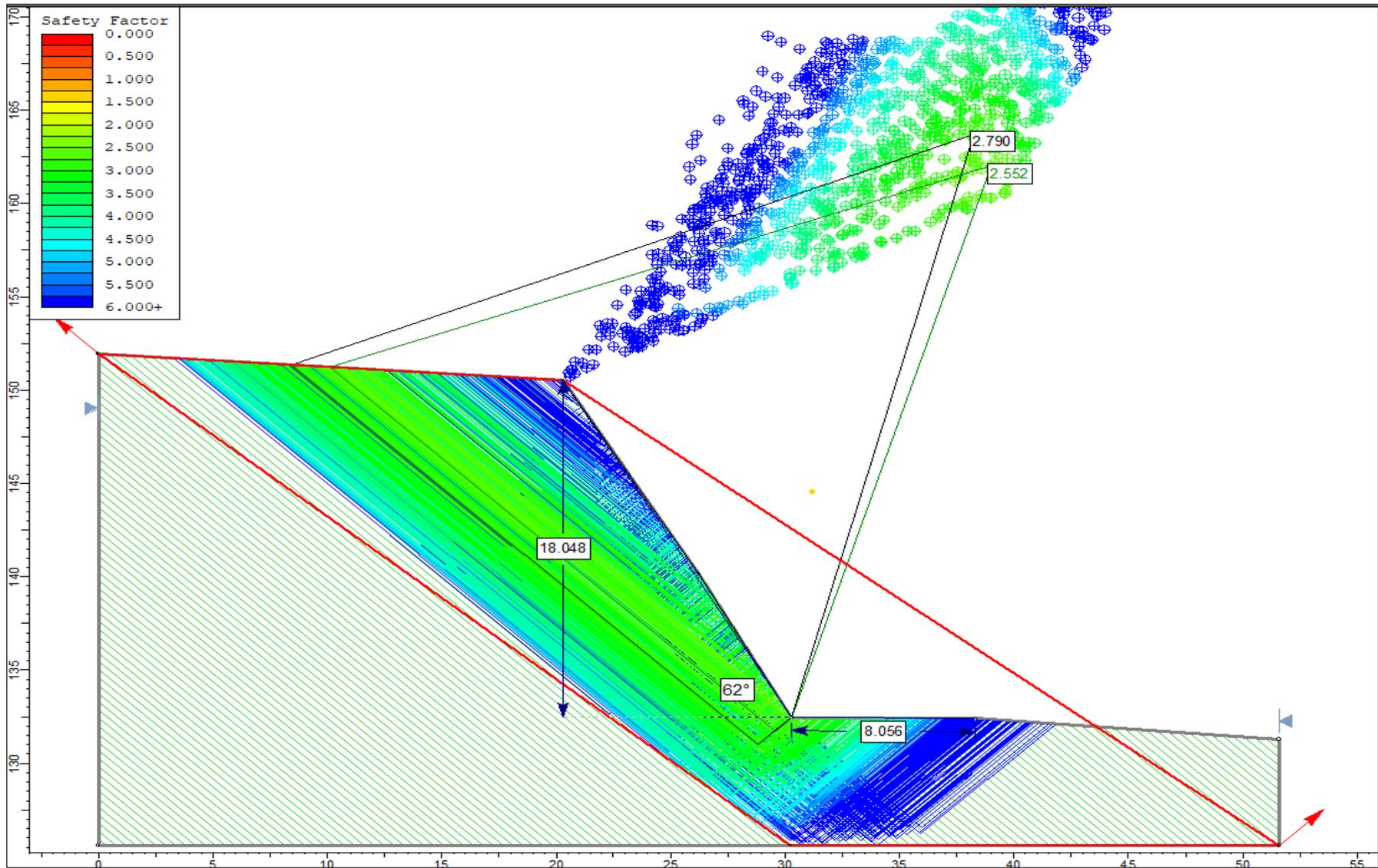


Figura 61. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (2.552; 2790) por Método de GLE/ Morgenstern Price en condiciones de Tensiones Totales.

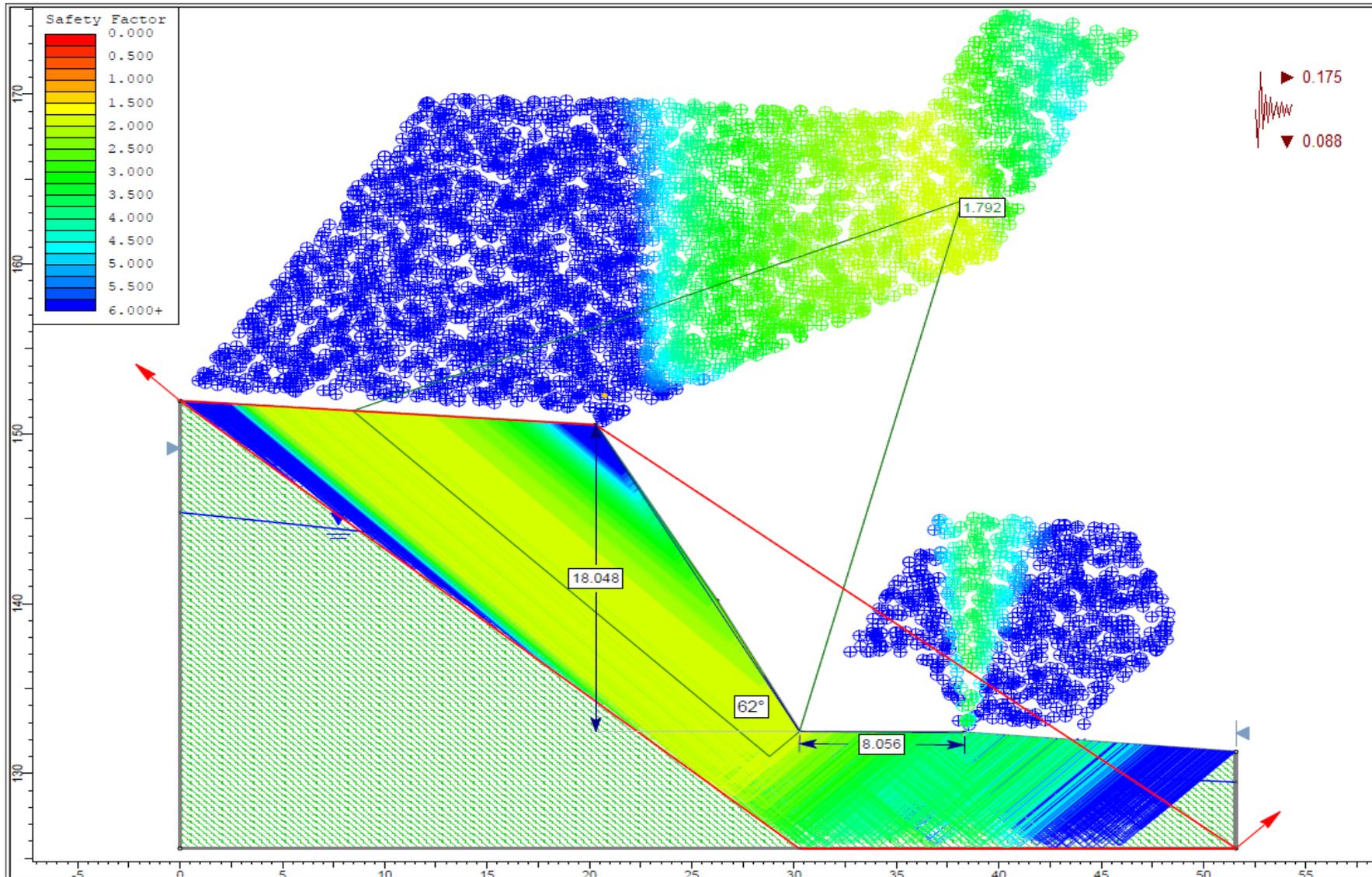


Figura 62. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (1.792) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

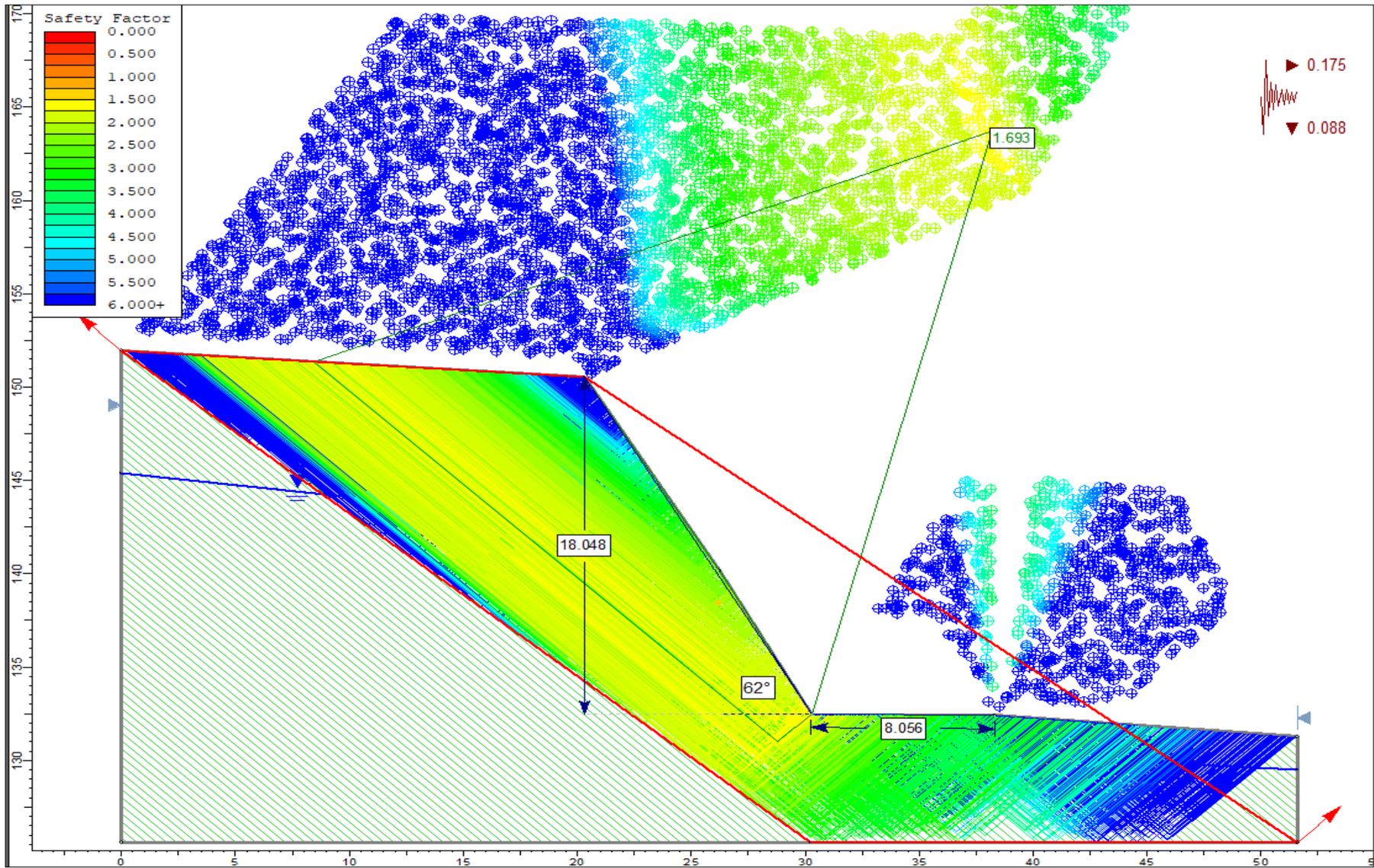


Figura 63. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (1.693) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

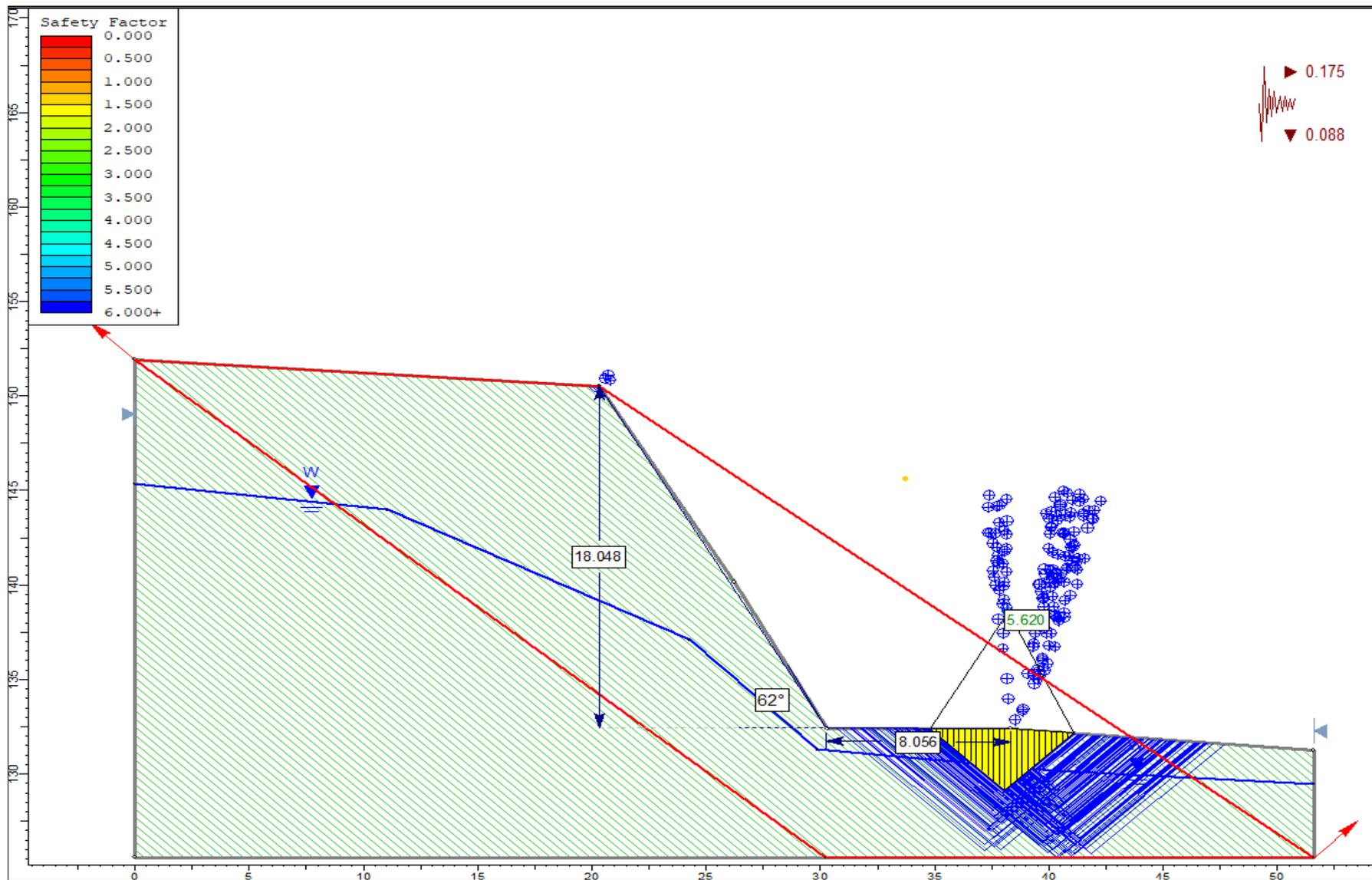


Figura 64. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (5.6) pie de talud por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

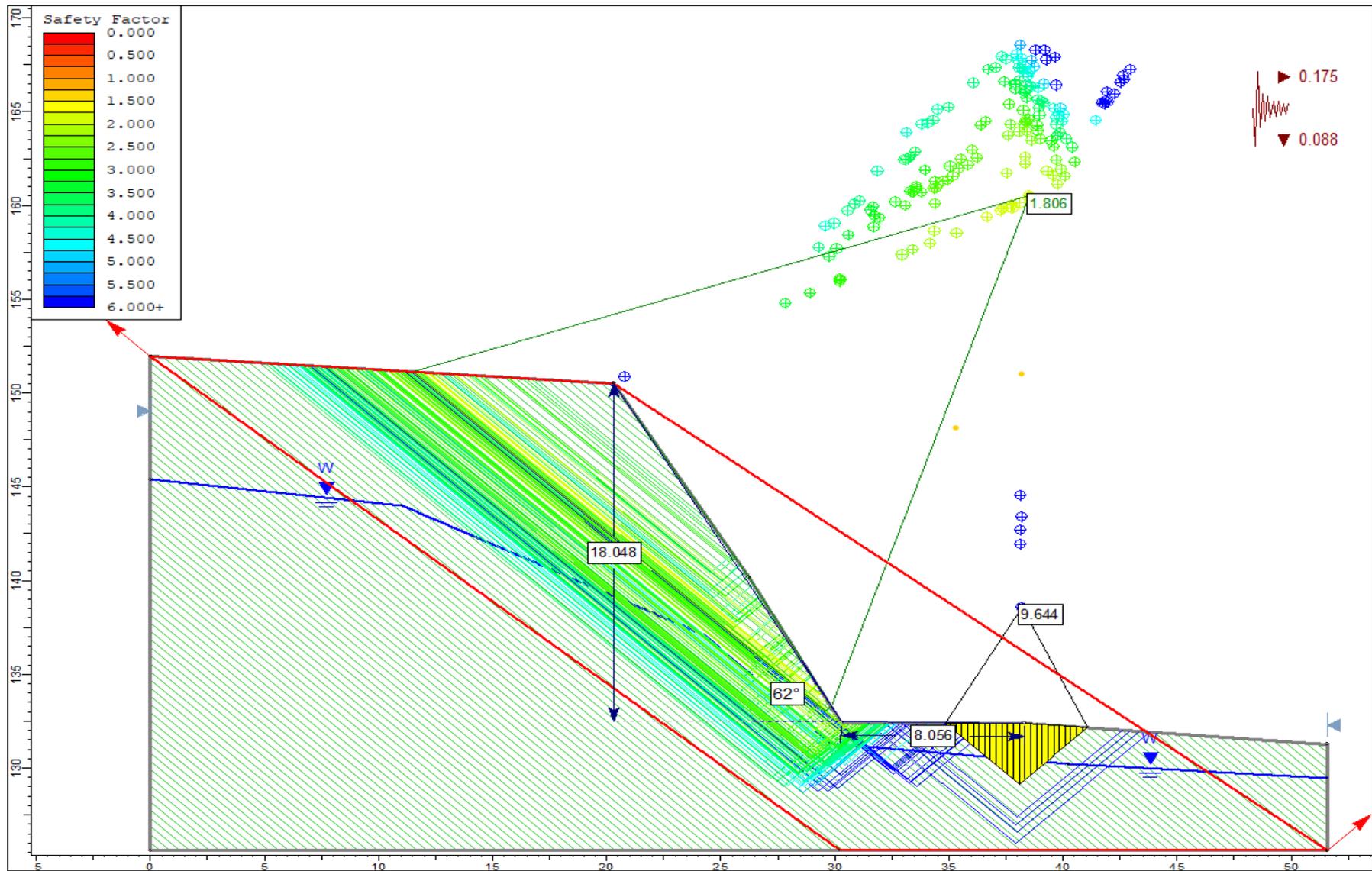
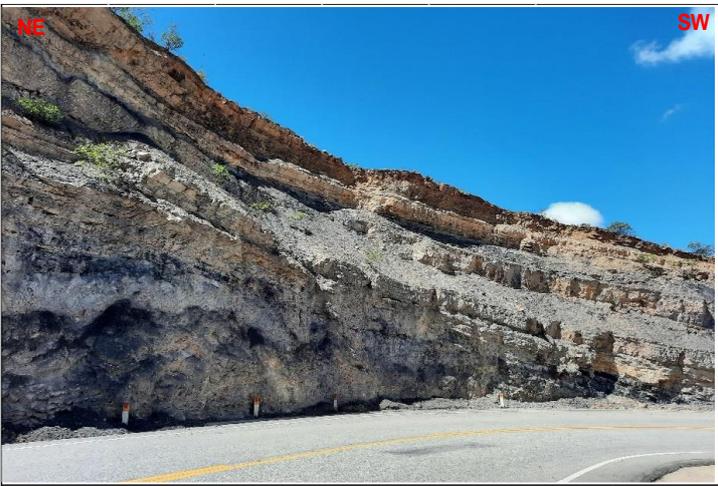


Figura 65. Estación EG-SM-C 04, Factor de Seguridad (1.806) pie de talud por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

3.9.5 Estación geotécnica EG-SM-C 05

El talud se encuentra en la progresiva 17+310 km de la carretera San Marcos- Cajabamba, está conformado por areniscas blancas y arcillolitas grises de la Formación Carhuaz (Ki-Ca) en la parte superior y areniscas calcáreas intercaladas con lutitas grises de la Formación Santa (Ki-sa). El macizo rocoso tiene un grado de meteorización alto y fracturamiento alto, posee 3 familias de discontinuidades, se registró un total de 227 discontinuidades en 18.20 m lineales. En cuanto a la geometría del talud tiene un ángulo de 65° y una altura de 9.5 m. (ver Fotografía 20).

				GEOMETRÍA DEL TALUD									
				ALTURA	9.5 m.								
				PIE	8 m.								
				DIP	65°								
				DD	216°								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">ESTE</th> <th style="text-align: left;">NORTE</th> <th style="text-align: left;">COTA</th> <th style="text-align: left;">LITOLÓGIA/FORMACIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>817876</td> <td>9178413</td> <td>2400</td> <td>ARENISCAS-ARCILLOLITAS/ FM CARHUAZ</td> </tr> </tbody> </table>				ESTE	NORTE	COTA	LITOLÓGIA/FORMACIÓN	817876	9178413	2400	ARENISCAS-ARCILLOLITAS/ FM CARHUAZ	CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO	
				ESTE	NORTE	COTA	LITOLÓGIA/FORMACIÓN						
				817876	9178413	2400	ARENISCAS-ARCILLOLITAS/ FM CARHUAZ						
				METEORIZACION	Alta								
				GRADO DE FRACTURAMIENTO	Alto								
				RQD	64.56								
GSI	41.28												
N° DISCONTINUIDADES	227												
LONGITUD	18.20 m.												

Fotografía 20. Estación EG-SM-C 05 areniscas blancas y arcillolitas grises de la Formación Carhuaz (Ki-Ca) en la parte superior y areniscas calcáreas intercaladas con lutitas grises de la Formación Santa (Ki-sa), en la progresiva 17 + 310 Km de la carretera San Marcos- Cajabamba.

➤ **Cálculo de Rock Quality Designation (RQD).**

Tabla 31. Cálculo de RQD en función de número de discontinuidades (ND) y metros lineales (L), estación EG-SM-C 05.

$RQD = 100e^{-0.11L} (0.11L + 1)$ CÁLULO DEL RQD			
	ND	L(m)	RQD
ECUACIÓN	227	18.20	12.473
			64.56

➤ **Cálculo de GSI (Geological Strength Index)**

Tabla 32. Estimación del GSI en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI, 1989).

ESTIMACIÓN DEL GSI					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$		CÁLCULO DEL RQD			
	ND	L(m)	λ		RQD
	227	18.20	12.47		64.56
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI 1989					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND89
2	0	1	0	3	6
GSI=1.5JCOND89 + RQD/2				41.28	
GSI			41.28		

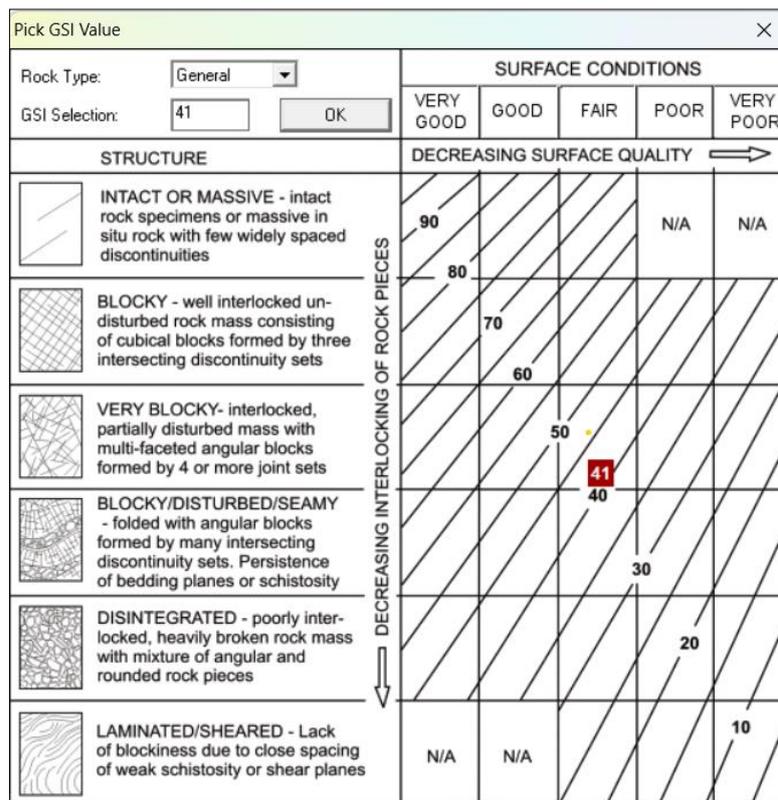


Figura 66. GSI=43 de la estación EG-SM-C 05, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0.

Analysis of Rock Strength using RocData EG-SM-C 05

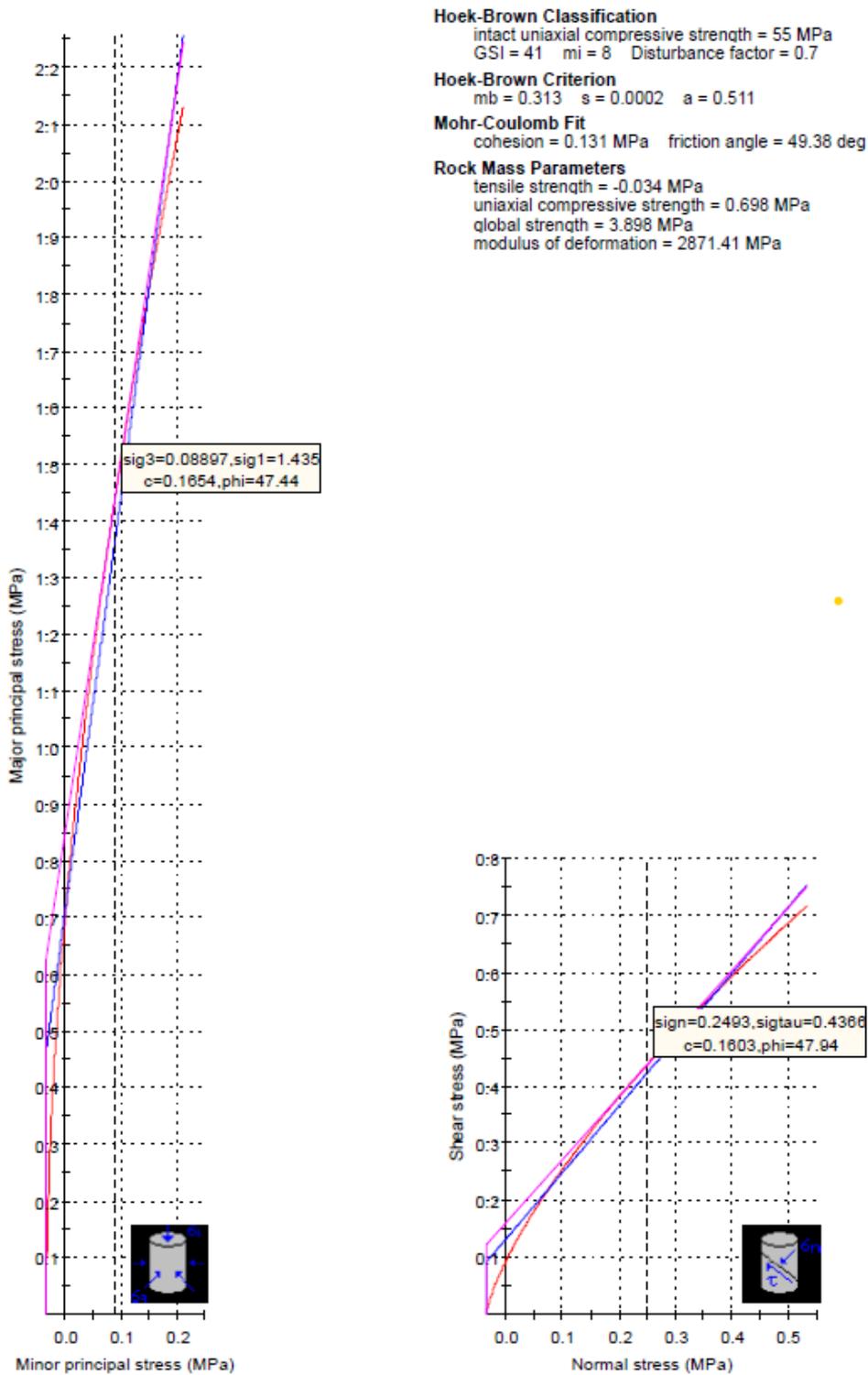


Figura 67. Análisis de la resistencia de macizo rocoso de la estación EG-SM-C 05 utilizando RocData y Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las areniscas de la Fm. Carhuaz para cálculo de cohesión y ángulo de fricción.

Tabla 33. Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 05.

Clasificación de Hoek-Brown	
sigci	55 MPa
GSI	41
mi	8
D	0.7
Criterio de Hoek-Brown	
mb	0.312761
s	0.000193
a	0.510622
Parámetros del Talud	
Application Slopes	
sig3max	0.211946 MPa
Unit Weight	0.024 MN/m3
Slope Height	9.5 m
Parámetros de Mohr-Coulomb	
c	0.131262 MPa
phi	49.38 degrees
Parámetros Macizo rocoso	
sigt	-0.034011 MPa
sigc	0.698478 MPa
sigcm	3.89771 MPa
Em	2871.41 MPa

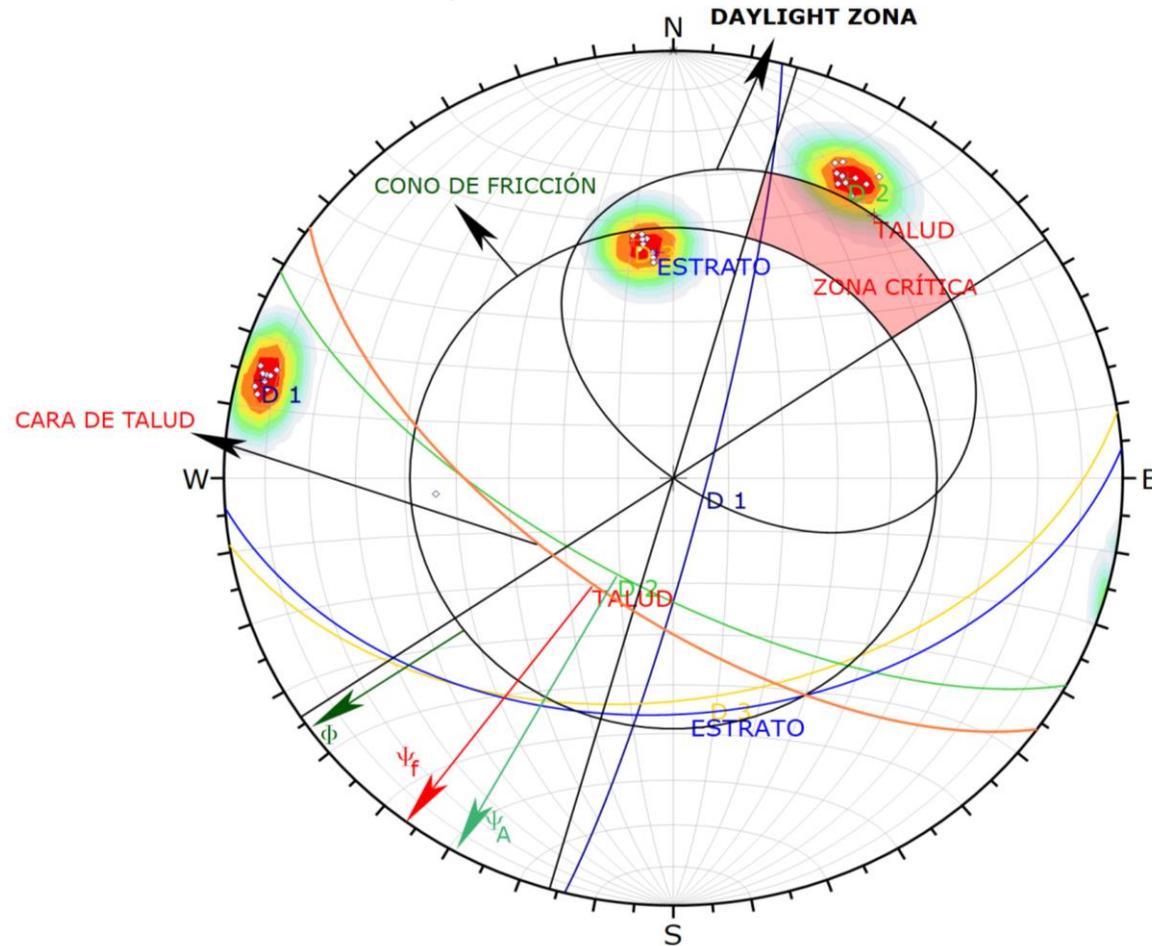
➤ **Cálculo de RMR₈₉**

Tabla 34. Valor de RMR₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 05.

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES					
1	Resistencia de Roca intacta	Ensayo carga puntual	>10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Compresión simple (MPa)
		Compresión simple	>250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5 – 25 MPa 1 – 5 MPa < 1 MPa
	VALOR		15	12	7	4	2 1 0
2	RQD		90 – 100 %	75 – 90 %	50 – 75 %	25 – 50 %	< 25 %
	VALOR		20	17	12	8	3
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0.6 – 2 m	0.2 – 0.6 m	0.06 – 0.2 m	< 0.06 m
	VALOR		20	15	10	8	5
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m
		VALOR	6	4	2	1	0
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1 – 1.0mm	1 – 5 mm	> 5 mm
		VALOR	6	5	4	1	0
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
		VALOR	6	5	3	1	0
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm
		VALOR	6	4	2	2	0
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	descompuesta
		VALOR	6	5	3	1	0
	VALOR	30	23	13	6	0	
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación presión agua/tensión principal mayor	0	0 – 0.1	0.1 - 0.2	0.2 – 0.5	>0.5
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo
		VALOR	15	10	7	4	0
VALOR TOTAL RMR			15	10	43	4	0

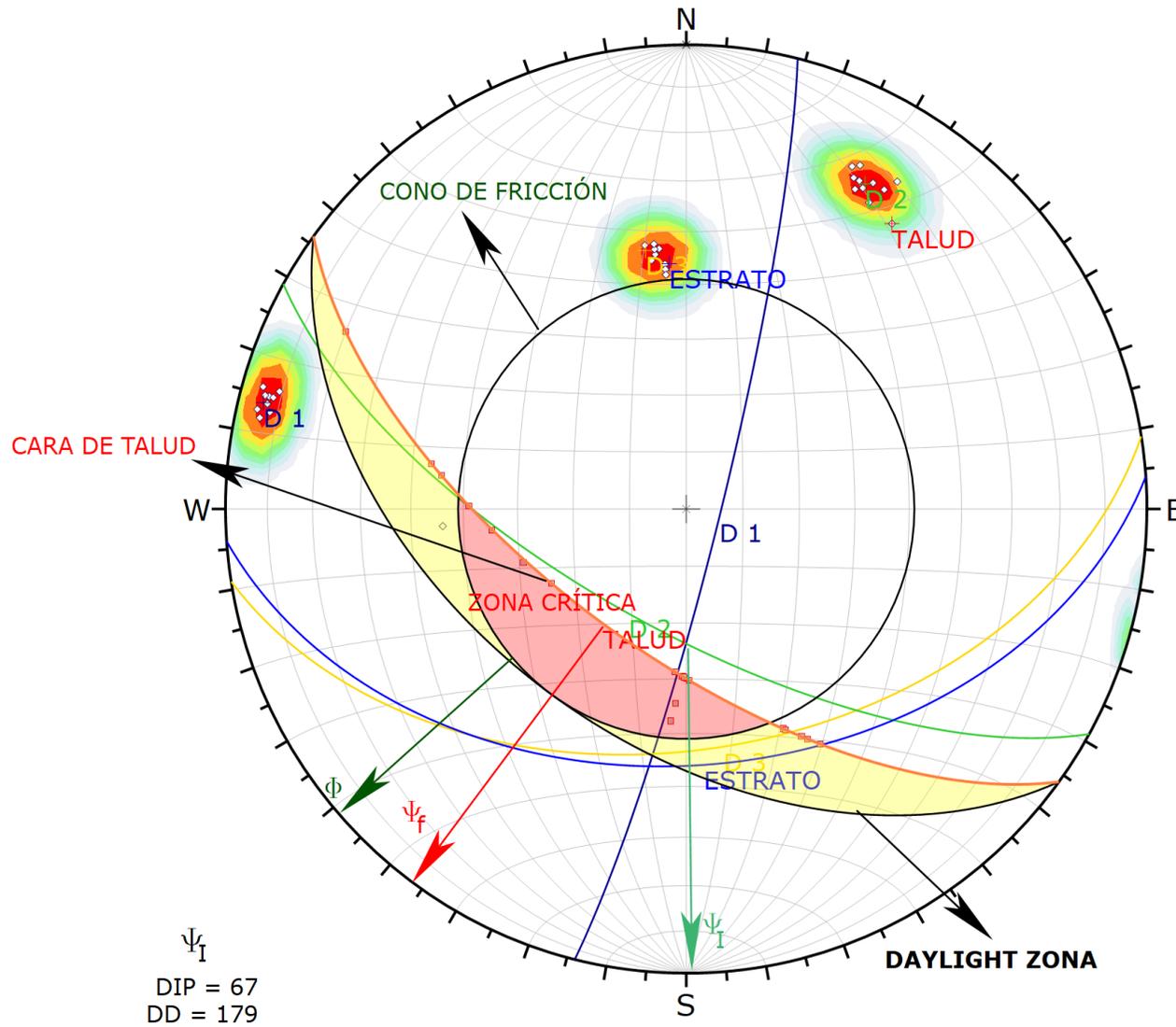
Fuente: Clasificación Geomecánica RMR₈₉. Bieniawski, (1989).

➤ **Análisis Cinemático y Estereográfico DIPS.**



Symbol	TIPO DE ESTRUCTURA	Quantity		
Color	Density Concentrations			
	0.00 - 3.20			
	3.20 - 6.40			
	6.40 - 9.60			
	9.60 - 12.80			
	12.80 - 16.00			
	16.00 - 19.20			
	19.20 - 22.40			
	22.40 - 25.60			
	25.60 - 28.80			
28.80 - 32.00				
Contour Data		Pole Vectors		
Maximum Density		32.00%		
Contour Distribution		Fisher		
Counting Circle Size		1.0%		
Kinematic Analysis		Planar Sliding		
Slope Dip		65		
Slope Dip Direction		216		
Friction Angle		49°		
Lateral Limits		20°		
		Critical	Total	%
Planar Sliding (All)		1	32	3.13%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
User Planes				
1	84	104	D 1	
2	47	171	D 3	
3	69	209	D 2	
4	44	176	ESTRATO	
5	65	216	TALUD	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		32 (32 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Figura 68. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 05, indicando una probabilidad de falla de 3.13 %.



Symbol	TIPO DE ESTRUCTURA	Quantity
Symbol	Feature	
■	Critical Intersection	

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.20
	3.20 - 6.40
	6.40 - 9.60
	9.60 - 12.80
	12.80 - 16.00
	16.00 - 19.20
	19.20 - 22.40
	22.40 - 25.60
	25.60 - 28.80
	28.80 - 32.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	32.00%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	65
Slope Dip Direction	216
Friction Angle	49°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	23	494	4.66%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	84	104	D 1
2	■	47	171	D 3
3	■	69	209	D 2
4	■	44	176	ESTRATO
5	■	65	216	TALUD

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	32 (32 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	494
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 69. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 05, indicando una probabilidad de falla de 4.66 %.

➤ **Análisis y cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide V.6.0**

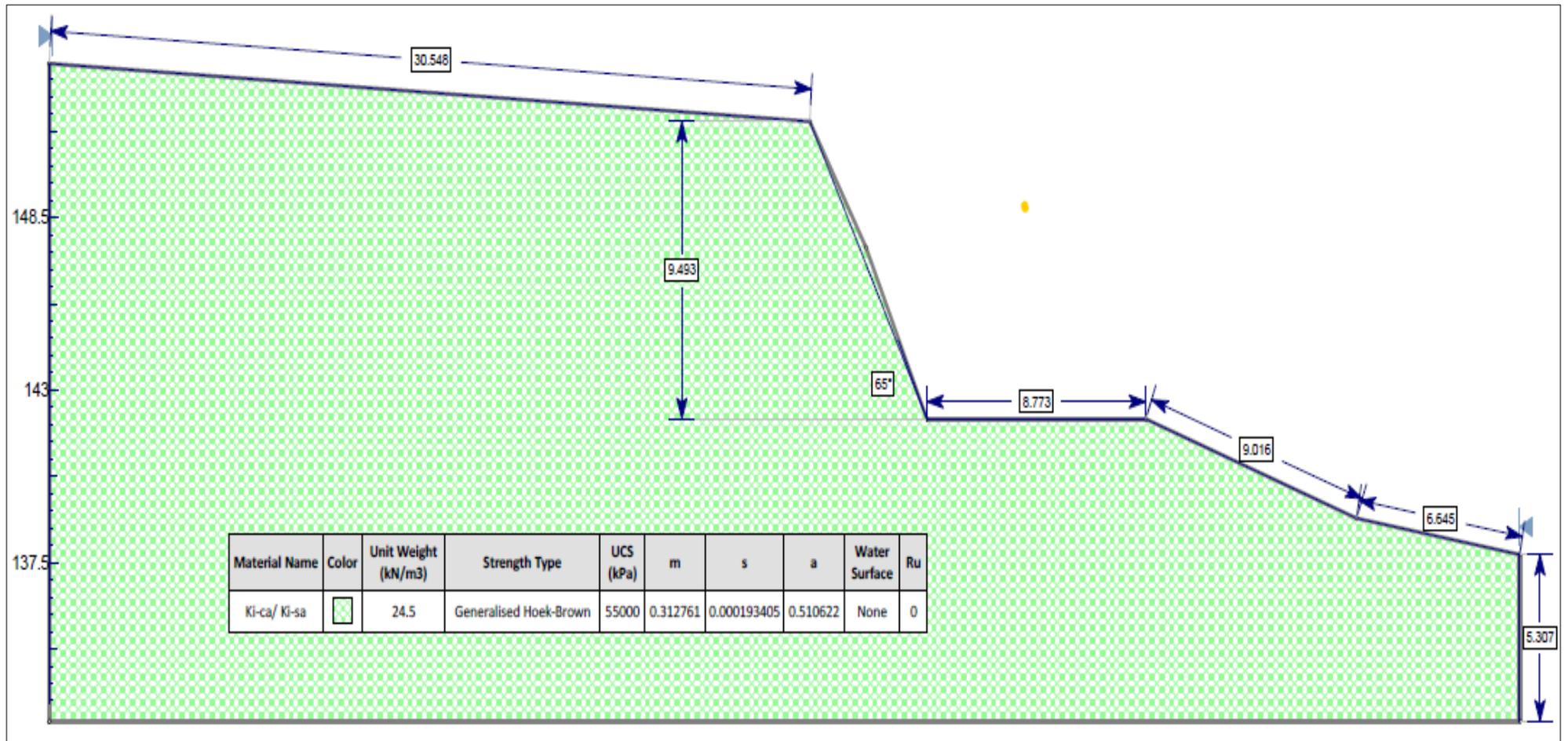


Figura 70. Estación EG-SM-C 05, dimensiones y propiedades del del talud.

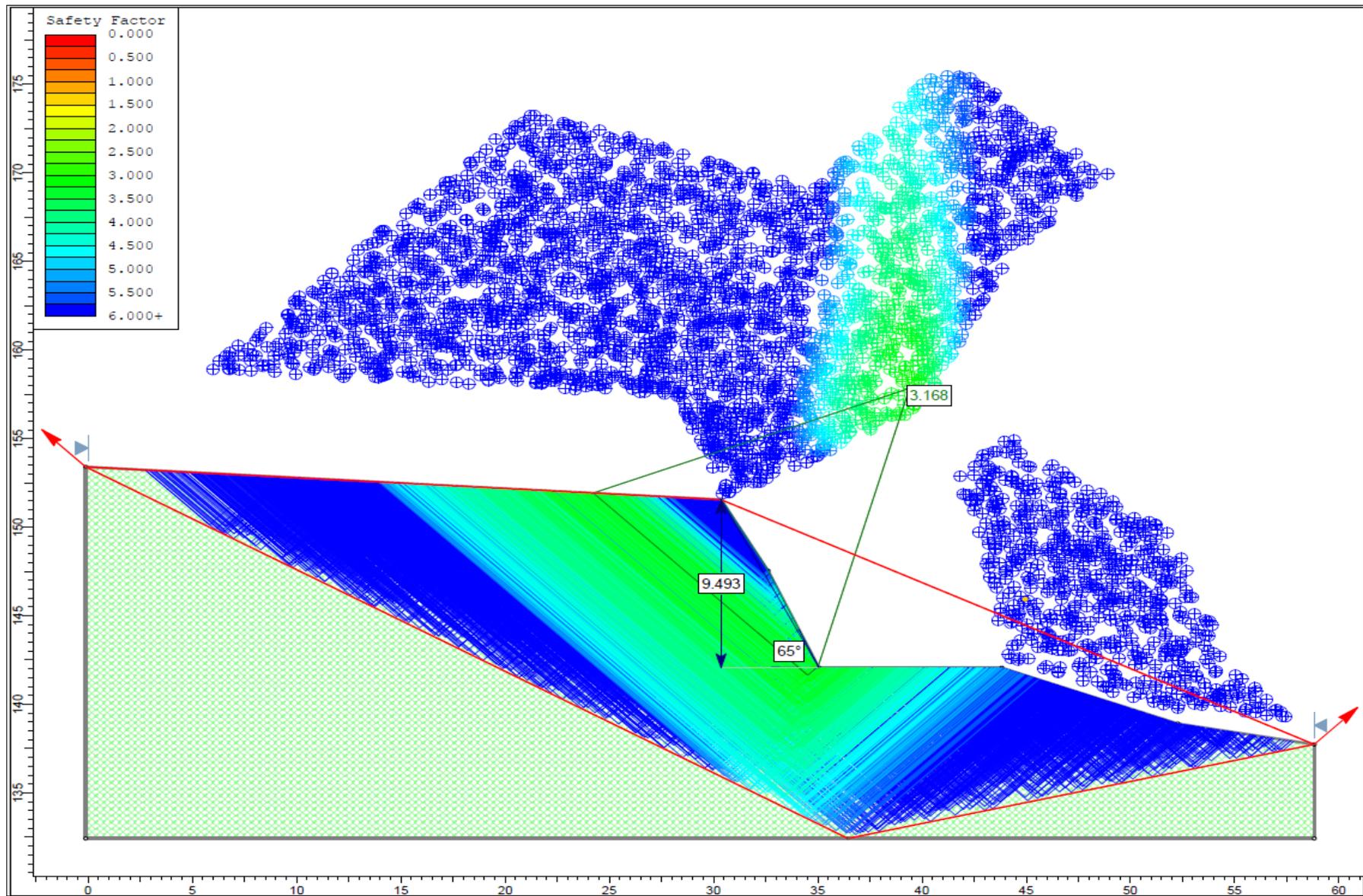


Figura 71. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (3.168) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

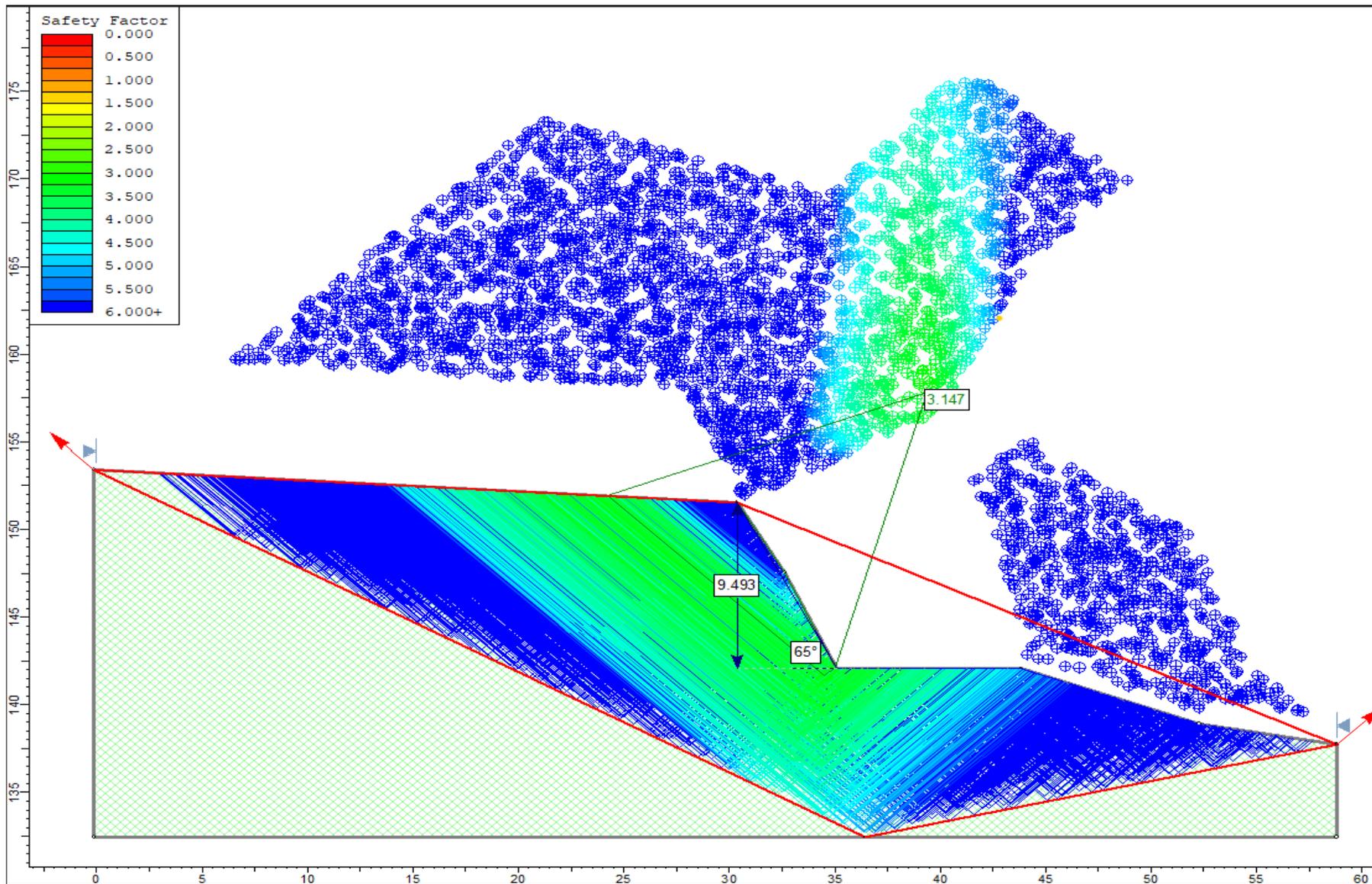


Figura 72. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (3.147) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

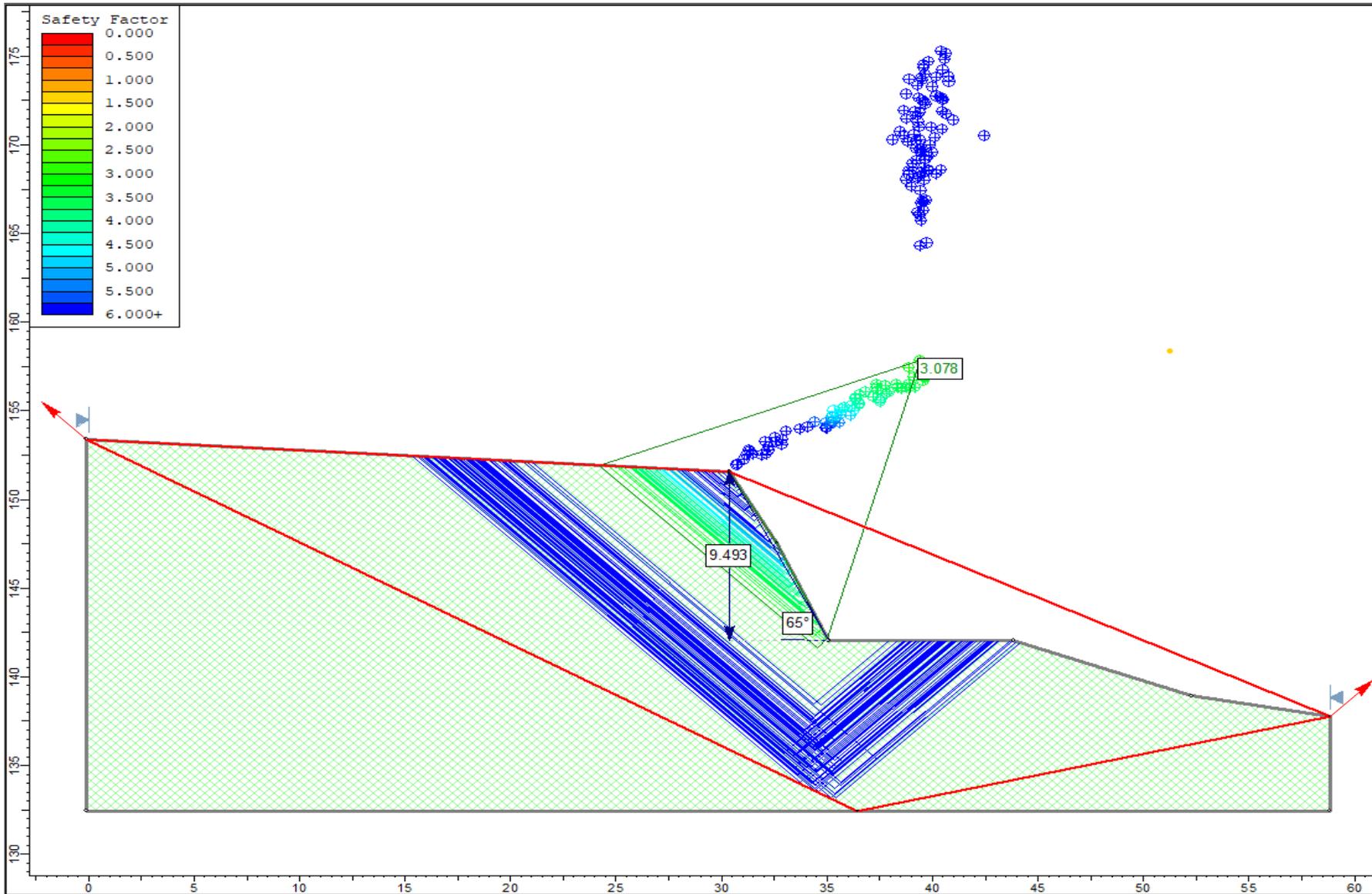


Figura 73. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (3.078) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.

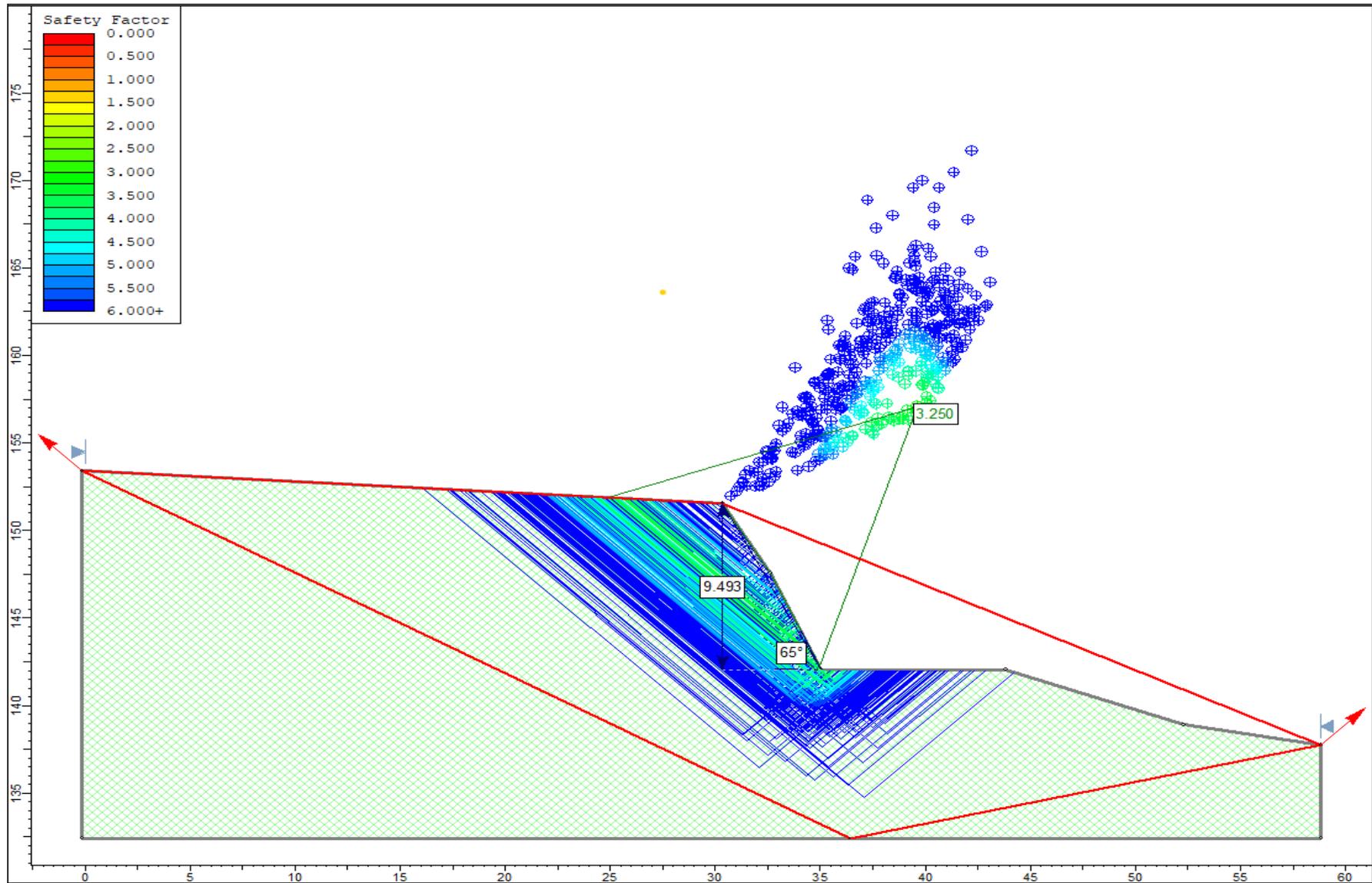


Figura 74. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (3.250) por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.

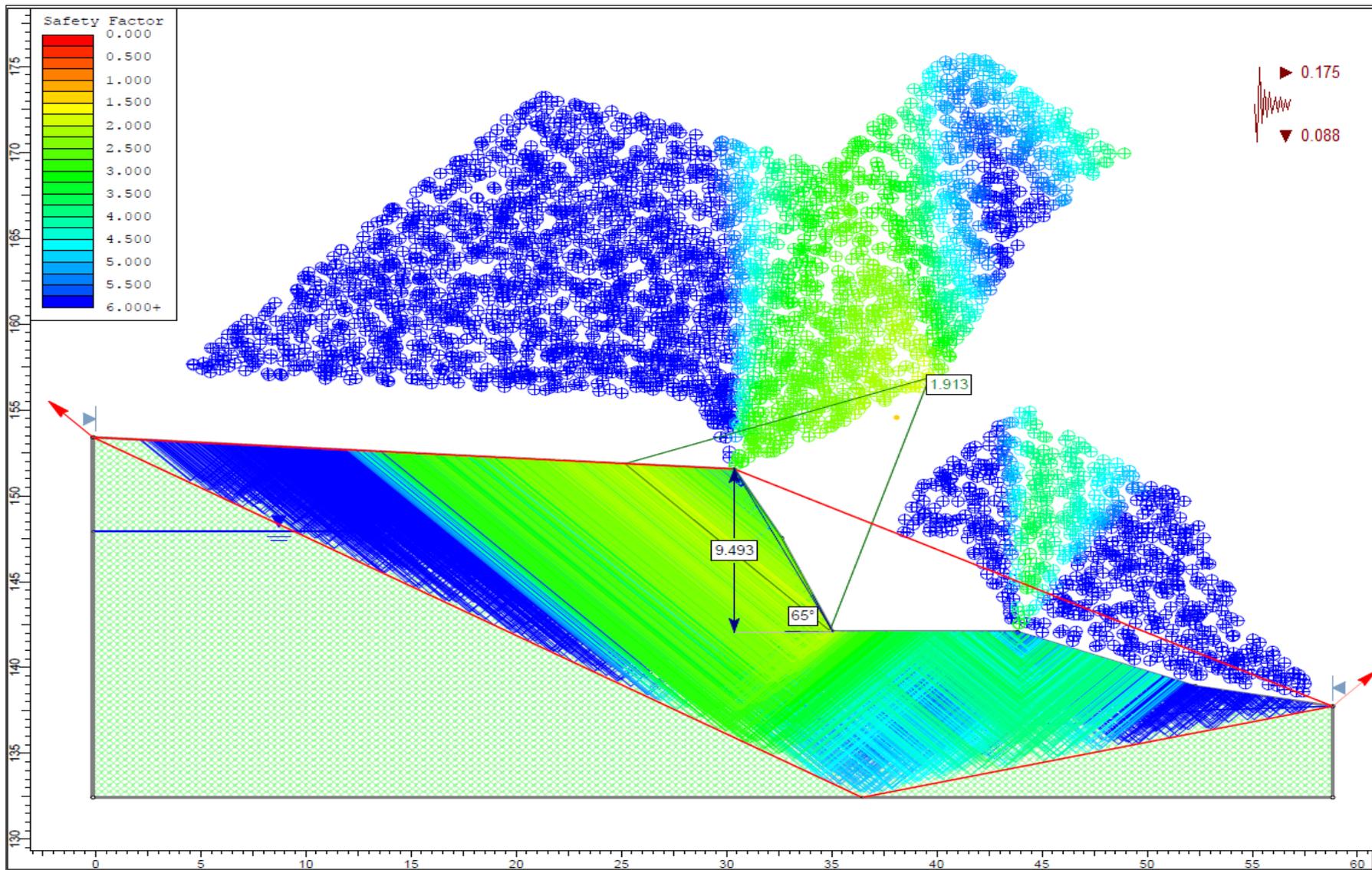


Figura 75. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (1.913) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

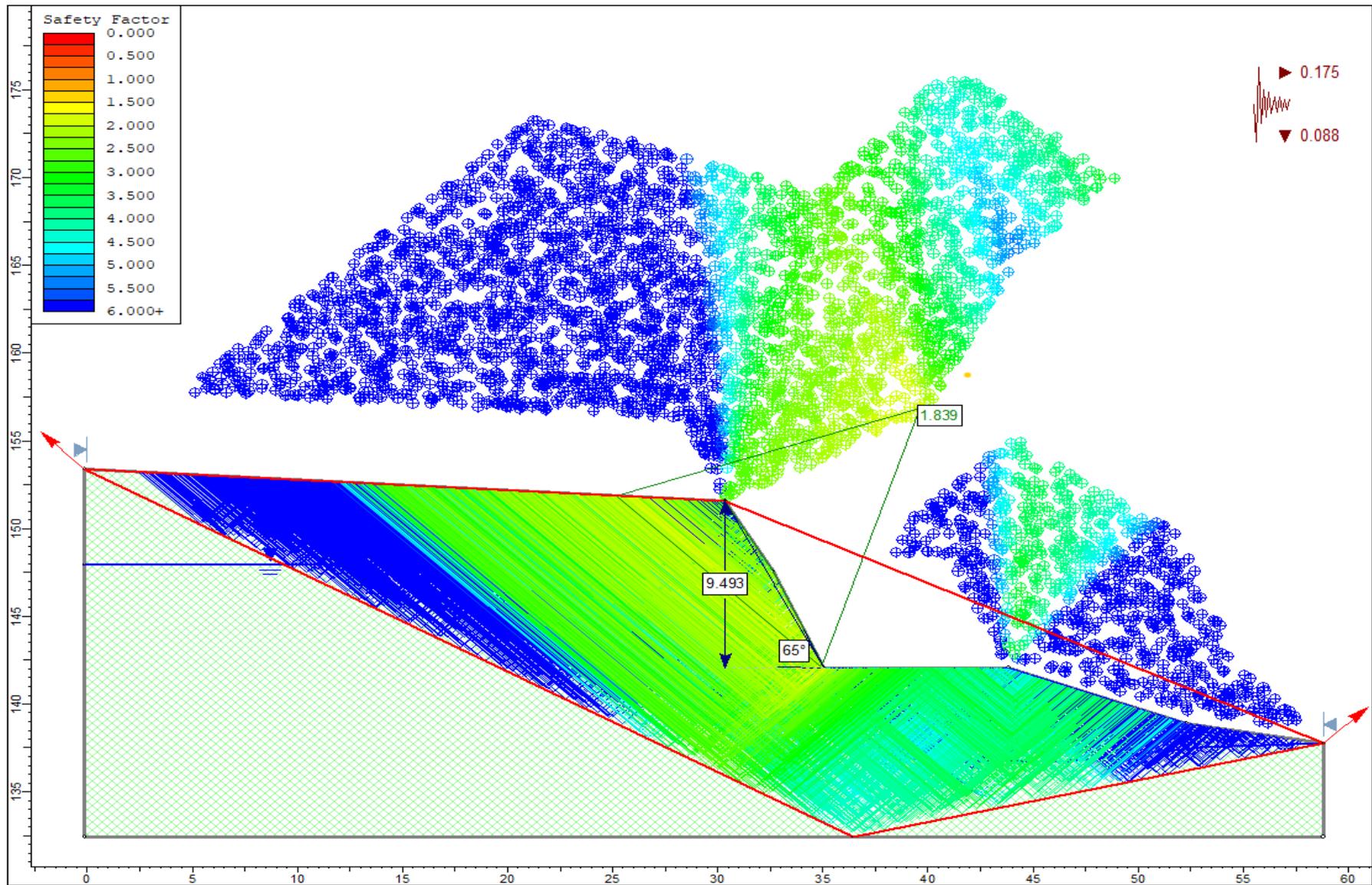


Figura 76. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (1.839) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

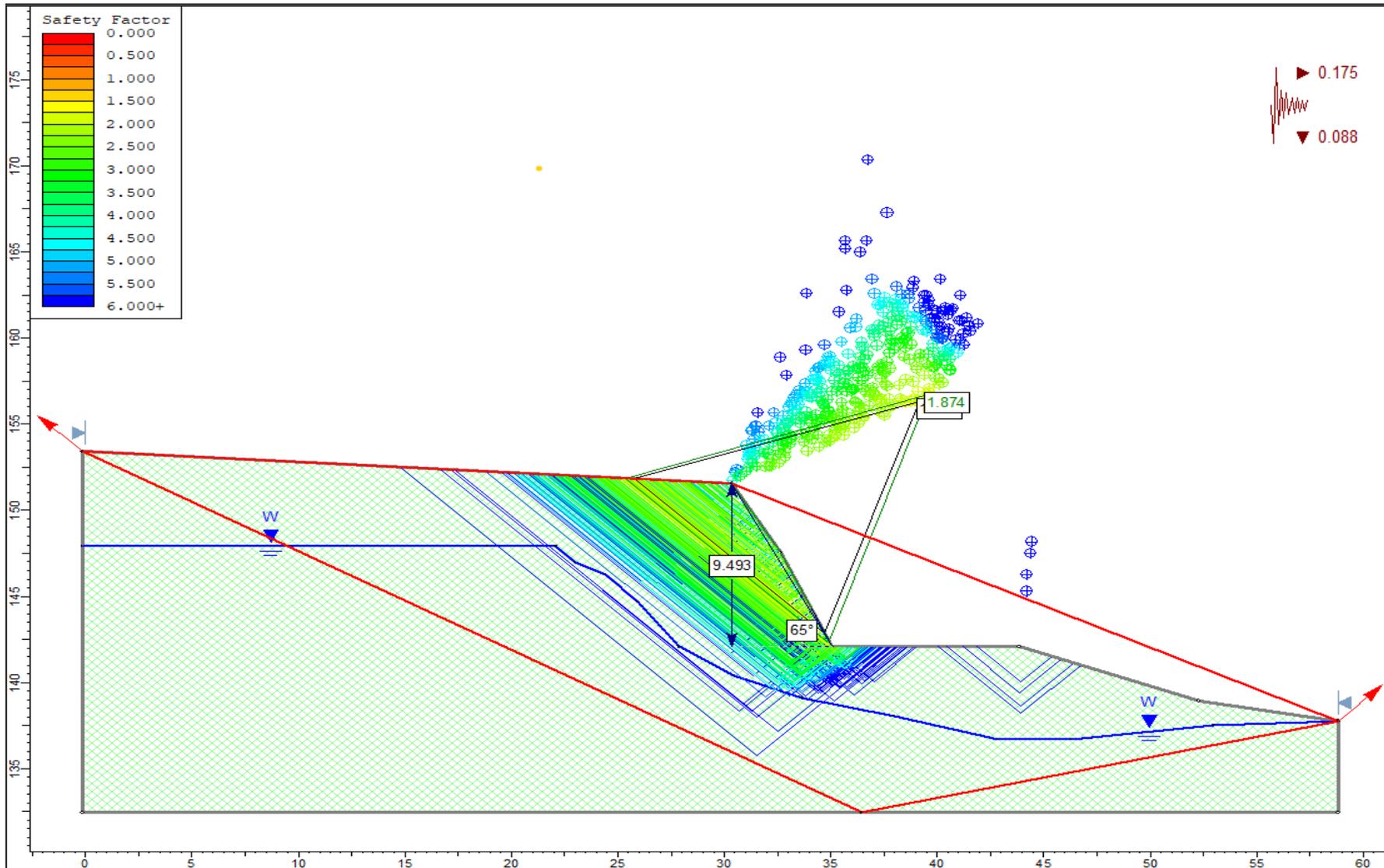


Figura 78. Estación EG-SM-C 05, Factor de Seguridad (1.874) por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

3.9.6 Estación geotécnica EG-SM-C 06

El talud se encuentra en la progresiva 17+690 km de la carretera San Marcos- Cajabamba, lo conforman calizas margosas intercaladas con arcillolitas gris amarillentas de la formación Santa (Ki-sa). El macizo rocoso tiene un grado de meteorización alto y fracturamiento alto, posee 3 familias de discontinuidades, se registró un total de 315 discontinuidades en 20.50 m lineales. En cuanto a la geometría del talud tiene un ángulo de 32° y una altura de 15 m. El Macizo también presenta escorrentía superficial que favorece a su inestabilidad. (ver Fotografía 21).

				GEOMETRÍA DEL TALUD											
				ALTURA	15 m.										
				PIE	8 m.										
				DIP	32°										
				DD	120°										
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO</td> </tr> <tr> <td>METEORIZACION</td> <td>Alta</td> </tr> <tr> <td>GRADO DE FRACTURAMIENTO</td> <td>Alto</td> </tr> <tr> <td>RQD</td> <td>54.56</td> </tr> <tr> <td>GSI</td> <td>46.78</td> </tr> </table>				CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO		METEORIZACION	Alta	GRADO DE FRACTURAMIENTO	Alto	RQD	54.56	GSI	46.78	GEOMETRÍA DEL TALUD	
				CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO											
				METEORIZACION	Alta										
				GRADO DE FRACTURAMIENTO	Alto										
				RQD	54.56										
GSI	46.78														
METEORIZACION	Alta														
GRADO DE FRACTURAMIENTO	Alto														
RQD	54.56														
GSI	46.78														
ESTE	NORTE	COTA	LITOLOGIA/FORMACIÓN	N° DISCONTINUIDADES	LONGITUD										
817894	9178294	2386	CALIZAS-ARCILLOLITAS/ FM SANTA	315	20.50 m.										

Fotografía 21. Estación EG-SM-C 06 calizas margosas intercaladas con arcillolitas grises de la Formación Santa (Ki-sa), en la progresiva 17 + 690 Km de la carretera San Marcos- Cajabamba.

➤ **Cálculo de Rock Quality Designation (RQD)**

Tabla 35. Cálculo de RQD en función de numero de discontinuidades (ND) y metros lineales (L), estación EG-SM-C 06.

$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$		CÁLCULO DEL RQD		
	ND	L(m)	λ	RQD
	315	20.50	15.37	54.57

➤ **Cálculo de Geological Strength Index (GSI)**

Tabla 36. Estimación del GSI en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI, 1989).

ESTIMACIÓN DEL GSI					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$		CÁLCULO DEL RQD			
ND	L(m)	λ	RQD		
315	20.50	15.37	54.57		
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI 1989					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	VALORACIÓN JCOND89
6	1	3	2	1	13
GSI=1.5JCOND89 + RQD/2				46.78	
GSI				46.78	

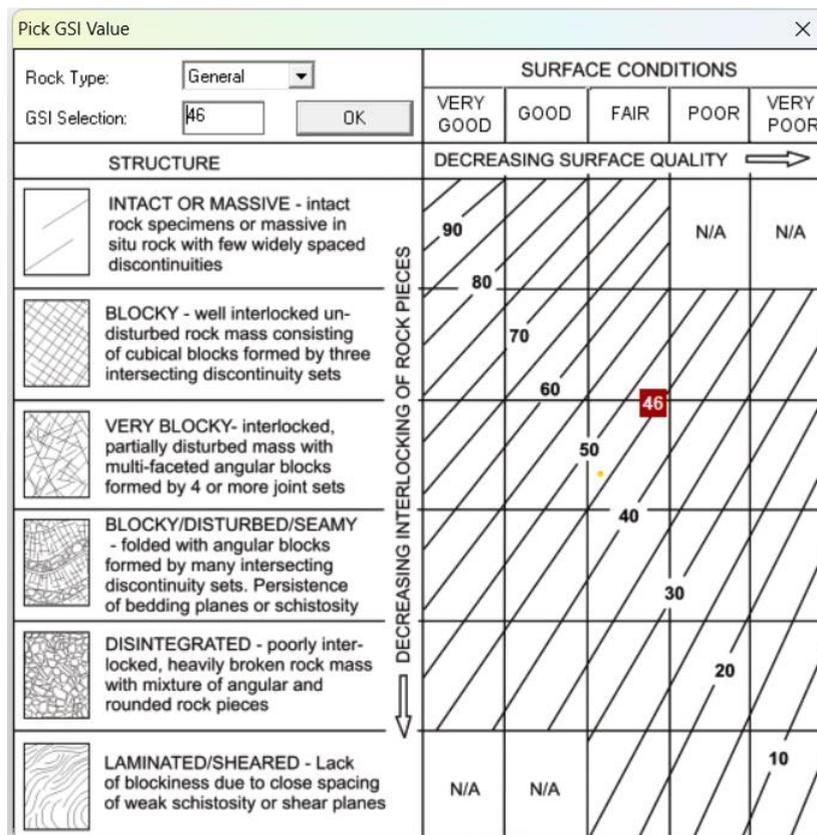


Figura 79. GSI=46 de la estación EG-SM-C 06, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular). Fuente: RocData 4.0.

Analysis of Rock Strength using RocData EG-SM-C 06

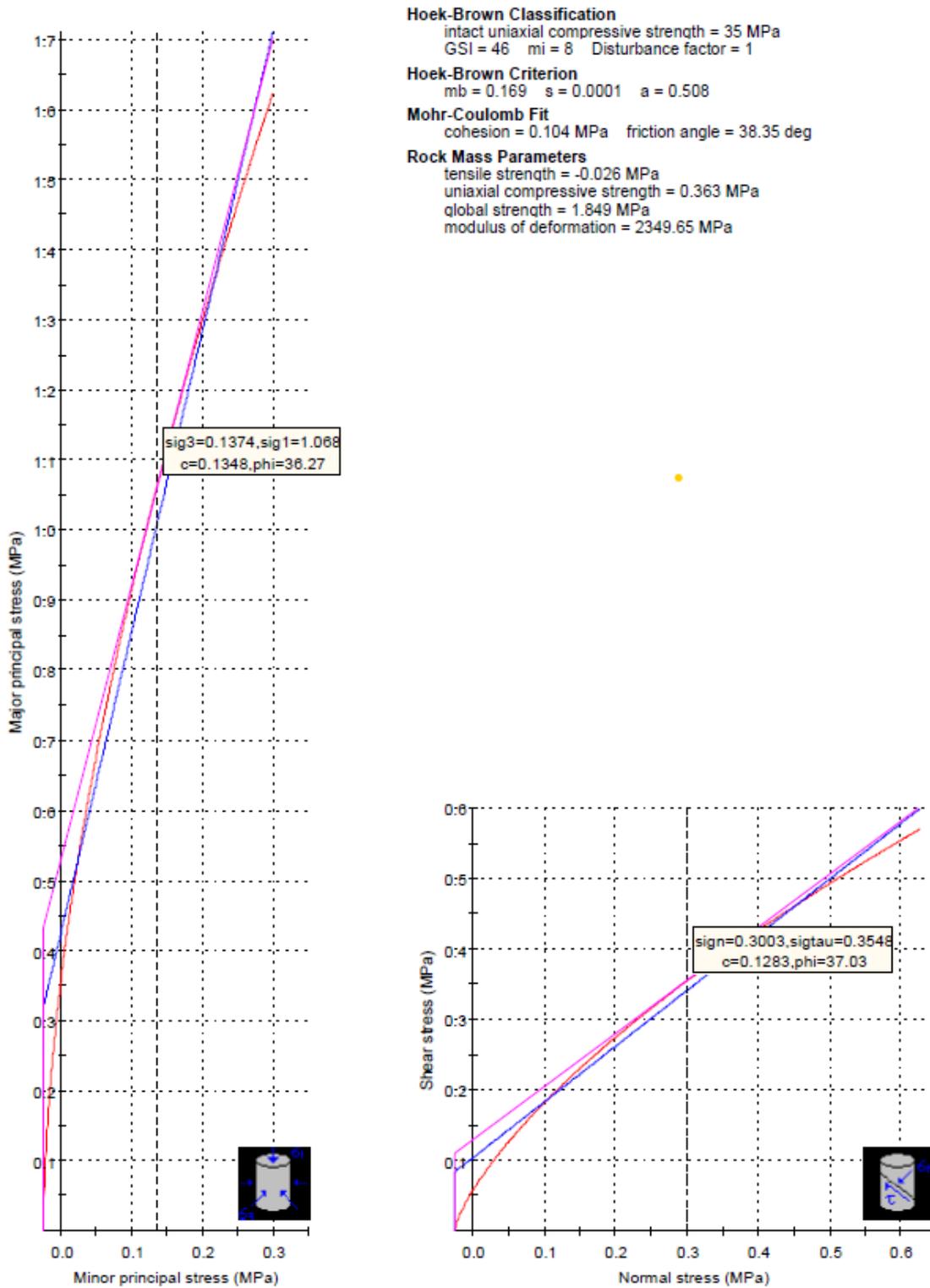
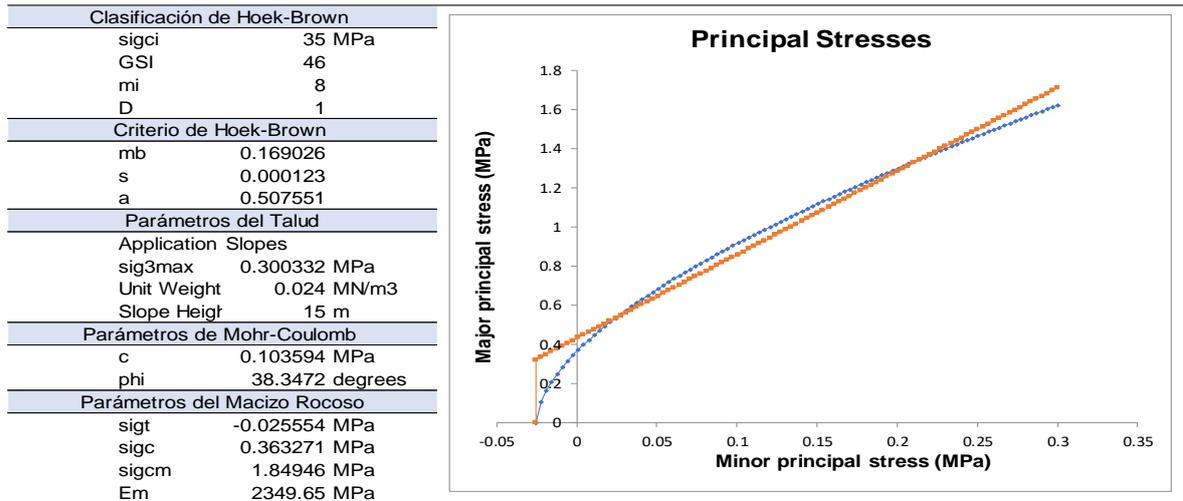


Figura 80. Análisis de la resistencia de macizo rocoso utilizando RocData y Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Santa para cálculo de cohesión y ángulo de fricción.

Tabla 37. Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 06.

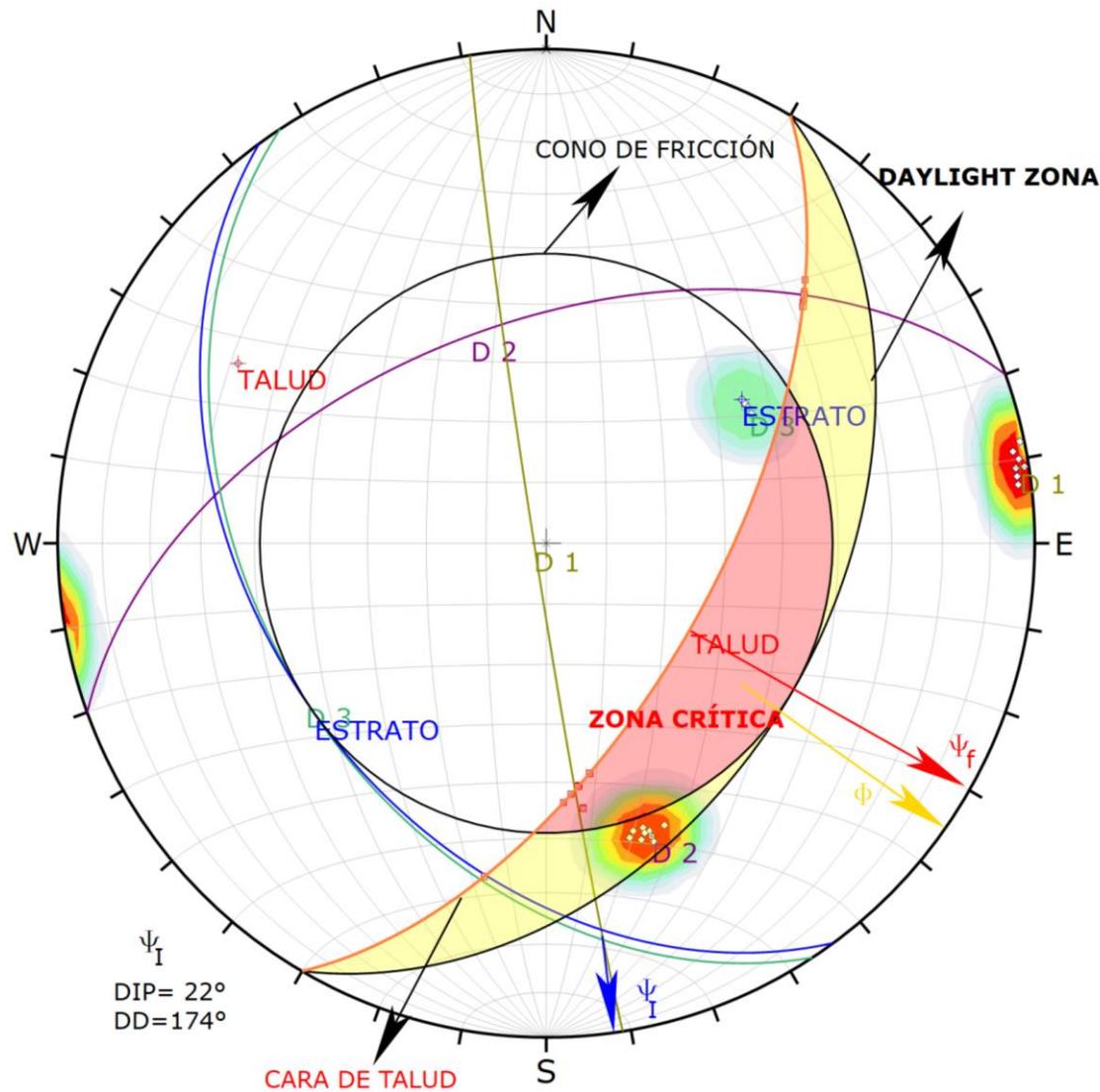


➤ **Cálculo de RMR₈₉**

Tabla 38. Valor de RMR₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 06.

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES						
1	Resistencia de Roca intacta	Ensayo carga puntual	>10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Compresión simple (MPa)	
		Compresión simple	>250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5 – 25 MPa 1 – 5 MPa < 1 MPa	
	VALOR	15	12	7	4	2	1	
2	RQD	90 – 100 %	75 – 90 %	50 – 75 %	25 – 50 %	< 25 %		
	VALOR	20	17	12	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades	> 2 m	0.6 – 2 m	0.6 – 0.2 m	0.2-0.06 m	< 0.06 m		
	VALOR	20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m	
		VALOR	6	4	2	1	0	
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1 – 1.0mm	1 – 5 mm	> 5 mm	
		VALOR	6	5	4	1	0	
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave	
		VALOR	6	5	3	1	0	
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm	
		VALOR	6	4	2	2	0	
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	descompuesta	
		VALOR	6	5	3	1	0	
	VALOR	30	23	13	6	0		
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación presión agua/tensión principal mayor	0	0 – 0.1	0.1 - 0.2	0.2 – 0.5	>0.5	
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo	
	VALOR	15	10	7	4	0		
VALOR TOTAL RMR							46	

Fuente: Clasificación Geomecánica RMR₈₉. Bieniawski, (1989)



Symbol	TIPO DE ESTRUCTURA	Quantity
Symbol	Feature	
■	Critical Intersection	

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.80
	3.80 - 7.60
	7.60 - 11.40
	11.40 - 15.20
	15.20 - 19.00
	19.00 - 22.80
	22.80 - 26.60
	26.60 - 30.40
	30.40 - 34.20
	34.20 - 38.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	37.99%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	62
Slope Dip Direction	120
Friction Angle	41°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	20	319	6.27%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	53	340	D 2
2	62	120	TALUD
3	41	237	D 3
4	88	261	D 1
5	41	234	ESTRATO

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	26 (26 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	319
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 82. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 06, indicando una probabilidad de falla de 6.27 %.

➤ **Análisis y cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide V.6.0**

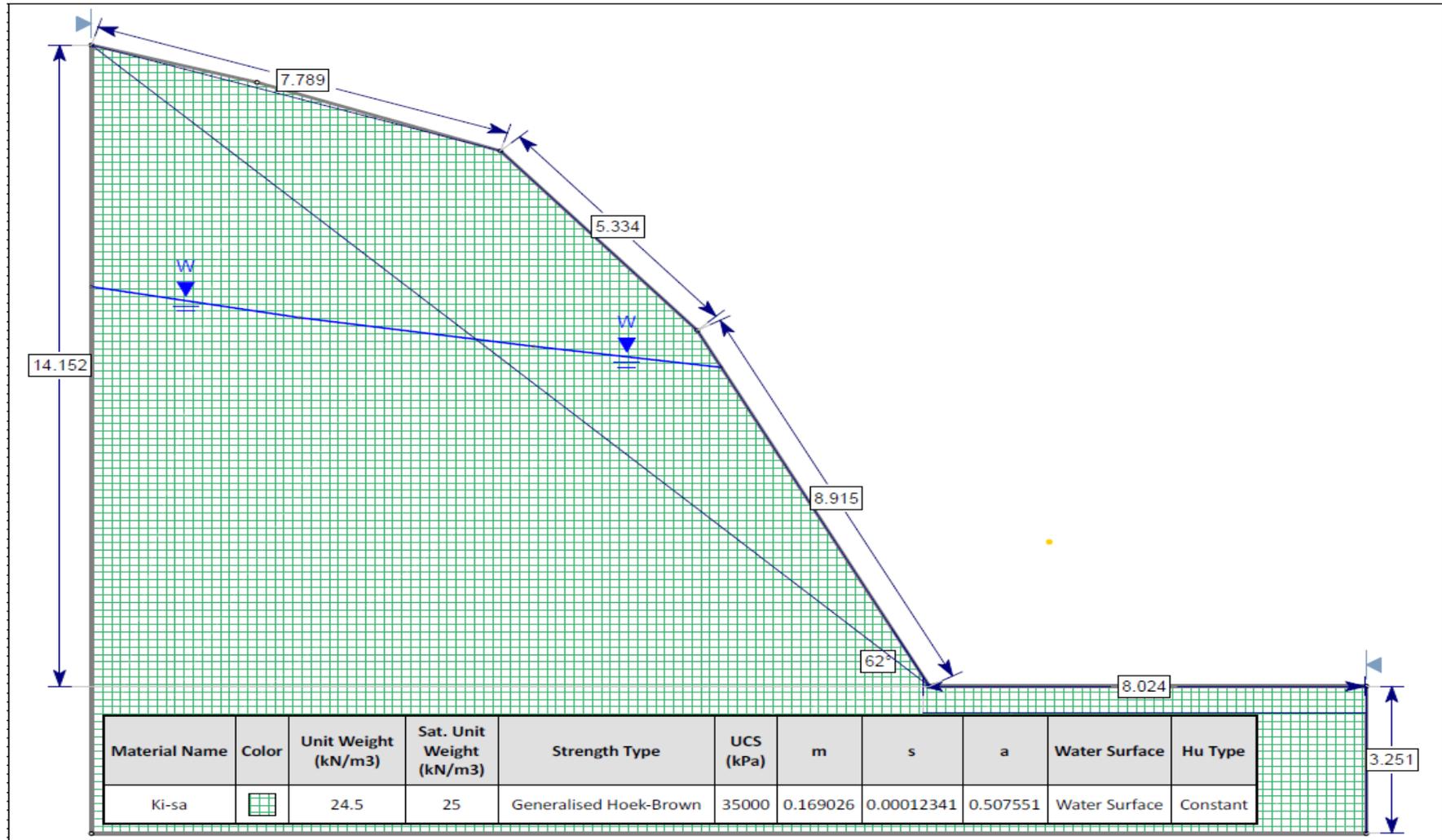


Figura 83. Estación EG-SM-C 06, dimensiones y propiedades del del talud.

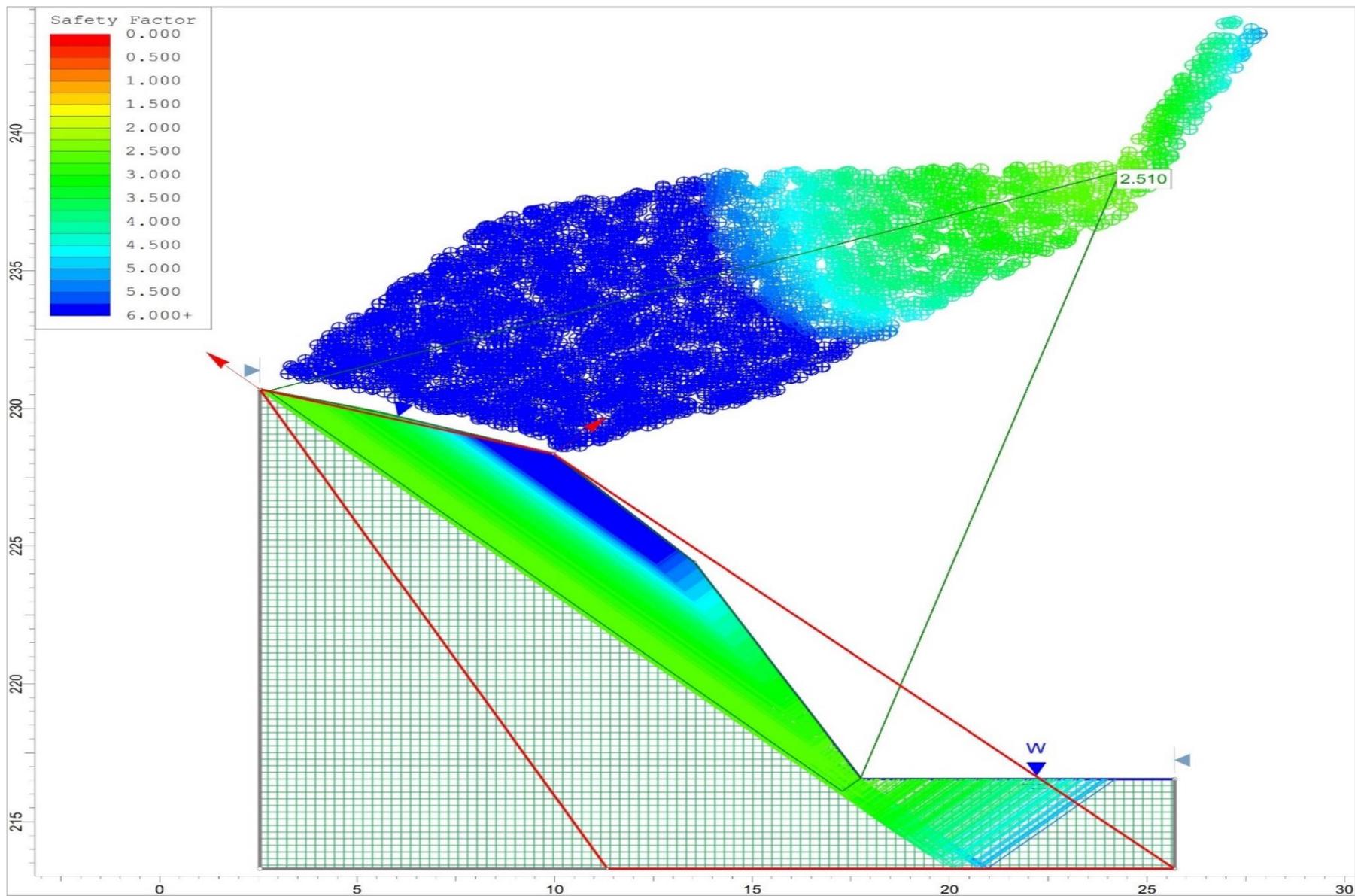


Figura 84. Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.510) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

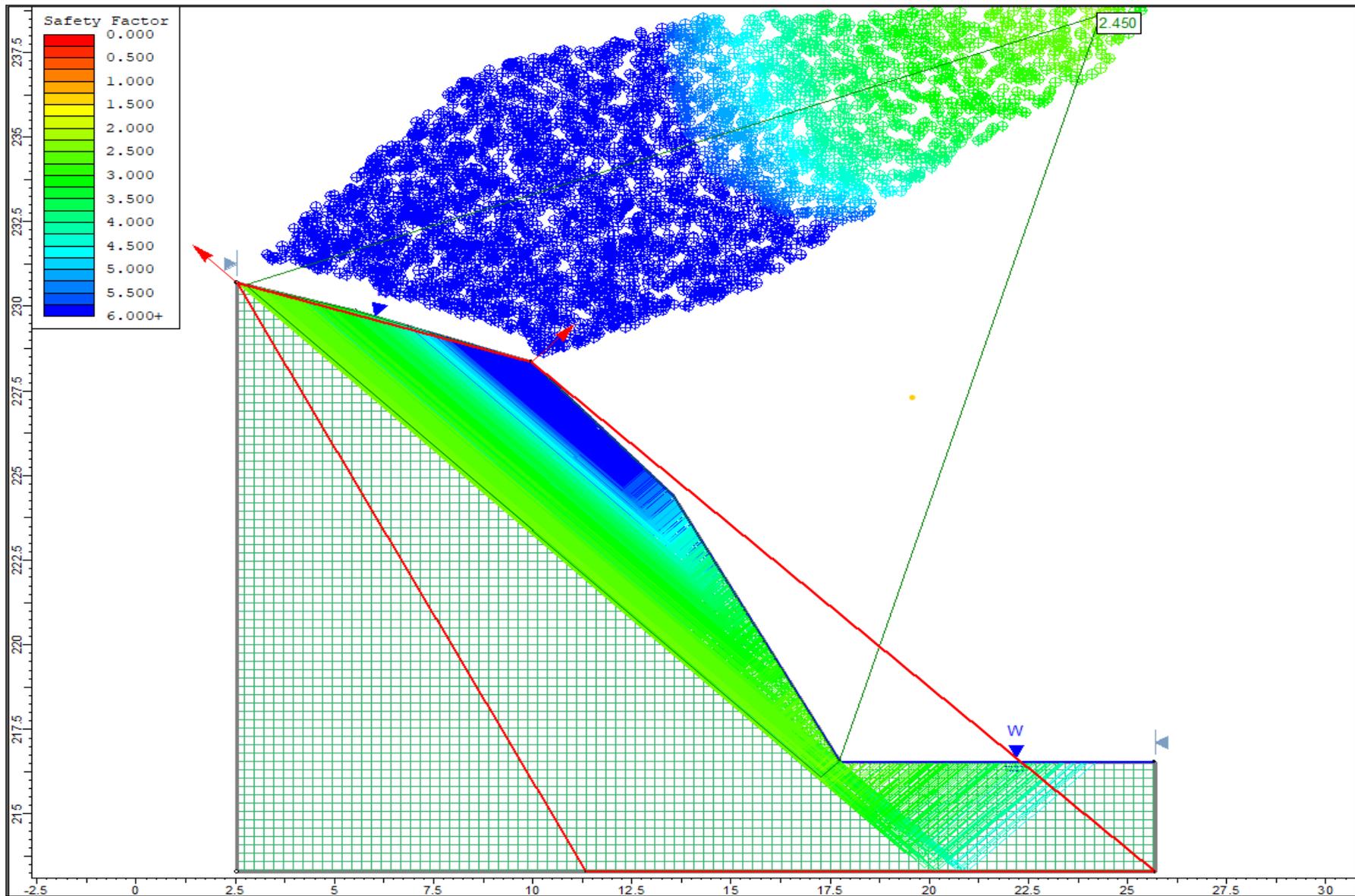


Figura 85. Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.450) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

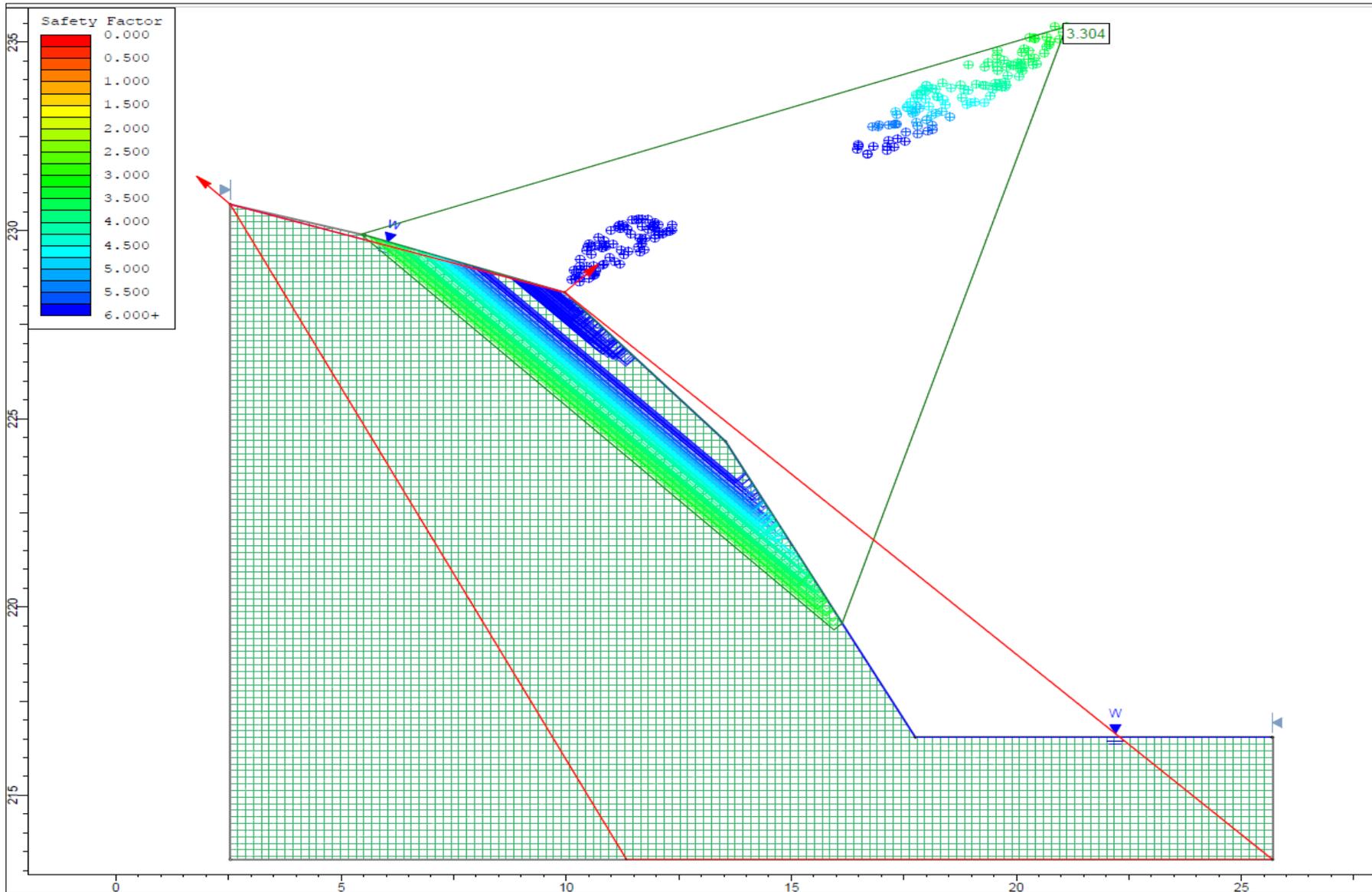


Figura 86. Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (3.304) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.

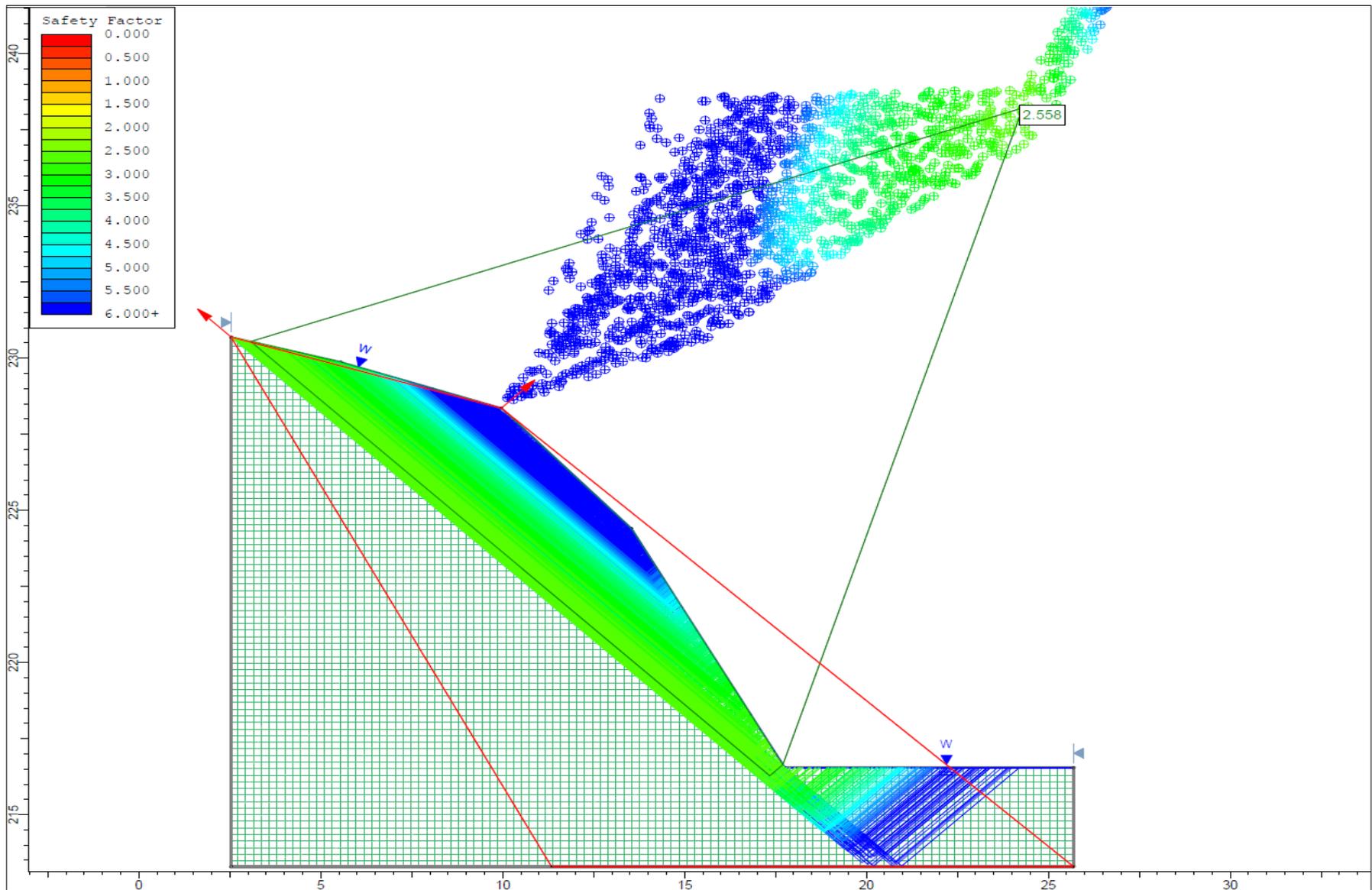


Figura 87. Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.558) por Método de GLE-Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.

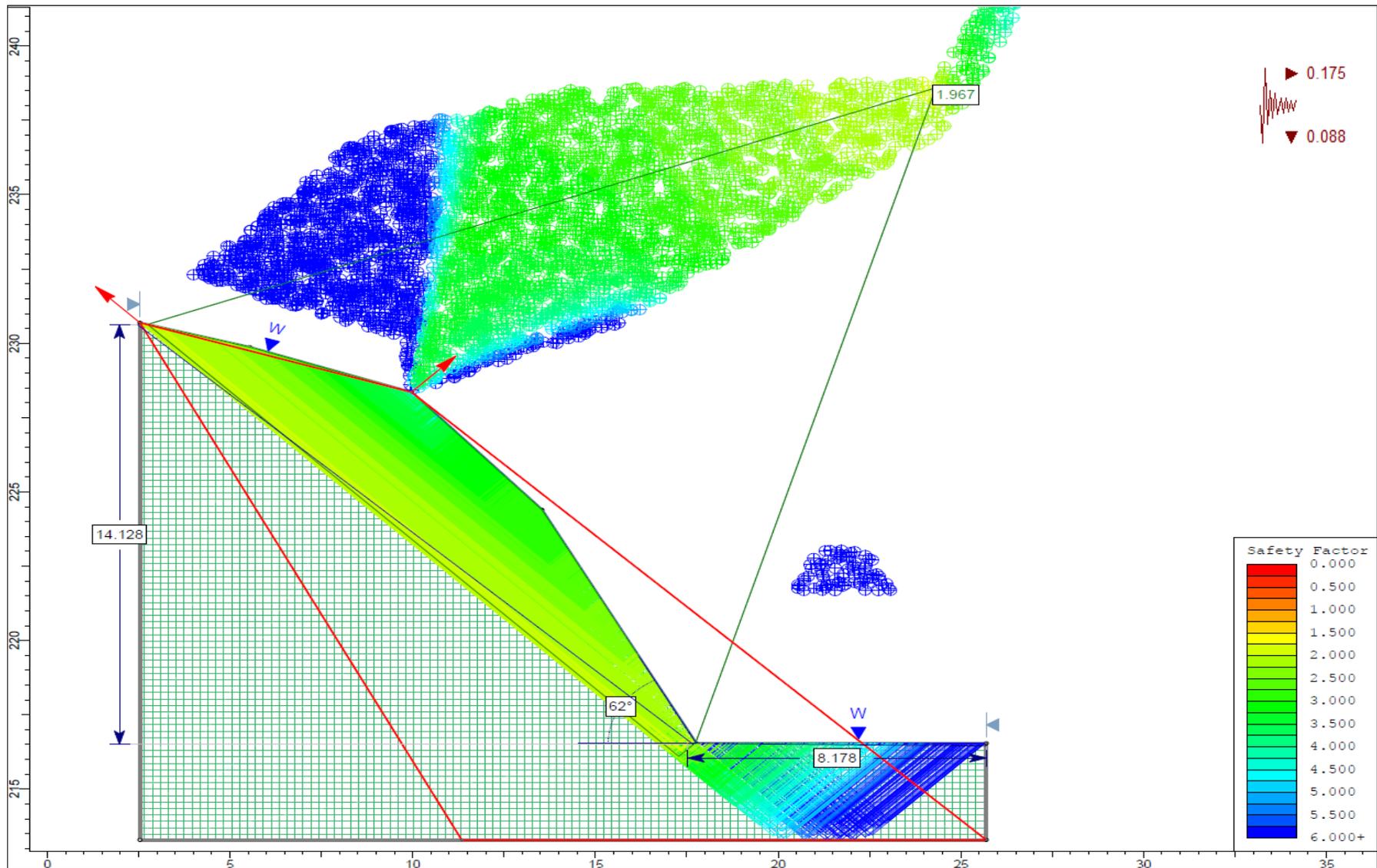


Figura 88. Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (1.967) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más Sismicidad.

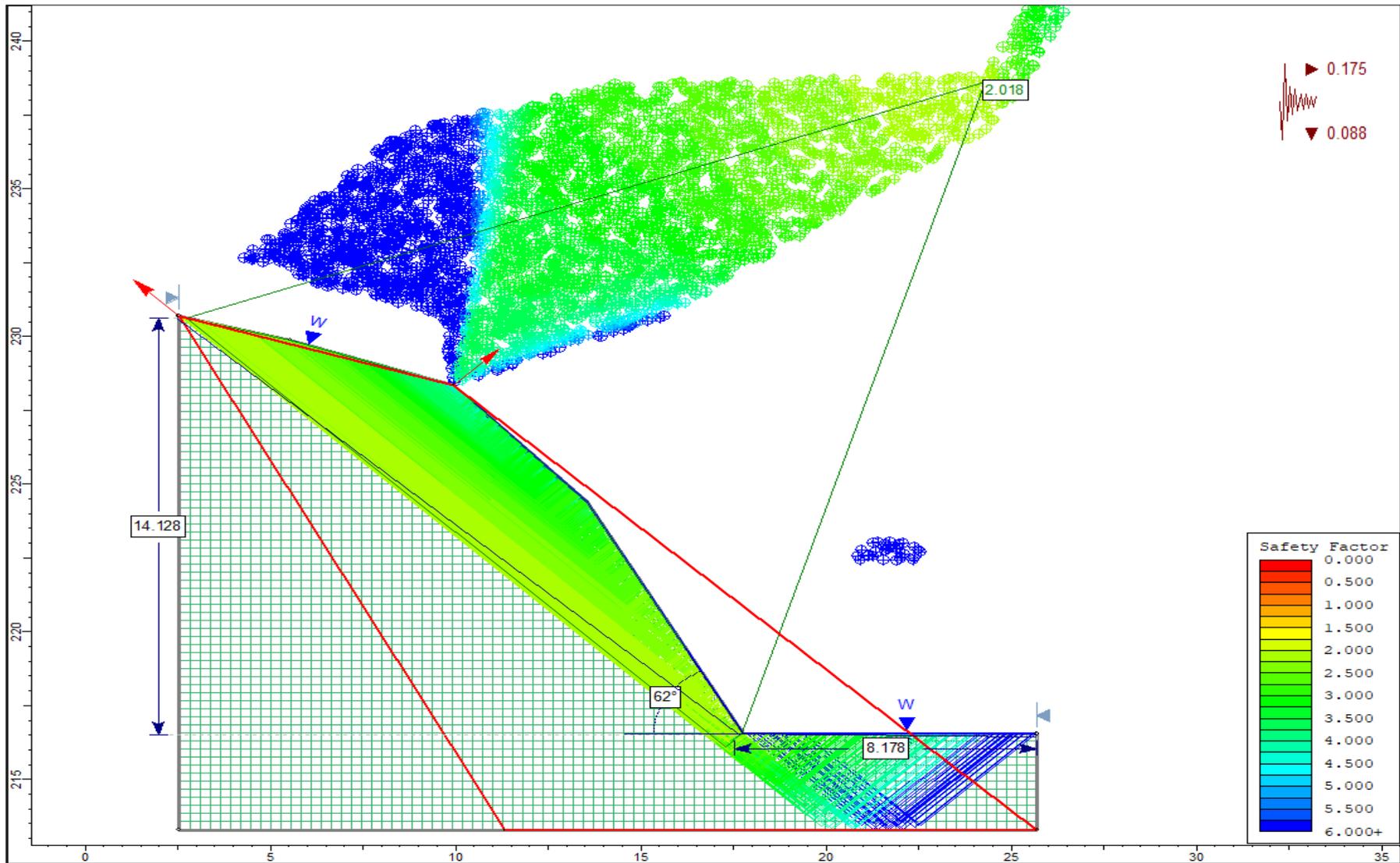


Figura 89. Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.018) por Método de Jambu simplificado en condiciones de Tensiones Efectivas más sismicidad.

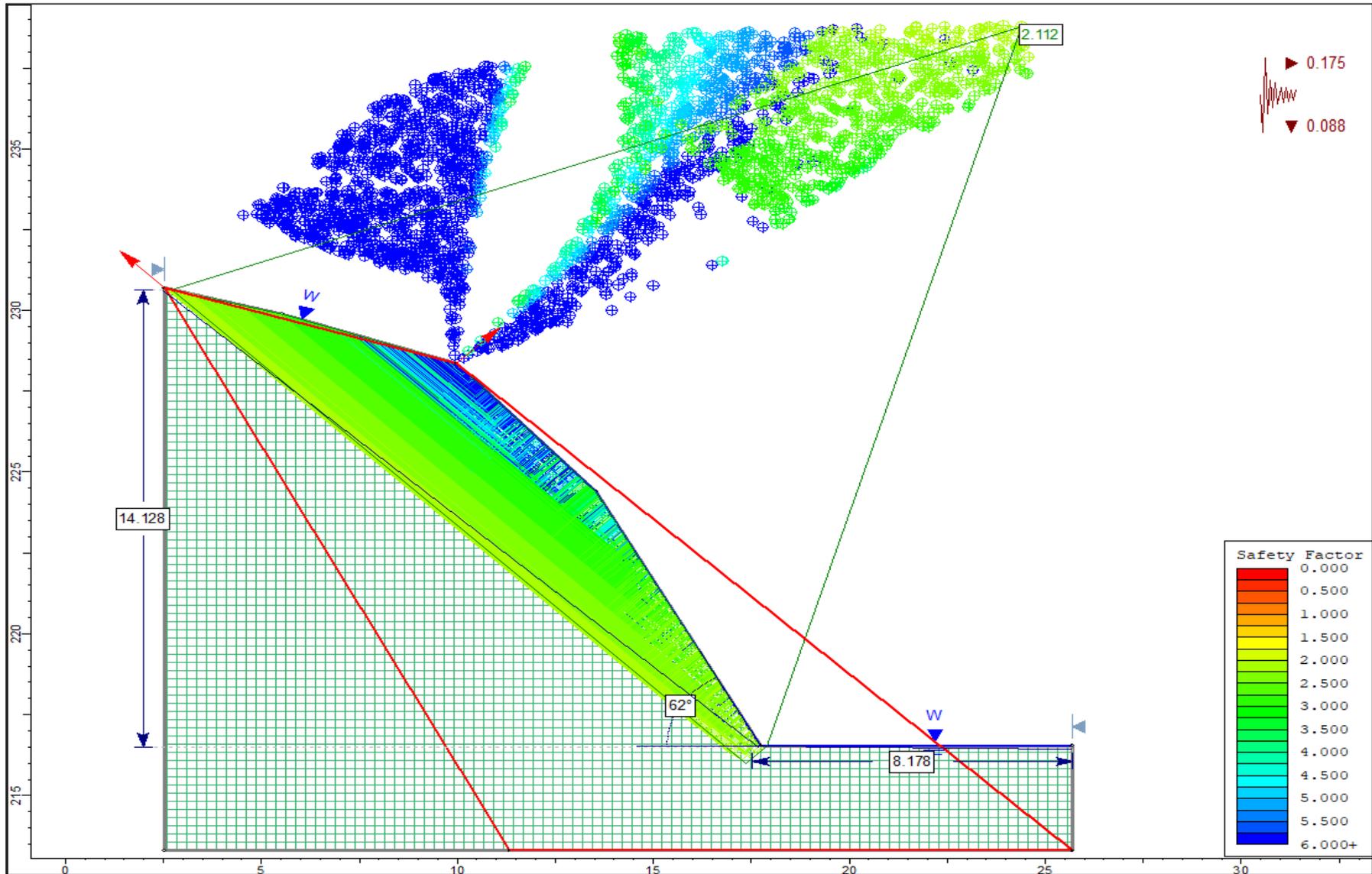


Figura 90. Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.112) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Efectivas más sismicidad.

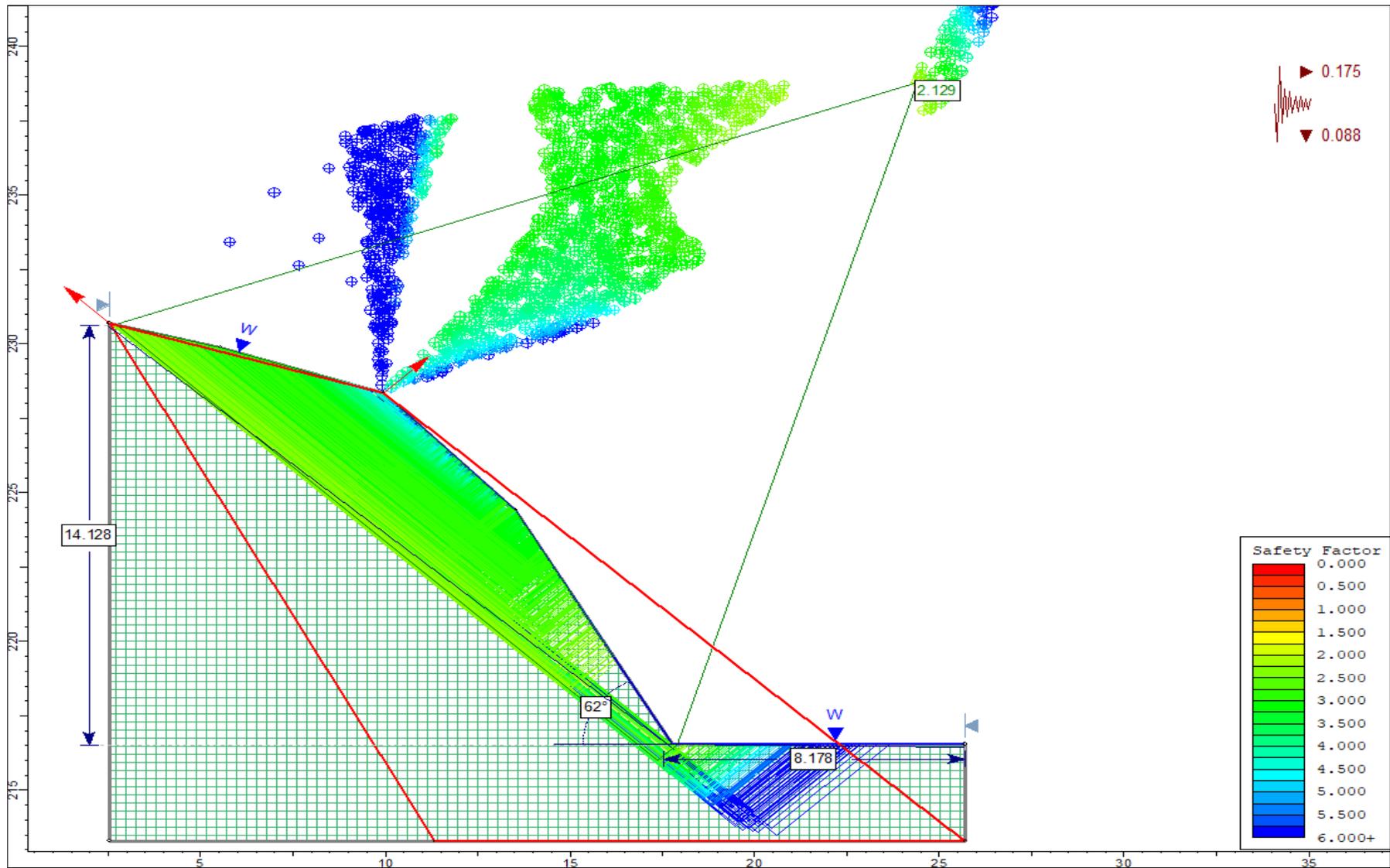


Figura 91. Estación EG-SM-C 06, Factor de Seguridad (2.129) por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Efectivas más sismicidad.

3.9.7 Estación geotécnica EG-SM-C 07

El talud se encuentra en la progresiva 17+800 km de la carretera San Marcos- Cajabamba, está conformado por calizas arenosas intercaladas con arcillolitas negras de la Formación Santa (Ki-sa). El macizo rocoso tiene un grado de meteorización alto y fracturamiento alto, posee 3 familias de discontinuidades, se registró un total de 329 discontinuidades en 21.31 m lineales. En cuanto a la geometría del talud tiene un ángulo de 53° y una altura de 8.45 m. (ver Fotografía 22).

				GEOMETRÍA DEL TALUD									
				ALTURA	8.45 m.								
				PIE	8 m.								
				DIP	53°								
				DD	198°								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ESTE</th> <th>NORTE</th> <th>COTA</th> <th>LITOLÓGIA/FORMACIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>817878</td> <td>9178344</td> <td>2391</td> <td>CALIZAS-ARCILLOLITAS/ FM SANTA</td> </tr> </tbody> </table>				ESTE	NORTE	COTA	LITOLÓGIA/FORMACIÓN	817878	9178344	2391	CALIZAS-ARCILLOLITAS/ FM SANTA	CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO	
				ESTE	NORTE	COTA	LITOLÓGIA/FORMACIÓN						
				817878	9178344	2391	CALIZAS-ARCILLOLITAS/ FM SANTA						
				METEORIZACIÓN	Alta								
				GRADO DE FRACTURAMIENTO	Alto								
RQD	54.32												
GSI	36.16												
N° DISCONTINUIDADES	329												
LONGITUD	21.31												

Fotografía 22. Estación EG-SM-C 07 calizas arenosas intercaladas con arcillolitas negras de la Formación Santa (Ki-sa), en la progresiva 17 + 800 Km de la carretera San Marcos- Cajabamba.

➤ **Cálculo de Rock Quality Designation (RQD)**

Tabla 39. Cálculo de RQD en función de número de discontinuidades (ND) y metros lineales (L), estación EG-SM-C 07.

$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$ CÁLCULO DEL RQD			
ND	L(m)	λ	RQD
329	21.31	15.44	54.32

➤ **Cálculo de Geological Strength Index (GSI)**

Tabla 40. Estimación del GSI en función del RQD y condición de discontinuidades (BIENIAWSKI 1989).

ESTIMACIÓN DEL GSI					
$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$		CÁLCULO DEL RQD			
ND	L(m)	λ			RQD
329	21.31	15.44			54.32
CLASIFICACIÓN DE CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES, BIENIAWSKI 1989					
LONGITUD DE LA DISCONTINUIDAD	ABERTURA	RUGOSIDAD	RELLENO	ALTERACIÓN	JCOND89
0	0	5	0	1	6
$GSI=1.5JCOND89 + RQD/2$					36.16
GSI					36.16

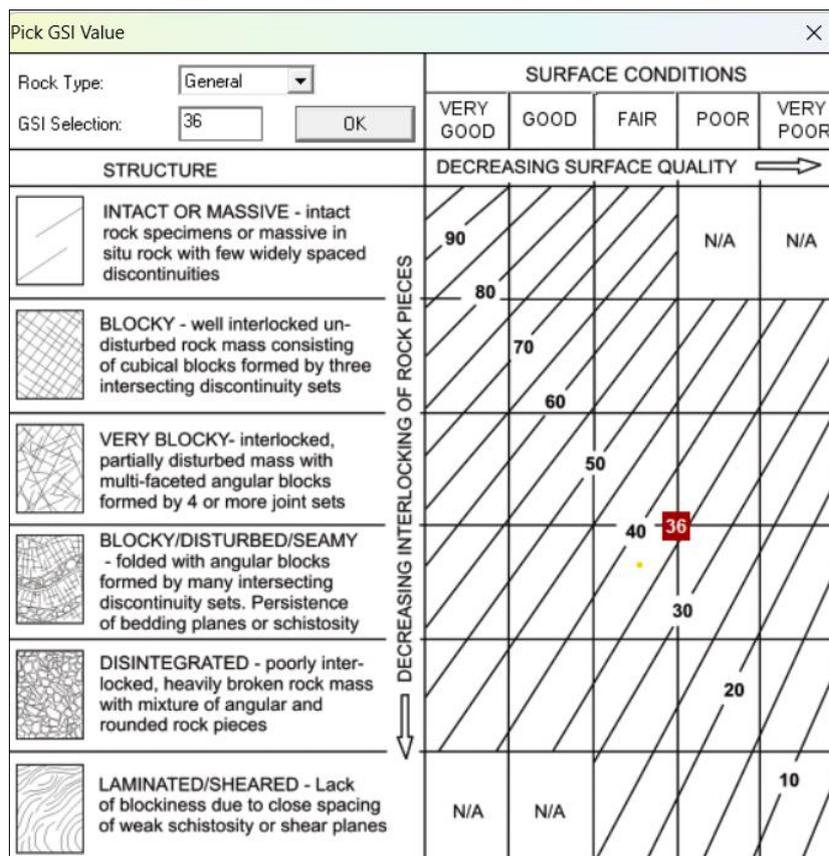


Figura 92. GSI=36 de la estación EG-SM-C 07, según la condición del macizo rocoso (bloques fuertemente fracturados en 3 familias de discontinuidades) y la superficie de las discontinuidades (regular-mala). Fuente: RocData 4.0.

Analysis of Rock/Soil Strength using RocData

Hoek-Brown Classification

intact uniaxial compressive strength = 45 MPa
 GSI = 36 mi = 6 Disturbance factor = 1

Hoek-Brown Criterion

mb = 0.047 s = 1.2e-5 a = 0.520

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.044 MPa friction angle = 32.48 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.012 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.125 MPa
 global strength = 1.122 MPa
 modulus of deformation = 1190.08 MPa

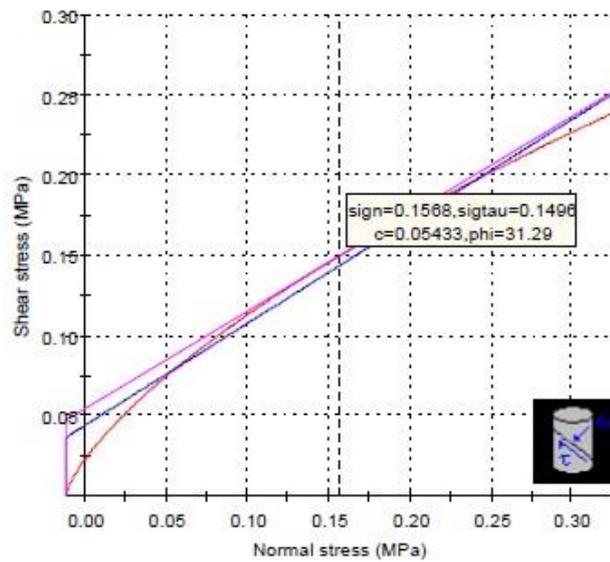
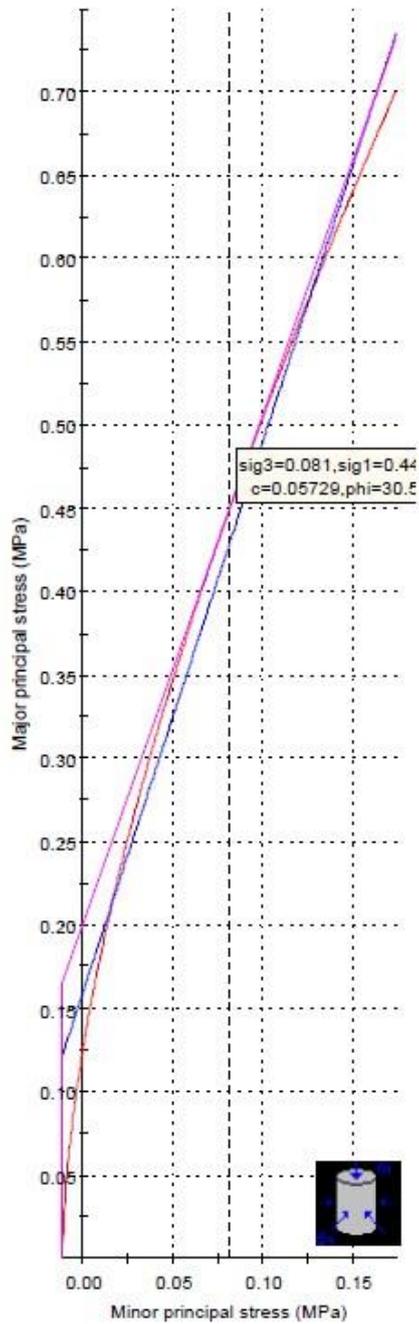
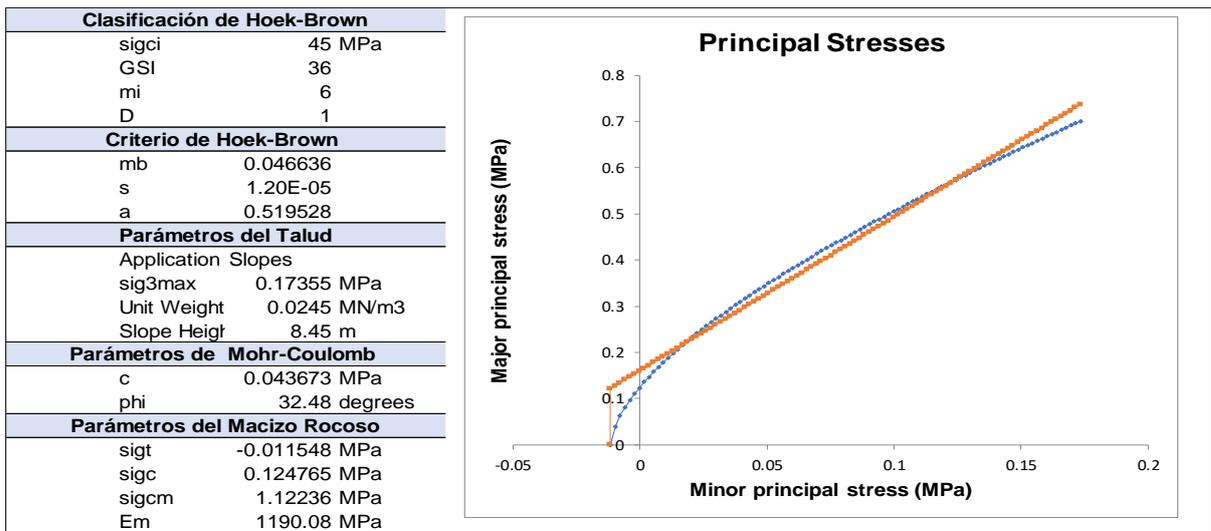


Figura 93. Análisis de la resistencia de macizo rocoso utilizando RocData y Graficas de E. Mayor – E. Menor (Izquierda) y Esfuerzo. – E. de Corte (derecha) de las calizas de la Fm. Santa para cálculo de cohesión y ángulo de fricción.

Tabla 41. Propiedades geomecánicas del talud EG-SM-C 07.



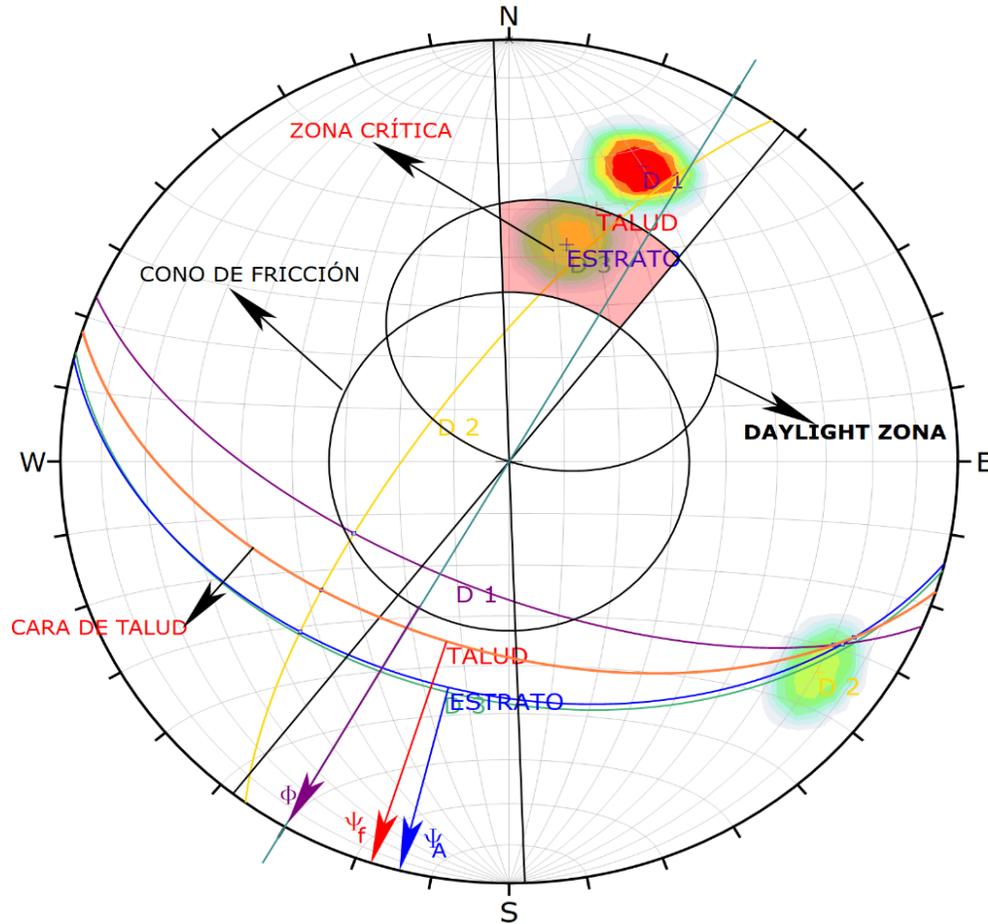
➤ **Cálculo de RMR₈₉**

Tabla 42. Valor de RMR₈₉ para Macizo rocoso del talud EC-SM-C 07.

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES						
1	Resistencia de Roca intacta	Ensayo carga puntual	>10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa	1 – 2 MPa	Compresión simple (MPa)	
	Compresión simple	>250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5 – 25	1 – 5	
	VALOR	15	12	7	4	2	1	
2	RQD	90 – 100 %	75 – 90 %	50 – 75 %	25 – 50%	< 25%		
	VALOR	20	17	12	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades	> 2 m	0.6 – 2 m	0.6 – 0.2 m	6 – 20 cm	< 6cm		
	VALOR	20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	<1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m	
		VALOR	6	4	2	1	0	
		Abertura	Nada	<0.1 mm	0.1 – 1.0mm	1 – 5 mm	> 5 mm	
		VALOR	6	5	4	1	0	
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave	
		VALOR	6	5	3	1	0	
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno blando <5mm	Relleno blando >5mm	
		VALOR	6	4	2	2	0	
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	descompuesta	
		VALOR	6	5	3	1	0	
	VALOR	30	23	13	6	0		
5	Flujo de agua en las discontinuidades	Relación presión agua/tensión principal mayor	0	0 – 0.1	0.1 - 0.2	0.2 – 0.5	>0.5	
		Condiciones generales	Completament e secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo	
	VALOR	15	10	7	4	0		
VALOR TOTAL RMR							42	

Fuente: Clasificación Geomecánica RMR₈₉. Bieniawski, (1989)

➤ **Análisis Cinemático y Estereográfico DIPS.**



Symbol	Feature
•	Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.00
	4.00 - 8.00
	8.00 - 12.00
	12.00 - 16.00
	16.00 - 20.00
	20.00 - 24.00
	24.00 - 28.00
	28.00 - 32.00
	32.00 - 36.00
	36.00 - 40.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	39.86%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

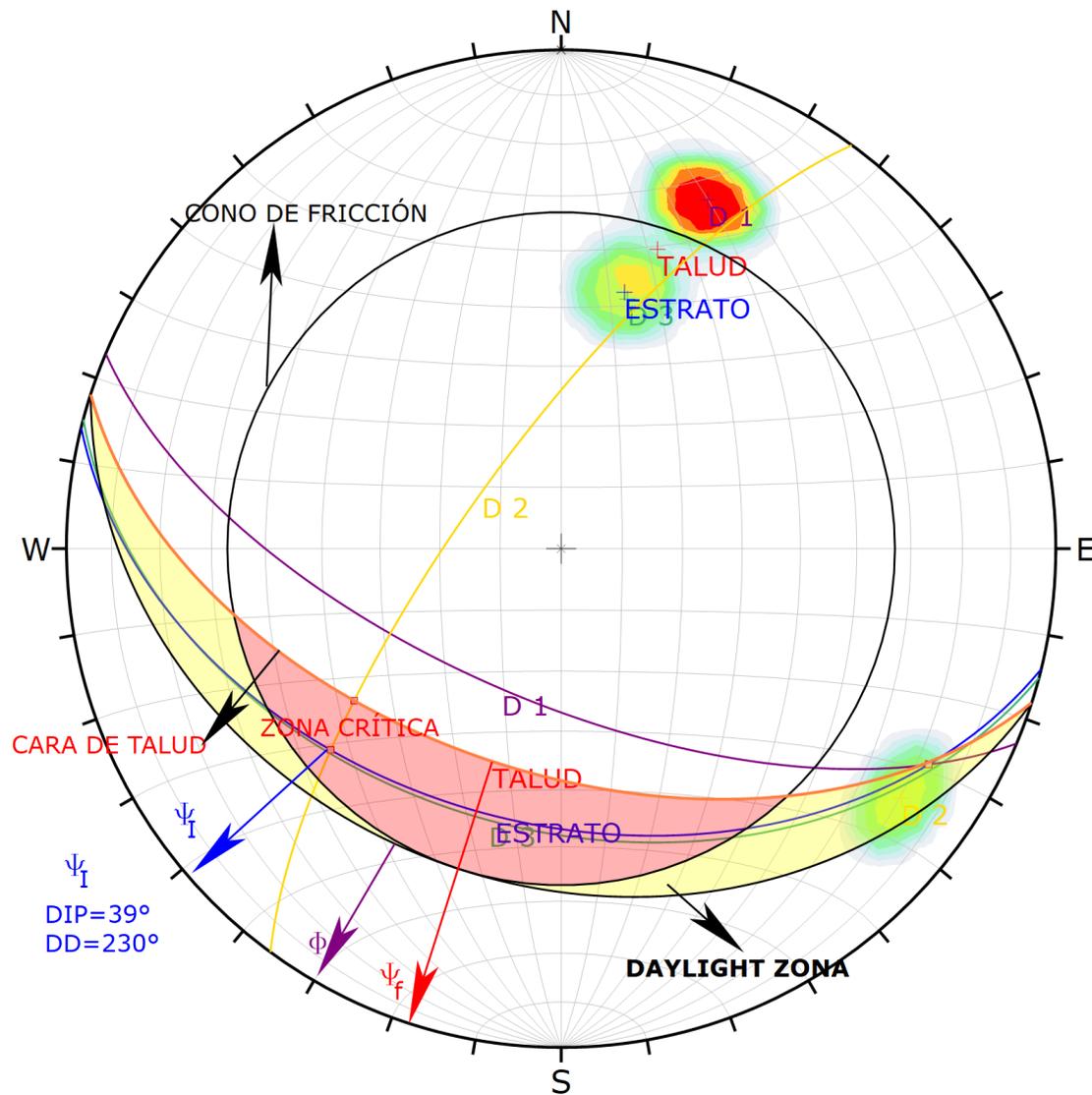
Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	53
Slope Dip Direction	198
Friction Angle	33°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	5	15	33.33%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	53	198	TALUD
2	■	43	195	D 3
3	■	65	203	D 1
4	■	74	306	D 2
5	■	44	194	ESTRATO

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	15 (15 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	78
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 94. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 07, indicando una probabilidad de falla de 33.33 %.



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 4.00
	4.00 - 8.00
	8.00 - 12.00
	12.00 - 16.00
	16.00 - 20.00
	20.00 - 24.00
	24.00 - 28.00
	28.00 - 32.00
	32.00 - 36.00
	36.00 - 40.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density		39.86%
Contour Distribution		Fisher
Counting Circle Size		1.0%

Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		53		
Slope Dip Direction		198		
Friction Angle		33°		

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	44	78	56.41%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	53	198	TALUD
2	■	43	195	D 3
3	■	65	203	D 1
4	■	74	306	D 2
5	■	44	194	ESTRATO

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count		15 (15 Entries)
Intersection Mode		Grid Data Planes
Intersections Count		78
Hemisphere		Lower
Projection		Equal Area

Figura 95. Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud de la estación EG-SM-C 07, indicando una probabilidad de falla de 56.41%.

➤ **Análisis y cálculo del Factor de Seguridad (FS) mediante El Software - Slide V.6.0**

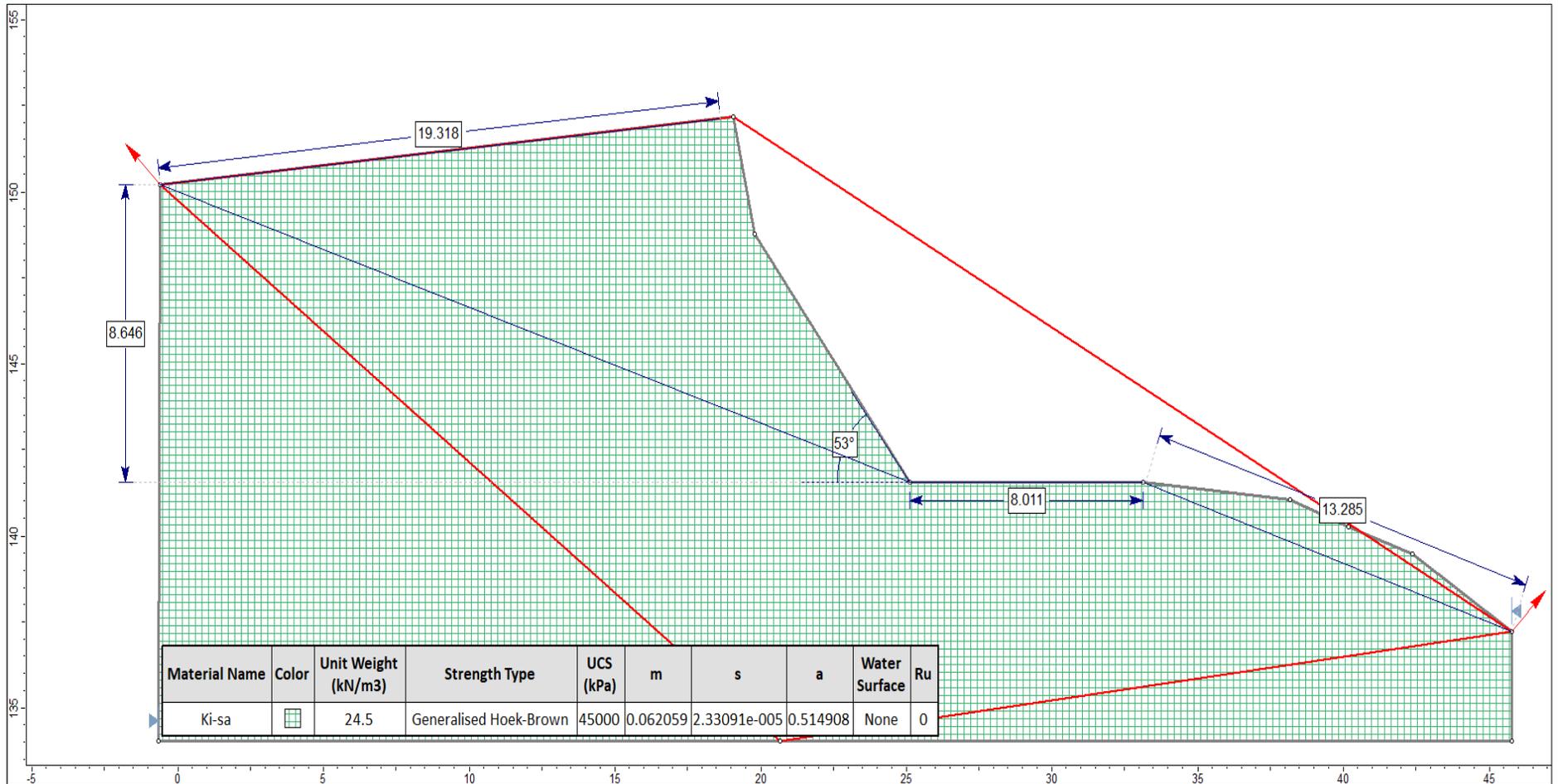


Figura 96. Estación EG-SM-C 07, dimensiones y propiedades del talud.

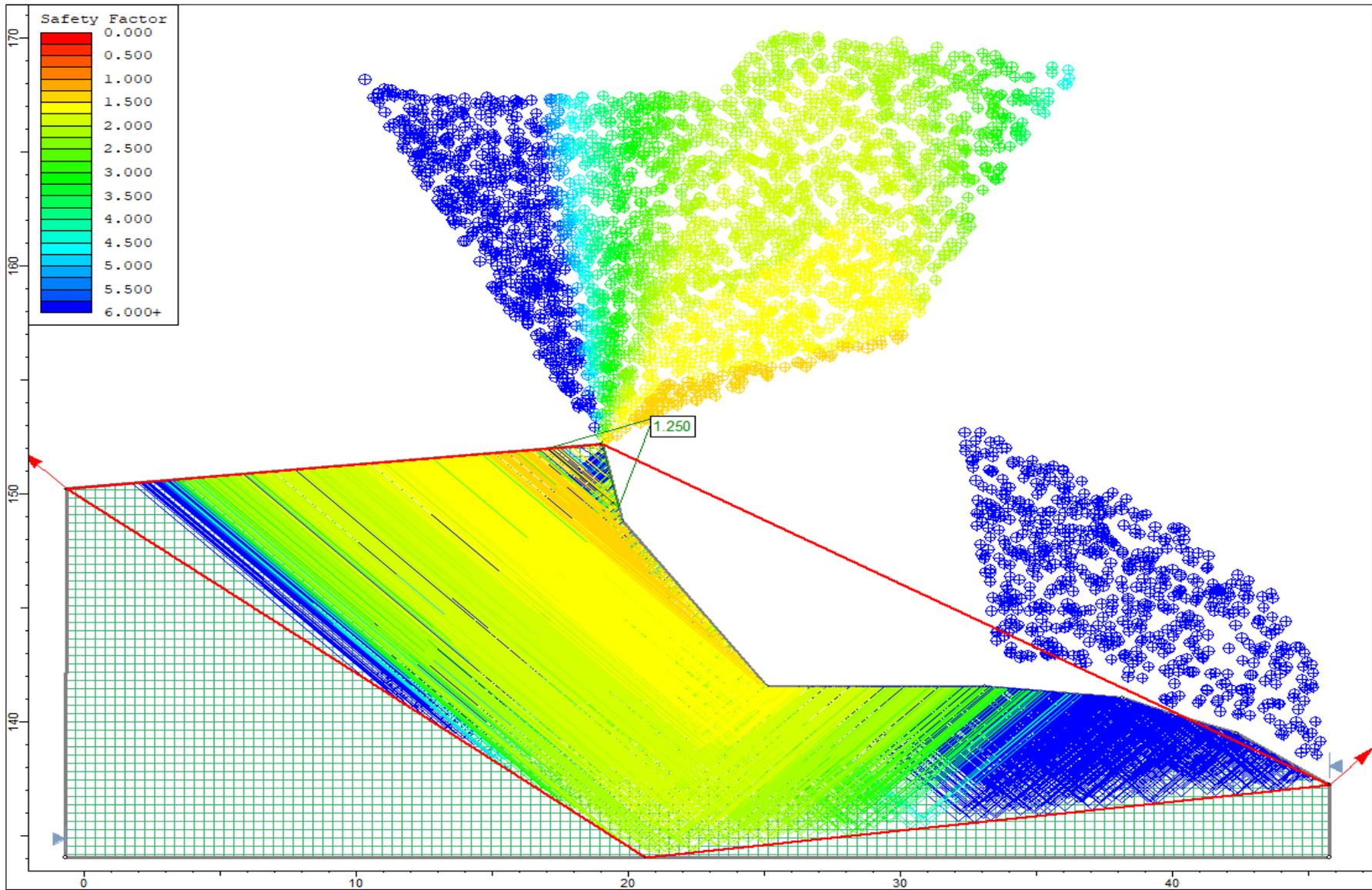


Figura 97. Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.250) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

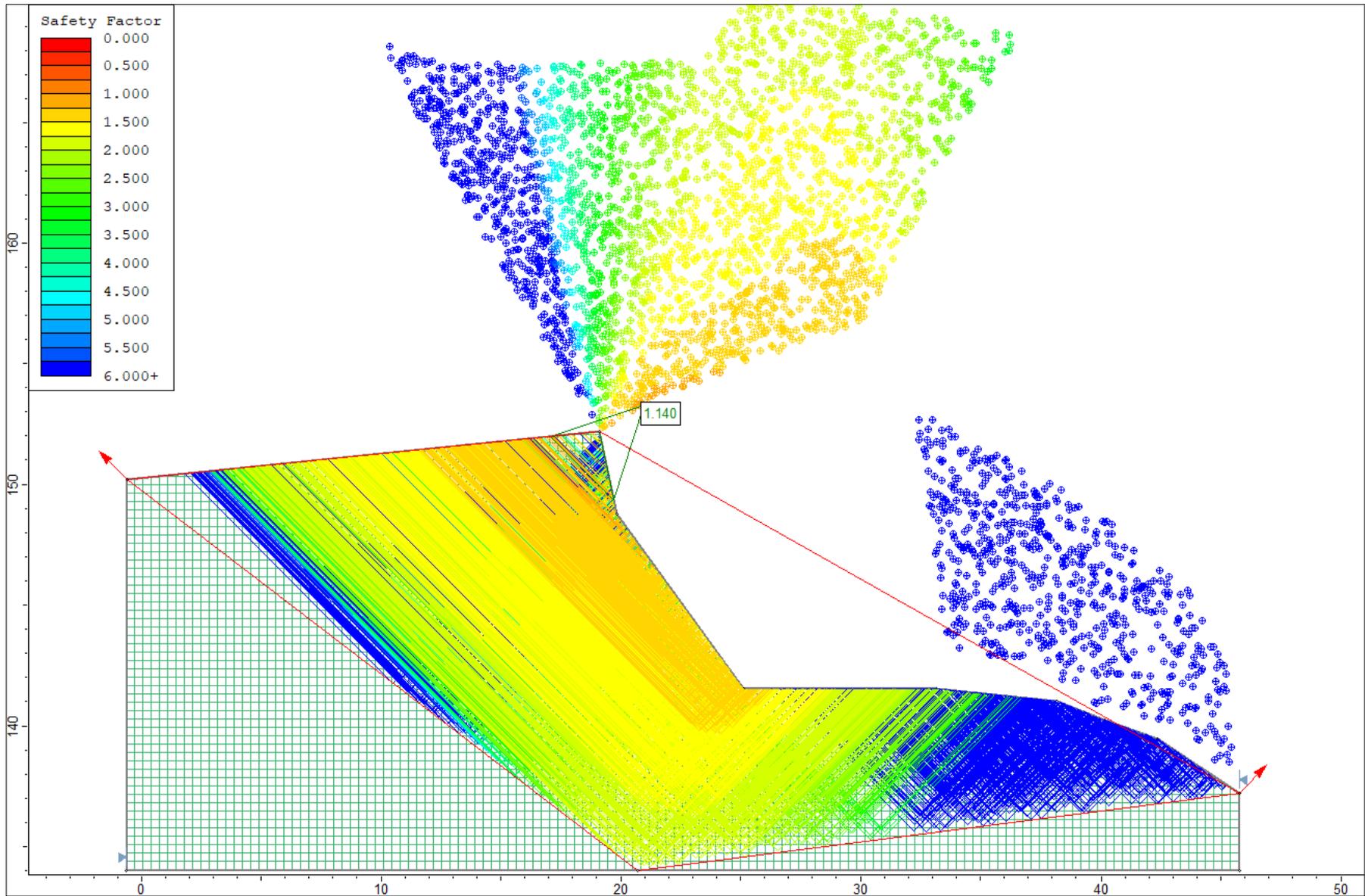


Figura 98. Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.140) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones Totales.

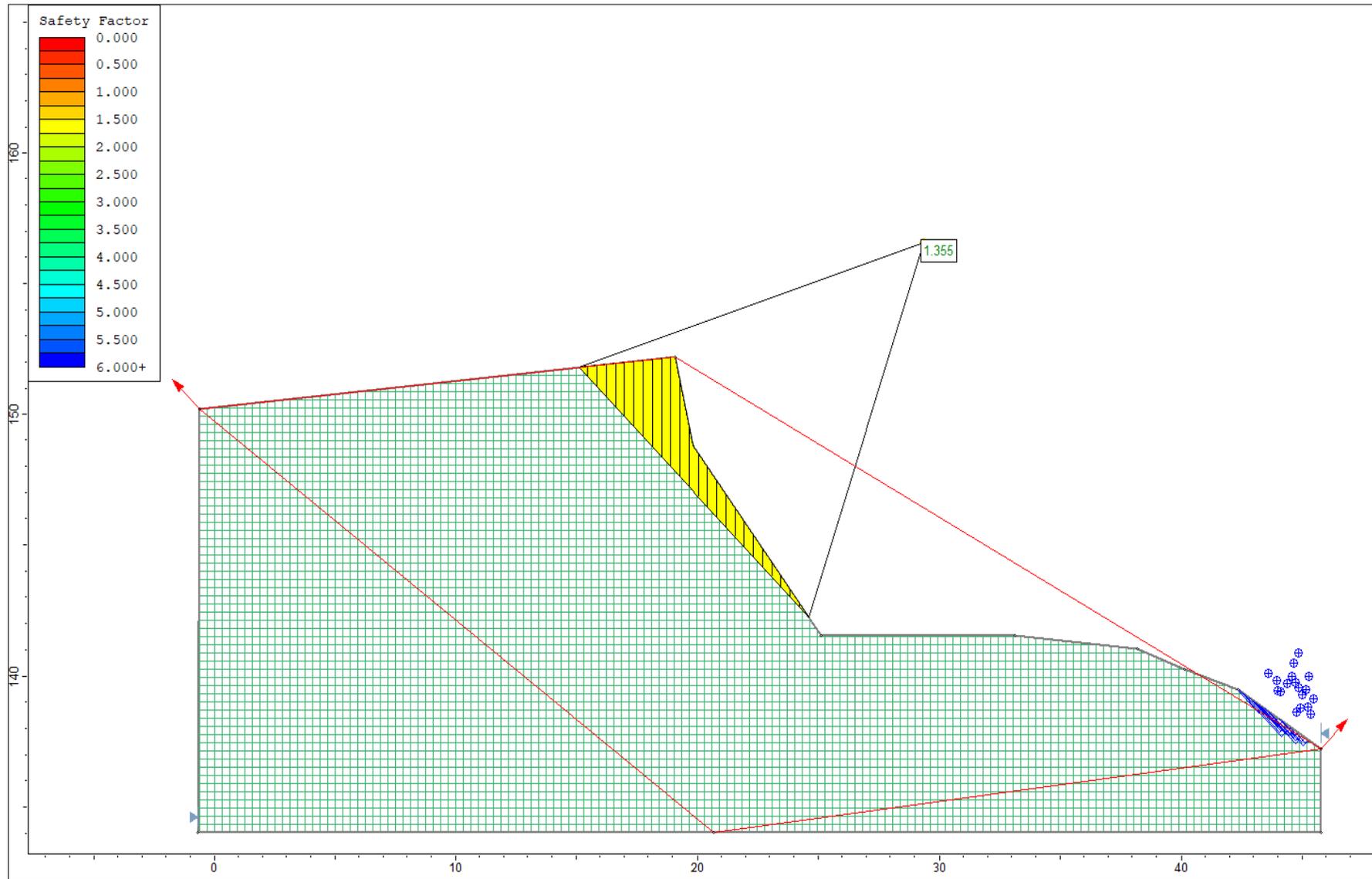


Figura 99. Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.355) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones Totales.

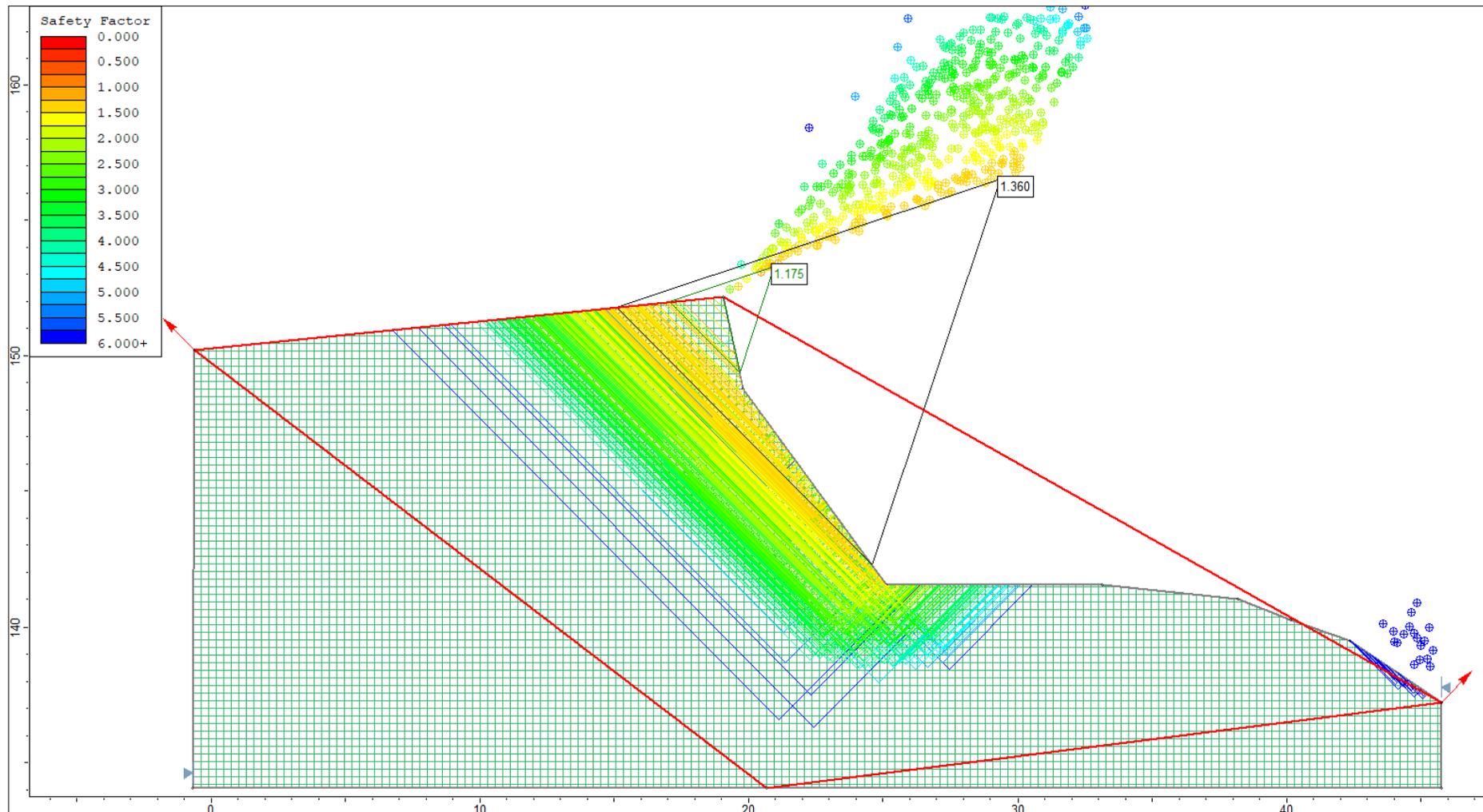


Figura 100. Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.360; 1.175) por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones Totales.

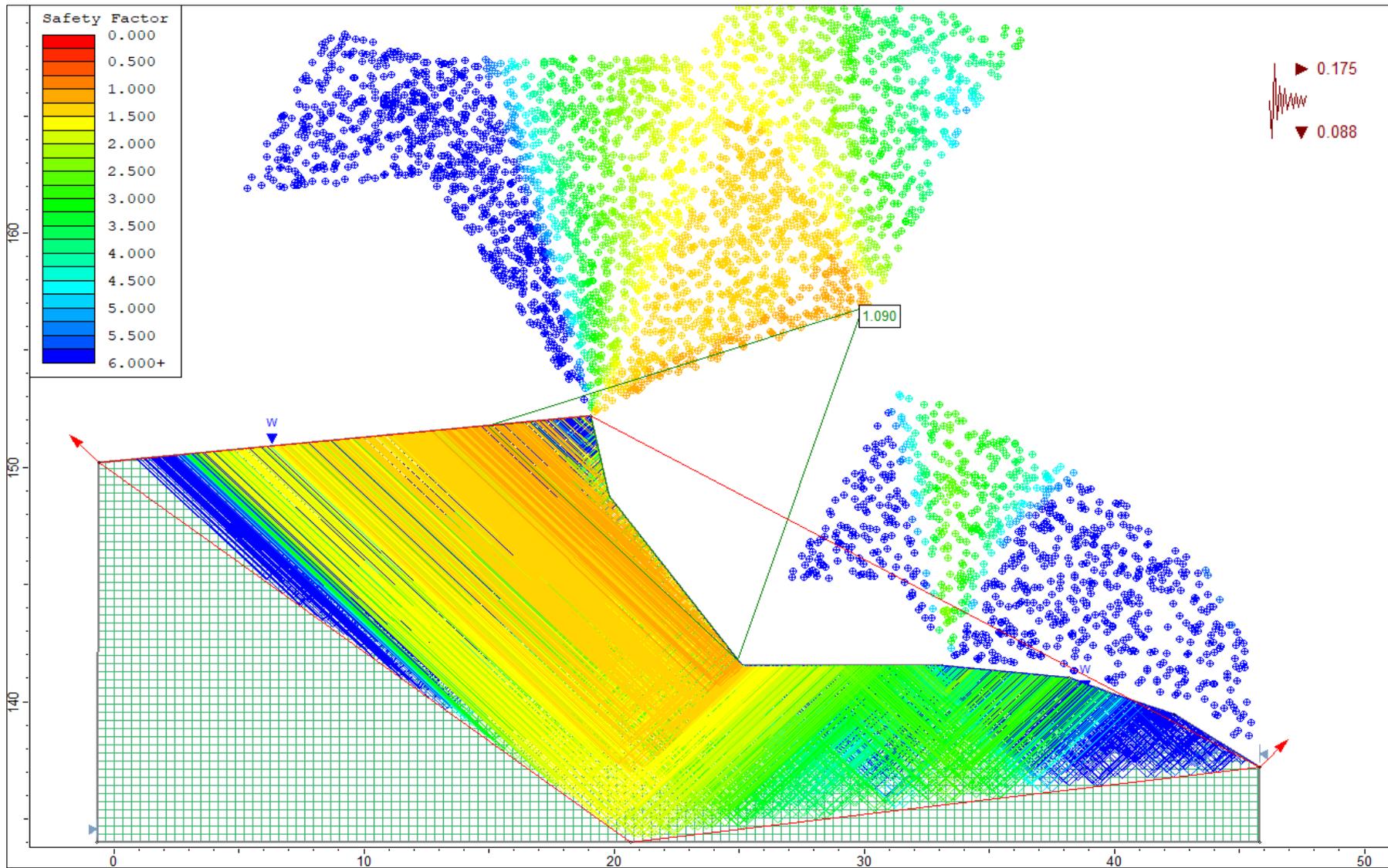


Figura 101. Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.090) por Método de Bishop Simplificado en condiciones de Tensiones efectivas más Sismicidad.

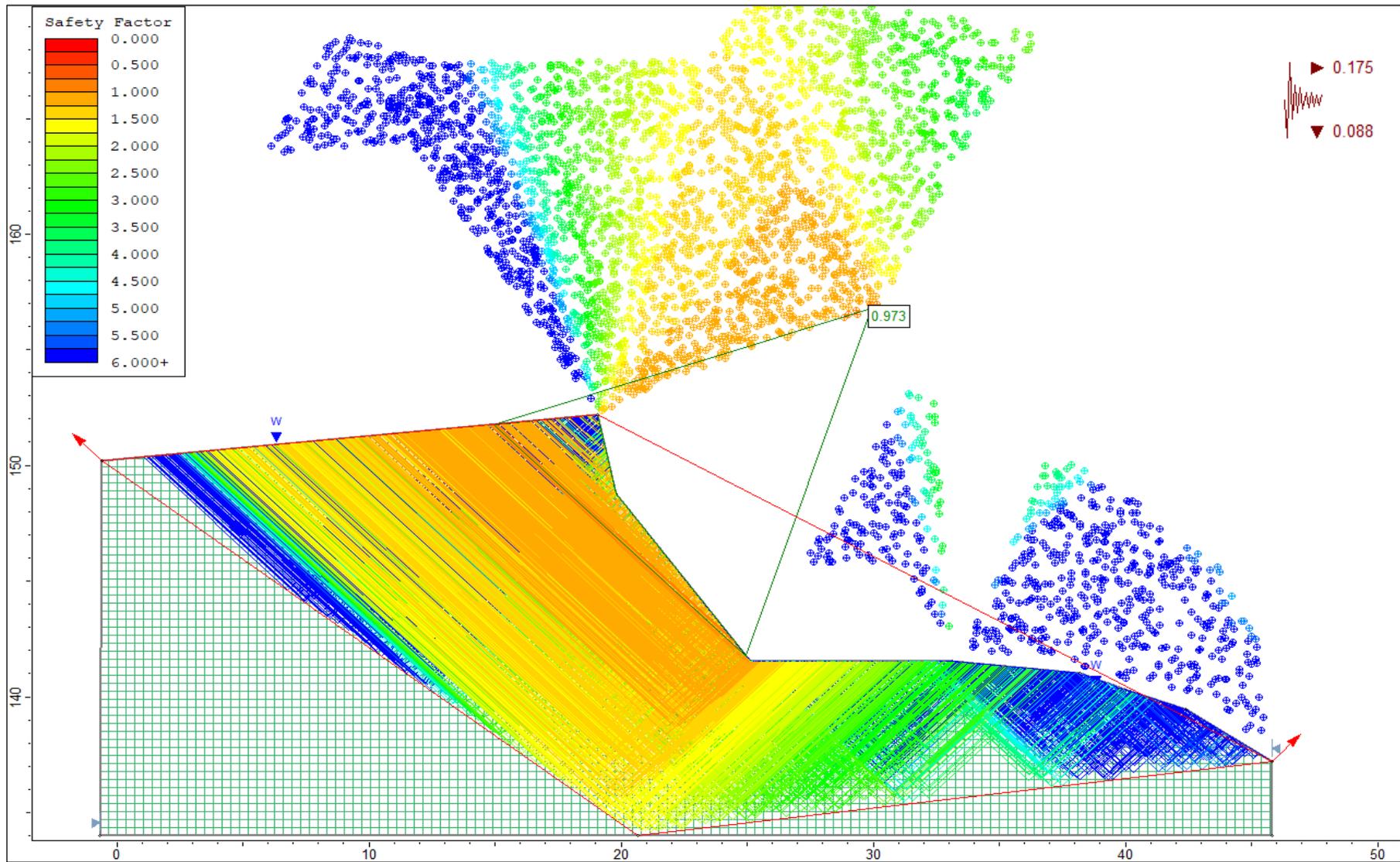


Figura 102. Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (0.973) por Método de Jambu Simplificado en condiciones de Tensiones efectivas más Sismicidad.

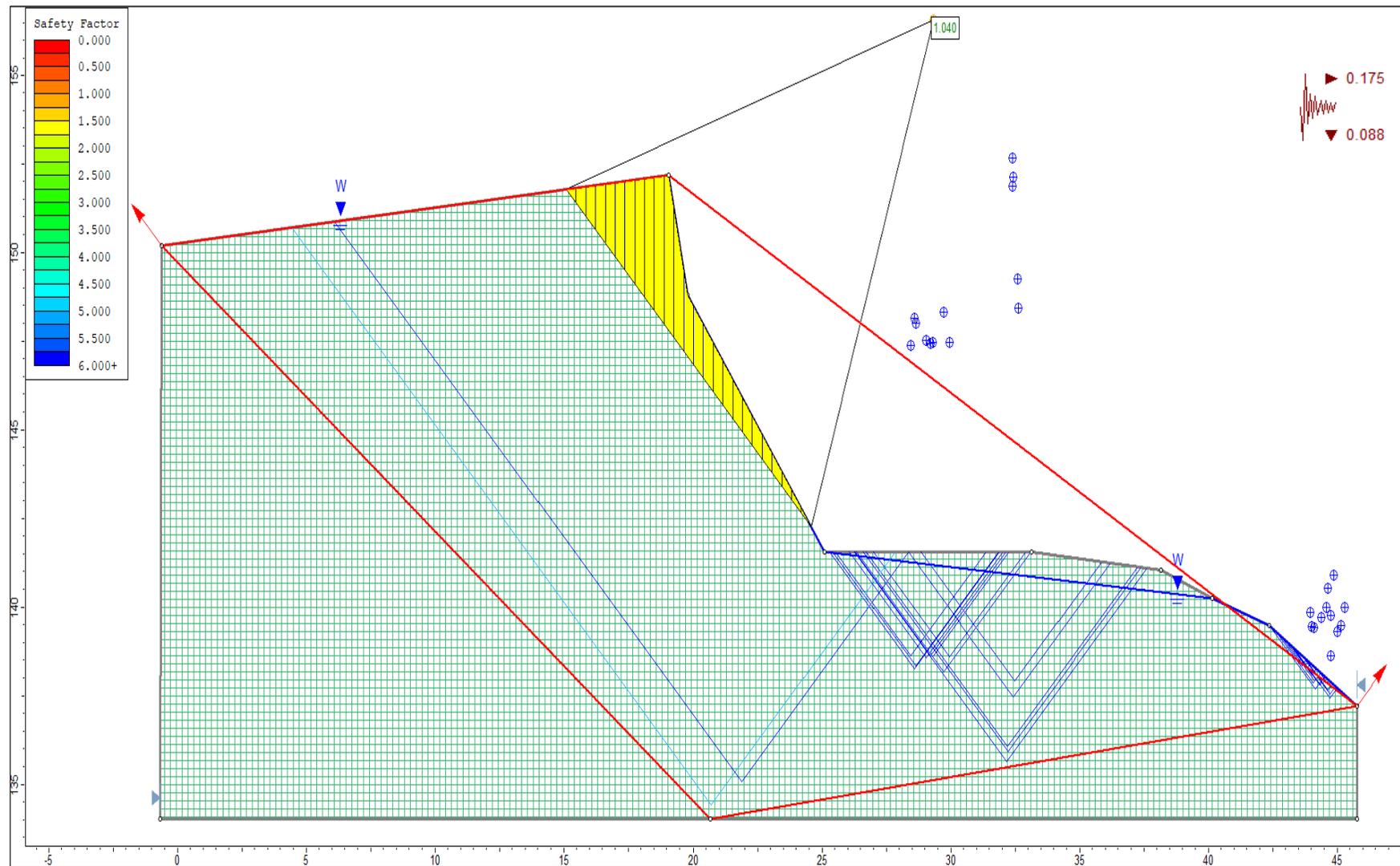


Figura 103. Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.040) por Método de Spencer en condiciones de Tensiones efectivas más Sismicidad.

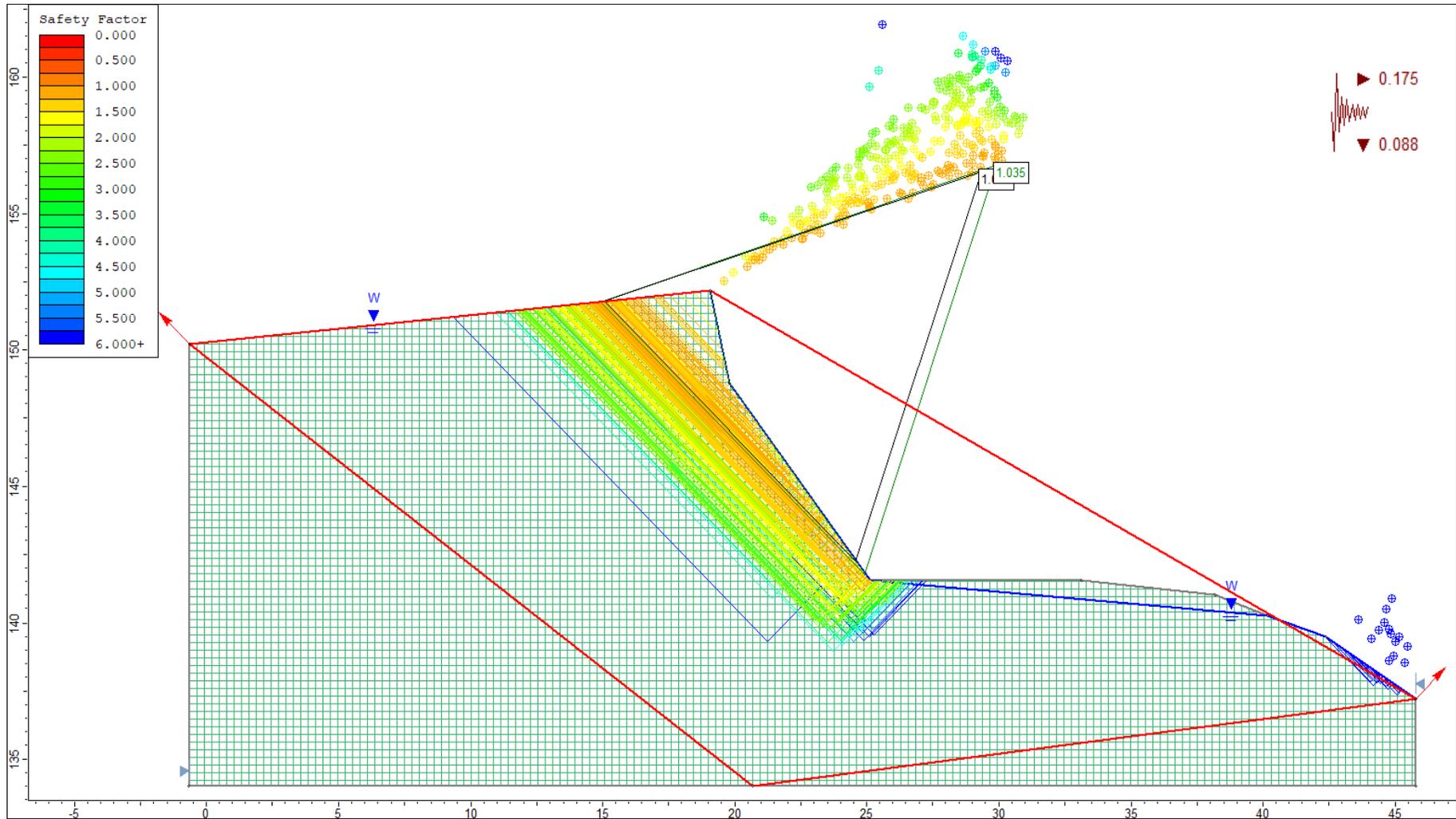


Figura 104. Estación EG-SM-C 07, Factor de Seguridad (1.035) por Método de GLE Morgenstern-Price en condiciones de Tensiones efectivas más Sismicidad

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos y sus correspondientes análisis, se presentan de acuerdo a los modelos geológico, geomecánico, geotécnico y numérico que determinan la inestabilidad geotécnica de los macizos rocosos de los taludes entre las progresivas del Km. 14+000 y Km. 20+000, de la carretera San Marcos – Cajabamba.

4.1.1 Modelo Geológico

La geología del proyecto de investigación, se constituye principalmente de rocas sedimentarias (90%), seguidas de depósitos cuaternarios (10%); agrupadas en sus correspondientes unidades estratigráficas, pertenecen al cretáceo inferior del grupo Goyllarisquizga (Ki-chim, Ki-sa, Ki-ca) y al cuaternario Holoceno (Q-al, Q-fl, Q-coal); se describe detalladamente a continuación:

Se identifican rocas tipo areniscas cuarzosas en la parte superior intercalada con arcillolitas grises y niveles de carbón en la parte inferior pertenecientes a la formación Chimú(identificable en el km19+000); arcillolitas grises intercaladas con calizas margosas y calizas arenosas pertenecientes a la formación Santa grises (identificable en km 18+000); areniscas cuarzosas rojizas intercaladas con delgadas capas de limolitas grises (identificable en el km 14+000 al km 17+000), pertenecientes a la Formación Carhuaz; depósitos coluviales compuestos por bloques, cantos y gravas angulosas; depósitos coluvio-aluviales, compuestos por cantos, gravas subangulosas en matriz limo arenosa; depósitos aluviales, compuesto por cantos, gravas y bloques subredondeados y depósito fluvial compuesto por cantos, bloques redondeados y arena (cobertura de la quebrada Cedrocucho).

Entre las estructuras, se evidencian deformaciones dúctiles y frágiles a escala regional y local, debido al tectonismo gobernados por fuerzas de distensión

y compresión, se determinó roca plegada (deformación dúctil) han originado dentro del área de estudio un pliegue de rumbo SO-NE que corresponde una fase tectónica principal que pliega con dirección predominante NO-SE la secuencia cretácica. La deformación se produjo en la formación santa Ki-Sa compuesta por calizas, calizas margosas, arcillolitas calcáreas, las medidas de los flancos son 30/195, 25/14 de Dip y Dip Direction respectivamente.

El fracturamiento (deformación frágil) de sus diversos componentes litológicos en algunos sectores, es más intenso que en otros, formando diaclasamiento. Por otra parte, se han identificado fallas normales (principalmente en la formación Carhuaz) visibles en las caras de algunos taludes.

4.1.2 Modelo Geomecánico

De las 7 estaciones de control localizados en el trayecto de carretera, se ha obtenido información de campo sobre los macizos rocosos que conforman los taludes, mediante la caracterización de las propiedades físicas de los macizos rocosos (roca intacta y discontinuidades) y parámetros geomecánicos mediante las clasificaciones geomecánicas RQD, GSI y RMR₈₉ determinando la calidad de la roca según las condiciones en las que se encuentran, presentando el resumen de los resultados en la Tabla 43.

Tabla 43. Clasificación geomecánica para cada talud analizado.

ESTACION	TIPO DE MATERIAL	CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS						
		RQD	CALIDAD	GSI	CALIDAD	RMR ₈₉	CALIDAD	CLASE
EG-SM-C 01	ROCA	48	MALA	44	REGULAR	42	MEDIA	III
EG-SM-C 02	ROCA	51	REGULAR	53	REGULAR	54	MEDIA	III
EG-SM-C 03	ROCA	52	REGULAR	49	REGULAR	54	MEDIA	III
EG-SM-C 04	ROCA	44	MALA	46	REGULAR	48	MEDIA	III
EG-SM-C 05	ROCA	65	REGULAR	41	REGULAR	43	MEDIA	III
EG-SM-C 06	ROCA	55	REGULAR	47	REGULAR	46	MEDIA	III
EG-SM-C 07	ROCA	54	REGULAR	36	MALA	42	MEDIA	III

Los resultados indican que, la clasificación RMR₈₉ de Bieniawski, los macizos rocosos analizados pertenecen a la clase III (calidad regular) con un rango de valoración de 42 a 54; pero la estación EG-SM-C 01, EG-SM-C 03 y EG-SM-C 07 su valor de clasificación es el límite inferior de este rango(regular) siendo estos últimos los más vulnerables a deslizamiento planar o cuña. Así mismo, bajo la

representación GSI, la estación EG-SM-C 07 discrepa del criterio de RMR89 y asume la calidad de mala, en cuanto a las demás estaciones sus rangos de valoración con el RMR89 coinciden. Por otra parte, la clasificación mediante RQD, la estación EG-SM-C 01 y EG-SM-C 04 tienen una calidad de mala y las otras estaciones una calidad regular.

Los resultados anteriores, se consideran como datos base para la valoración de las propiedades mecánicas de los macizos rocosos que constituye cada talud y posterior obtención de los parámetros de Hoek y Brown, así como los parámetros equivalentes de Mohr-Coulumb, para obtener los valores de cohesión y ángulo de fricción. Estos parámetros son adquiridos mediante la ayuda del Software RocData, el cuál considera el ingreso de parámetros iniciales (resistencia a la compresión uniaxial, parámetro intrínseco de la roca o m_i , GSI, valor de disturbación, y módulo de elasticidad) para su procesamiento.

4.1.3 Modelo Geotécnico y numérico

Partimos desde la proyección estereográfica analizando la orientación de las distintas familias de discontinuidades combinadas con la orientación del talud, con la finalidad de definir los modos de falla (falla planar y cuña) que podrían causar inestabilidad en los taludes. Posteriormente, con una apreciación más clara del mecanismo de falla dominante, se realiza el análisis cinemático para evaluar la probabilidad de falla. Para estos procedimientos, se tiene en cuenta las condiciones estructurales básicas de ocurrencia de falla, mencionados en el marco teórico.

Las proyecciones estereográficas y el análisis cinemático, se realizaron mediante el Software Dips v.7.0, Se analizó puntualmente para los casos de rotura planar y rotura tipo cuña, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 44, donde se demuestra la existencia de riesgo de falla planar y falla tipo cuña en las 7 estaciones.

Tabla 44. Análisis Estereográfico – Cinemático de los Taludes Críticos.

ESTACIÓN	TIPO DE ROTURA	PORCENTAJE (%)
EG-SM-C 01	PLANAR	4
	CUÑA	5
EG-SM-C 02	PLANAR	5
	CUÑA	6
EG-SM-C 03	PLANAR	35
	CUÑA	53
EG-SM-C 04	PLANAR	3
	CUÑA	6
EG-SM-C 05	PLANAR	3
	CUÑA	5
EG-SM-C 06	PLANAR	4
	CUÑA	6
EG-SM-C 07	PLANAR	33
	CUÑA	56

Luego se desarrolla el análisis de inestabilidad de los taludes del área de investigación relacionando los modelos anteriores (geológico y geomecánico), para determinar el factor seguridad de cada talud de acuerdo a las estaciones establecidas; haciendo uso del Software Slide v.6.0, donde se toma en cuenta que el tipo de superficie de falla es no circular y los métodos de análisis para equilibrio límite son: Bishop simplificado, Jambu simplificado, Spencer y LE/Morgenstern-Price.

El Factor de Seguridad se calculó para condiciones de tensiones totales o denominadas condiciones normales del terreno, y para condiciones de tensiones efectivas más la sismicidad. En el área de investigación se presenta precipitaciones abundantes la mayor parte del año, tal como se ve en la Tabla 13; los cuales son las principales causas de inestabilidad geotécnica; de este modo se utilizó los cálculos del FS en condiciones de tensiones efectivas.

Para definir las condiciones sísmicas se tomó como referencia la norma técnica E.030. El área de investigación corresponde la zona sísmica 3 con aceleración sísmica máxima de 0.35, aceleración sísmica horizontal ($K_h=0.175$) y vertical ($K_v=0.088$) calculado con el Software LoadCap, según la Normativa O.P.C.M.3274.

Para el análisis de resultados, se utiliza los rangos de Factores de Seguridad recomendados por Hoek 2007, mostrados en la Tabla 45.

Tabla 45. Rangos de Factores de Seguridad recomendados por Hoek 2007.

Factor Seguridad (FS)	
Rango	Condición
< 1.0	Inestable
1.0 – 1.3	Estable relativo
1.3 – 1.5	Estable a corto plazo
> 1.5	Estable a largo plazo

Fuente: Hoek, E. 2007.

Del análisis de los macizos rocosos en las estaciones geotécnicas con probabilidad de deslizamiento planar y desprendimientos de cuña fueron analizados por el método de equilibrio límite de dos dimensiones, se obtuvieron los siguientes resultados:

El Talud de la estación EG-SM-C 01 muestra estado estable a corto plazo porque sus Factores de Seguridad están entre 1.308 – 1.390; en condiciones de Tensiones Totales, pero en condiciones efectivas más sismicidad muestra un estado de estable relativo ya que tiene un FS=1.02; cuyos valores hacia la rotura en cuña y planar se encuentran en el cuadro siguiente.

EG-SM-C 01								
σ_{ci}	GSI	mb	s	a	C'	ϕ'	Erm	ROTURA
58Mpa	43	0.221689	0.00007490	0.509269	0.108885Mpa	44.41	2392.95Mpa	planar, cuña

El Talud de la estación EG-SM-C 02 muestra estado estable a largo plazo porque sus Factores de Seguridad están entre 1.96 – 2.90; en condiciones de Tensiones Totales, tanto como en condiciones efectivas más sismicidad; cuyos valores hacia la rotura en cuña y planar se encuentran en el cuadro siguiente.

EG-SM-C 02								
σ_{ci}	GSI	mb	s	a	C'	ϕ'	Erm	ROTURA
85Mpa	48	0.631759	0.00053340	0.506582	0.295191Mpa	54.2855	5341Mpa	planar, cuña

El Talud de la estación EG-SM-C 03 muestra estado estable a largo plazo porque sus Factores de Seguridad están entre 1.6 – 2.2; en condiciones de

Tensiones Totales, tanto como en condiciones efectivas más sismicidad; pero cabe mencionar que el talud es inestable por la presencia de fallas normales que generan planos en cuña, cuyos valores hacia la rotura en cuña y planar se encuentran en el cuadro siguiente.

EG-SM-C 03								
σ_{ci}	GSI	mb	s	a	C'	ϕ'	Erm	ROTURA
65Mpa	48	0.194983	0.00017223	0.506582	0.149392Mpa	46.98	3592.75Mpa	planar, cuña

El Talud de la estación EG-SM-C 04 muestra estado estable a largo plazo porque sus Factores de Seguridad están entre 1.6 – 2.50; en condiciones de Tensiones Totales, tanto como en condiciones efectivas más sismicidad; cuyos valores hacia la rotura en cuña y planar se encuentran en el cuadro siguiente.

EG-SM-C 04								
σ_{ci}	GSI	mb	s	a	C'	ϕ'	Erm	ROTURA
63Mpa	41	0.177395	0.00005360	0.510622	0.129441Mpa	41.84	2363.96Mpa	planar, cuña

El Talud de la estación EG-SM-C 05 muestra estado estable a largo plazo porque sus Factores de Seguridad están entre 1.8 – 3.2; en condiciones de Tensiones Totales, tanto como en condiciones efectivas más sismicidad; cuyos valores hacia la rotura en cuña y planar se encuentran en el cuadro siguiente.

EG-SM-C 05								
σ_{ci}	GSI	mb	s	a	C'	ϕ'	Erm	ROTURA
55Mpa	41	0.312761	0.00019341	0.510622	0.131262Mpa	49.37	2871.41Mpa	planar, cuña

El Talud de la estación EG-SM-C 06 muestra estado estable a largo plazo porque sus Factores de Seguridad están entre 1.9 – 3.3; en condiciones de Tensiones Totales, tanto como en condiciones efectivas más sismicidad; cuyos valores hacia la rotura en cuña y planar se encuentran en el cuadro siguiente.

EG-SM-C 06								
σ_{ci}	GSI	mb	s	a	C'	ϕ'	Erm	ROTURA
35Mpa	46	0.169026	0.00012341	0.507551	0.103594Mpa	38.35	2349.65Mpa	planar, cuña

El Talud de la estación EG-SM-C 07 muestra estado estable relativo porque sus Factores de Seguridad están entre 1.1 – 1.3; en condiciones de Tensiones Totales, pero en condiciones efectivas más sismicidad muestra un estado de inestable ya que tiene un FS=0.93 cuyos valores hacia la rotura en cuña y planar se encuentran el cuadro siguiente.

EG-SM-C 07								
oci	GSI	mb	s	a	C'	ϕ'	Erm	ROTURA
45Mpa	36	0.046636	0.00001200	0.519528	0.0436733Mpa	32.48	1190.08	planar, cuña

Finalmente, de acuerdo al factor seguridad promedio resultante de los análisis de equilibrio límite, expuesto en la tabla 45, se define las condiciones de estabilidad de los taludes representados por cada punto de control, según el rango FS recomendado por Hoek (2007). Estas condiciones, permiten realizar una zonificación en el tramo de carretera, la cual se visualiza en los planos del Anexos.

ESTACIONES	FACTOR DE SEGURIDAD / MÉTODOS							
	Bishop simplificado		Janbu Simplificado		Spencer		Gle/Morgenstern-Price	
	Condiciones Normales (TT)	Tensiones Efectivas más sismicidad (TE. + S)	Condiciones Normales (TT)	Tensiones Efectivas más sismicidad (TE. + S)	Condiciones Normales (TT)	Tensiones Efectivas más sismicidad (TE. + S)	Condiciones Normales (TT)	Tensiones Efectivas más sismicidad (TE. + S)
EG-SM-C 01	1.353	1.036	1.308	0.988	1.390	1.050	1.332	1.007
EG-SM-C 02	2.660	2.090	2.57	1.96	2.900	2.210	2.900	2.03
EG-SM-C 03	2.132	1.695	2.205	1.668	2.249	2.008	2.227	1.695
EG-SM-C 04	2.442	1.792	2.391	1.693	2.507	-	2.552	1.806
EG-SM-C 05	3.168	1.913	3.147	1.839	3.078	1.892	3.250	1.874
EG-SM-C 06	2.510	1.967	2.45	2.018	3.304	2.112	2.558	2.129
EG-SM-C 07	1.250	1.090	1.14	0.973	1.355	1.040	1.360	1.035

4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Mediante la hipótesis planteada, para la evaluación de la inestabilidad geotécnica de taludes entre las progresivas km 14+000 al km 20+000 de la carretera San Marcos- Cajabamba, provincia de San Marcos; se contrasta la hipótesis planteada con la presentación de los resultados, interpretación, análisis y discusión; confirmándose que, el área investigada que comprende los taludes, está condicionada por factores geológicos, comprendiendo secuencias litológicas de rocas sedimentarias del Cretácico inferior (Formaciones: Chimú, Santa y Carhuaz), y depósitos cuaternarios (coluvio-aluviales, aluviales y fluviales), donde el componente rocoso es de calidad regular (predominantemente), de acuerdo con las clasificaciones geomecánicas RQD, GSI y RMR89; factores geomorfológicos, definido por los procesos geológicos externos (meteorización y erosión) y por el tectonismo regional. Además se confirma que, la inestabilidad de los taludes debido a los factores detonantes como la precipitación que erosiona gradualmente la superficie del terreno por escorrentía; la infiltración de agua, al encontrar materiales de suelo y roca permeables, y la presencia de discontinuidades que disminuyen la resistencia de los macizos rocosos en condiciones de humedad y/o saturación; así mismo, la sismicidad, que repercute directamente en los macizos rocosos incrementando la abertura de las discontinuidades y la aparición de otras. De esta forma, se demuestra la hipótesis acorde a la realidad del problema, donde la inestabilidad geotécnica depende de las variables precipitación, infiltración y sísmica.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La estratigrafía de las litomorfoestructuras, comprende afloramientos de rocas del Grupo Goyllarisquizga como las Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz; y depósitos cuaternarios de tipo coluvio-aluvial, aluvial y fluvial.

Se tiene como estructuras: un anticlinal volcado (con orientación SO-NE), fallas normales que han originado el alto grado de fracturamiento en los macizos rocosos; y a la vez moldean la geomorfología, identificándose unidades morfogenéticas como planicies 26.4%, lomadas 55.2%, laderas 12.1%, y escarpes 6.3%.

Según la caracterización geomecánica, los macizos rocosos del área de investigación se clasifican: según RMR_{89} en calidad regular (clase III); según RQD en calidad regular (51% - 65%) y calidad mala (44% - 49%); según GSI en calidad regular (41-53) y calidad mala (36).

El análisis estereográfico-cinemático mediante Software Dips de las discontinuidades y el ángulo de fricción, determinaron mayor probabilidad de deslizamiento por falla tipo cuña en la EG-SM-C 07 con porcentaje máximo de 56% y porcentaje mínimo de 5% en la EG-SM-C 05; por falla planar en la EG-SM-C 03 con porcentaje máximo de 35% y porcentaje mínimo de 3% en la EG-SM-C 04.

El área de investigación presenta las siguientes zonas críticas ($FS < 1.0 =$ inestables), la estación EG-SM-C 07 en condición de Tensiones efectivas más Sismicidad, es inestable; la estación EG-SM-C 01 es estable relativo; los otros taludes son estables a largo plazo a excepción de la estación EG-SM-C 03 se considera inestable por la alta probabilidad de fallas tipo cuña (53%).

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda a los investigadores interesados en la rama de la geotecnia realizar ensayos triaxiales para determinar los ángulos de fricción y cohesión, con la finalidad de obtener resultados cuantitativos del factor de seguridad.

Se recomienda al Municipio de San Marcos actuar de manera preventiva con el monitoreo y mantenimiento de aquellos taludes que se determinaron inestables y/o se consideren con una inestabilidad relativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allaby, M. 2008. A Dictionary of Earth Science. Third Edition. Oxford Edition. New York. 663 pp.
- Bieniawski, Z. T. 1989. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering.
- Caceres, D. 2019. Evaluación geotécnica en inestabilidad de taludes en zonas críticas en la carretera Kuntur Wasi en el tramo km. 45+000 - km. 52+000. Cajamarca-Perú: Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Das, B. 2013. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. California: Cengage Learning Editores.
- Dávila, J. 2011. Diccionario Geológico. Perú: INGEMMET.901 p.
- Deere, D. U. 1989. Rock Quality Designation (RQD) after Twenty Years. U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- González de Vallejo, L. I. 2004. Ingeniería Geológica. Madrid, España:editorial Pearson Educacion.
- HOB Consultores S.A. 2012. Estudio Definitivo para el Mejoramiento de la Carretera San Marcos- Cajabamba- Sausacocha, tramo San Marcos – Cajabamba
- Hoek, E., Carranza Torres, C., & Corkum, B. 2002. El criterio de rotura de Hoek - Brown - Edición 2002. Minnsesota.
- Hoek, E. 2013. Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium.
- Hoek, E., & Brown, E. T. 2019. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(3), 445–463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
- Hudson, J., & Harrison, J. 2000. Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles.Vol. Second Impression 2000, p. 114. London: Elsevier Science Ltd.

- 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, Peru: Tesis de Magister. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Rojas, C. 2018. Comportamiento geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas - El Tayal Provincia de Chota. Cajamarca-Perú: Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Valdera, A. 2019. Evaluación geomecánica-geotécnica de la carretera El Tayal - Santa Isolina Bajo, Provincia de Chota Cajamarca 2017: Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Suarez, J. 2005. Deslizamiento y Estabilidad de taludes en Zonas Tropicales. Bucaramanga, Colombia: Publicaciones UIS.
- Wittke y Walter. 2014. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). 1st ed. Wiley. <https://www.perlego.com/book/1000255/rock-mechanics-based-on-an-anisotropic-jointed-rock-model-ajrm-pdf>.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. 2004. Rock Slope Engineering: Civil and Mining. Taylor & Francis Group, Ed.; 4th Edition. 2005.

ANEXOS

- **REGISTROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO CON PUNTOS DE CONTROL.**
- **PLANOS**
 - 01. Plano de ubicación.**
 - 02. Plano MDE (Modelo Digital de Elevación).**
 - 03. Plano de Unidades Morfogenéticas.**
 - 04. Plano Geológico-Estructural.**
 - 05. Plano Geomecánico.**
 - 06. Plano de Estaciones Geotécnicas.**
 - 07. Plano de zonificación Geotécnico.**