

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



TESIS PROFESIONAL

**DETERMINACIÓN DE INESTABILIDAD GEOTÉCNICA
DE TALUDES ENTRE EL KM. 34+700 Y KM. 42+200,
DE LA CARRETERA CIUDAD DE DIOS - CAJAMARCA**

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

**Presentado por:
Bach. JOSE DANIEL DIAZ CASTAÑEDA**

**Asesor:
Dr. SEGUNDO REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO**

**CAJAMARCA – PERÚ
2022**

AGRADECIMIENTO

Agradecido con Dios por las múltiples oportunidades de progreso que me ha brindado en la vida. A mi familia, por su apoyo incondicional. A los docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica de mi alma mater, la Universidad Nacional de Cajamarca, por compartir sus experiencias en campo y en las aulas.

Agradecimiento especial, al Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado por sus orientaciones, paciencia y constantes supervisiones durante el desarrollo de mi tesis.

DEDICATORIA

Dedicada a mi familia. A mi madre, por el impetuoso trabajo que realizó para educar a mi hermano y a mí desde niños. A mi padre, que en la gloria de Dios se encuentre, hombre influyente por mi gusto hacia las ciencias, que en donde se encuentre se sienta orgulloso de su hijo recibido de ingeniero. A mi hermano, del cual espero no solo ser un ejemplo, sino también despertarle la motivación para seguir formándose profesionalmente.

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE FOTOS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xx
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
2.1.1. A Nivel Internacional.....	4
2.1.2. A Nivel Nacional.....	4
2.1.3. A Nivel Local.....	5
2.2. BASES TEÓRICAS.....	6
2.2.1. Geodinámica.....	6
2.2.2. Movimientos en Masa.....	8
2.2.3. Clasificación Geomecánica de la Roca.....	13
2.2.4. Criterios de Rotura.....	18
2.2.5. Metodología para el Análisis de Taludes.....	25
2.2.6. Sismicidad.....	34
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	36

	Pág.
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	38
3.1. UBICACIÓN	38
3.2. ACCESO	38
3.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
3.3.1. Tipo de Investigación.....	39
3.3.2. Población de estudio.	39
3.3.3. Muestra.	40
3.3.4. Unidad de Análisis.....	40
3.3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	40
3.3.6. Procedimiento.....	42
3.4. CLIMA.	43
3.5. GEOLOGÍA LOCAL.....	45
3.5.1. Estratigrafía.....	45
3.5.2. Geología Estructural.....	53
3.5.3. Unidades Morfogenéticas.....	60
3.5.4. Geodinámica.....	64
3.6. GEOTECNIA.....	67
3.6.1. Inventario de condiciones geológica-geotécnicas de los taludes.....	70
3.6.2. Punto de control 01 entre progresivas km. 34+700 al km. 35+033.....	74
3.6.3. Punto de control 02 entre progresivas km. 35+033 al km. 35+111.....	87
3.6.4. Punto de control 03 entre progresivas Km. 36+270 al Km. 36+366.....	99
3.6.5. Punto de control 04 entre progresivas km. 36+366 al km. 36+658.....	111
3.6.6. Punto de control 05 entre progresivas Km. 38+383 al Km. 38+471.....	120
3.6.7. Punto de control 06 entre progresivas km. 38+775 al km. 38+887.....	129
3.6.8. Punto de control 07 entre progresivas km. 39+678 al km. 39+801.....	141
3.6.9. Punto de control 08 entre progresivas km. 40+000 al km. 40+094.....	153
3.6.10. Punto de control 09 entre progresivas km. 41+525 al km. 41+708.....	165
CAPÍTULO IV	
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	177
4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	177
4.1.1. Modelo Geológico.....	177
4.1.2. Modelo Geotécnico.....	179
4.1.3. Modelo Numérico.....	183
4.2. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.	190

	Pág.
CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	191
5.1. CONCLUSIONES.....	191
5.2. RECOMENDACIONES.	192
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	193
ANEXOS.....	195

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1: Clasificación de movimientos en masa.....	10
Tabla 2.2: Índice de calidad de la roca.....	14
Tabla 2.3: Índice de resistencia geológica (GSI).....	16
Tabla 2.4: Parámetros de Clasificación geomecánica RMR_{89}	17
Tabla 2.5: Clasificación del macizo rocoso en relación al índice RMR_{89}	17
Tabla 2.6: Relación entre la densidad y el ángulo de fricción en suelos sin cohesión.....	19
Tabla 2.7: Guías para estimar el factor de alteración “D”.....	23
Tabla 2.8: Factores de zona “Z”.....	35
Tabla 3.1: Georeferenciación del área de estudio en Sistema UTM, DATUM WGS-84 - Zona 17S.....	38
Tabla 3.2: Acceso al área de investigación.....	39
Tabla 3.3: Datos históricos meteorológicos, comprendidos entre 1995 y 2011....	43
Tabla 3.4: Clasificación de Unidades Morfogenéticas.....	60
Tabla 3.5: Unidades Morfogenéticas del área de investigación.....	63
Tabla 3.6: Parámetros de entrada para el cálculo de los coeficientes sísmicos...	69
Tabla 3.7: Descripción de escenarios para el análisis de taludes.....	70
Tabla 3.8: Inventario de condiciones geológica-geotécnicas de los taludes.....	71
Tabla 3.9: Localización y descripción del talud en el PC-01.....	74
Tabla 3.10: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-01.....	75
Tabla 3.11: Cálculo de RQD del Talud PC-01.....	77
Tabla 3.12: Valoración RMR_{89} del Talud PC-01.....	77
Tabla 3.13: Localización y descripción del talud en el PC-02.....	87
Tabla 3.14: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-02.....	88
Tabla 3.15: Cálculo de RQD del Talud PC-02.....	89
Tabla 3.16: Valoración RMR_{89} del Talud PC-02.....	89
Tabla 3.17: Localización y descripción del talud en el PC-03.....	99
Tabla 3.18: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-03.....	100
Tabla 3.19: Datos de ensayo granulométrico de trinchera para el talud PC-03....	101
Tabla 3.20: Localización y descripción del talud en el PC-04.....	111

	Pág.
Tabla 3.21: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-04.....	112
Tabla 3.22: Localización y descripción del talud en el PC-05.....	120
Tabla 3.23: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-05.....	121
Tabla 3.24: Localización y descripción del talud en el PC-06.....	129
Tabla 3.25: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-06.....	130
Tabla 3.26: Cálculo de RQD del Talud PC-06.....	131
Tabla 3.27: Valoración RMR_{89} del Talud PC-06.....	131
Tabla 3.28: Localización y descripción del talud en el PC-07.....	141
Tabla 3.29: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-07.....	142
Tabla 3.30: Cálculo de RQD del Talud PC-07.....	143
Tabla 3.31: Valoración RMR_{89} del Talud PC-07.....	143
Tabla 3.32: Localización y descripción del talud en el PC-08.....	153
Tabla 3.33: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-08.....	154
Tabla 3.34: Cálculo de RQD del Talud PC-08.....	155
Tabla 3.35: Valoración RMR_{89} del Talud PC-08.....	155
Tabla 3.36: Localización y descripción del talud en el PC-09.....	165
Tabla 3.37: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-09.....	166
Tabla 3.38: Cálculo de RQD del Talud PC-09.....	167
Tabla 3.39: Valoración RMR_{89} del Talud PC-09.....	167
Tabla 4.1: Unidades estratigráficas identificadas en el área de investigación.....	178
Tabla 4.2: Resultados de clasificación geomecánica para cada talud analizado.....	179
Tabla 4.3: Resultado de análisis estereográfico-cinemático para cada talud.....	182
Tabla 4.4: Rango de factor de seguridad, recomendados por Hoek, 2007.....	183
Tabla 4.5: Resultados de los métodos de equilibrio límite analizados en los seis (6) escenarios para cada talud.....	184

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1: Nomenclatura de taludes y ladera.....	9
Figura 2.2: Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento.....	11
Figura 2.3: Deslizamientos traslacionales en roca: (a) Planar. (b) En cuña.....	13
Figura 2.4: Representación esquemática para el conteo de discontinuidades en una línea de muestreo (cinta métrica).....	13
Figura 2.5: Estimación del índice Geológico de resistencia, GSI, en base a una descripción geológica de macizo rocoso.....	15
Figura 2.6: Representación esquemática del criterio de rotura no lineal de Hoek-Brown expresado en términos de esfuerzos principales.....	20
Figura 2.7: Representación esquemática del criterio de rotura no lineal de Hoek-Brown expresado en términos de esfuerzos normales y de corte en el plano de rotura a partir de Hoek y Brown, 1980.....	21
Figura 2.8: Relaciones entre esfuerzos principales mayores y menores para el criterio de Hoek-Brown y el equivalente de Mohr-Coulomb.....	25
Figura 2.9: Análisis de estabilidad por el método ordinario de dovelas: (a) superficie de la prueba de falla; (b) fuerzas actuantes en la n-ésima dovela.....	28
Figura 2.10: Método de las dovelas de Bishop simplificado.....	29
Figura 2.11: Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada consideradas en el método de Spencer y Morgenstern – Price.....	30
Figura 2.12: (a) Condición estructural de una rotura planar. (b) Representación estereográfica (los círculos máximos que se encuentren en el área sombreada son propensos a generar deslizamiento planar).....	32
Figura 2.13: (a) condición estructural de un deslizamiento en cuña. (b) Representación estereográfica.....	34
Figura 2.14: Zonificación sísmica en el territorio peruano.....	35
Figura 3.1: Accesibilidad al área de investigación.....	39
Figura 3.2: Representación de perfil del talud y disposición de los materiales que lo conforma.....	65
Figura 3.3: Localización del área de investigación en Zona Sísmica 3.....	68
Figura 3.4: Cálculo del coeficiente sísmico horizontal y vertical mediante el Software Loadcap de Geostru.....	69

	Pág.
Figura 3.5: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda); y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha), de roca granodiorita en el talud PC-01.....	78
Figura 3.6: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-01, indicando una probabilidad de falla de 11.11%.....	79
Figura 3.7: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-01, indicando una probabilidad de falla de 21.11%.....	80
Figura 3.8: Análisis slide del talud PC-01, en Condiciones Normales.....	81
Figura 3.9: Análisis slide del talud PC-01, en condiciones de Saturación Parcial...	82
Figura 3.10: Análisis slide del talud PC-01, en condiciones de Saturación Total.....	83
Figura 3.11: Análisis slide del talud PC-01, en condiciones de Sismicidad.....	84
Figura 3.12: Análisis slide del talud PC-01, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.....	85
Figura 3.13: Análisis slide del talud PC-01, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.....	86
Figura 3.14: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda); y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha), de roca arenisca de la Fm. Farrat, en el talud PC-02.....	90
Figura 3.15: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-02, indicando una probabilidad de falla de 11.43%.....	91
Figura 3.16: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-02, indicando una probabilidad de falla de 43.19%.....	92
Figura 3.17: Análisis slide del talud PC-02, en Condiciones Normales	93
Figura 3.18: Análisis slide del talud PC-02, en condiciones de Saturación Parcial...	94
Figura 3.19: Análisis slide del talud PC-02, en condiciones de Saturación Total	95

	Pág.
Figura 3.20: Análisis slide del talud PC-02, en condiciones de Sismicidad.....	96
Figura 3.21: Análisis slide del talud PC-02, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.....	97
Figura 3.22: Análisis slide del talud PC-02, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.....	98
Figura 3.23: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda); y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha), de suelo en depósito coluvio-aluvial, en el talud PC-03.....	103
Figura 3.24: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda); y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha), de roca arenisca calcárea de la Fm. Inca, en el talud PC-03.....	104
Figura 3.25: Análisis slide del talud PC-03, en Condiciones Normales.....	105
Figura 3.26: Análisis slide del talud PC-03, en condiciones de Saturación Parcial...	106
Figura 3.27: Análisis slide del talud PC-03, en condiciones de Saturación Total.....	107
Figura 3.28: Análisis slide del talud PC-03, en condiciones de Sismicidad.....	108
Figura 3.29: Análisis slide del talud PC-03, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.....	109
Figura 3.30: Análisis slide del talud PC-03, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad Máxima.....	110
Figura 3.31: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda); y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha), de roca arenisca calcárea de la Fm. Inca, en el talud PC-04.....	113
Figura 3.32: Análisis slide del talud PC-04, en Condiciones Normales.....	114
Figura 3.33: Análisis slide del talud PC-04, en condiciones de Saturación Parcial....	115
Figura 3.34: Análisis slide del talud PC-04, en condiciones de Saturación Total	116
Figura 3.35: Análisis slide del talud PC-04, en condiciones de Sismicidad.....	117
Figura 3.36: Análisis slide del talud PC-04, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad	118
Figura 3.37: Análisis slide del talud PC-04, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.....	119

	Pág.
Figura 3.38: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda); y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha), de limolita ferruginosa de la Fm. Inca, en el talud PC-05.....	122
Figura 3.39: Análisis slide del talud PC-05, en Condiciones Normales.....	123
Figura 3.40: Análisis slide del talud PC-05, en condiciones de Saturación Parcial...	124
Figura 3.41: Análisis slide del talud PC-05, en condiciones de Saturación Total.....	125
Figura 3.42: Análisis slide del talud PC-05, en condiciones de Sismicidad.....	126
Figura 3.43: Análisis slide del talud PC-05, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.....	127
Figura 3.44: Análisis slide del talud PC-05, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.....	128
Figura 3.45: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda); y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha), de calizas Fm. Chúlec, en el talud PC-06.....	132
Figura 3.46: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-06, indicando una probabilidad de falla de 14.29 %.....	133
Figura 3.47: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-06, indicando una probabilidad de falla de 12.65 %.....	134
Figura 3.48: Análisis slide del talud PC-06, en Condiciones Normales.....	135
Figura 3.49: Análisis slide del talud PC-06, en condiciones de Saturación Parcial....	136
Figura 3.50: Análisis slide del talud PC-06, en condiciones de Saturación Total....	137
Figura 3.51: Análisis slide del talud PC-06, en condiciones de Sismicidad.....	138
Figura 3.52: Análisis slide del talud PC-06, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad	139
Figura 3.53: Análisis slide del talud PC-06, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.....	140

	Pág.
Figura 3.54: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de roca arenisca de la Fm. Carhuaz, en el talud PC-07.....	144
Figura 3.55: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-07, indicando una probabilidad de falla de 27.08%.....	145
Figura 3.56: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-07, indicando una probabilidad de falla de 57.99%.....	146
Figura 3.57: Análisis slide del talud PC-07, en Condiciones Normales.....	147
Figura 3.58: Análisis slide del talud PC-07, en condiciones de Saturación Parcial...	148
Figura 3.59: Análisis slide del talud PC-07, en condiciones de Saturación Total....	149
Figura 3.60: Análisis slide del talud PC-07, en condiciones de Sismicidad.....	150
Figura 3.61: Análisis slide del talud PC-07, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.....	151
Figura 3.62: Análisis slide del talud PC-07, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.....	152
Figura 3.63: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda); y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha), de roca arenisca de la Fm. Carhuaz, en el talud PC-08.....	156
Figura 3.64: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-08, indicando una probabilidad de falla de 0.00%.....	157
Figura 3.65: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-08, indicando una probabilidad de falla de 30.76%.....	158
Figura 3.66: Análisis slide del talud PC-08, en Condiciones Normales.....	159
Figura 3.67: Análisis slide del talud PC-08, en condiciones de Saturación Parcial...	160
Figura 3.68: Análisis slide del talud PC-08, en condiciones de Saturación Total.....	161

	Pág.
Figura 3.69: Análisis slide del talud PC-08, en condiciones de Sismicidad.....	162
Figura 3.70: Análisis slide del talud PC-08, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.....	163
Figura 3.71: Análisis slide del talud PC-08, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.....	164
Figura 3.72: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda); y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha), de roca caliza de la Fm. Chúlec, en el talud PC-09.....	168
Figura 3.73: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-09, indicando una probabilidad de falla de 25.71 %.....	169
Figura 3.74: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-09, indicando una probabilidad de falla de 29.73 %.....	170
Figura 3.75: Análisis slide del talud PC-09, en Condiciones Normales.....	171
Figura 3.76: Análisis slide del talud PC-09, en condiciones de Saturación Parcial...	172
Figura 3.77: Análisis slide del talud PC-09, en condiciones de Saturación Total....	173
Figura 3.78: Análisis slide del talud PC-09, en condiciones de Sismicidad.....	174
Figura 3.79: Análisis slide del talud PC-09, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.....	175
Figura 3.80: Análisis slide del talud PC-09, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.....	176
Figura 4.1: Criterio de análisis de deslizamiento de planos de discontinuidad en cuñas.....	181
Figura 4.2: Criterio de análisis de cuña directa e inversa.....	182

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 3.1: Depósitos cuaternarios de tipo antrópico y fluvial. Parte baja del Valle Jequetepeque. Coordenadas: E 697282; N 9199954; Cota 418 m.s.n.m.....	46
Foto 3.2: Depósito cuaternario aluvial localizado en quebrada. Coordenadas: E 697299; N 9200613; Cota 426 m.s.n.m.....	47
Foto 3.3: Depósito coluvial, compuesto por clastos de roca granodiorita sueltos meteorizados, formando cono de derrubio. Coordenadas: E 696972; N 9199843; Cota: 401 m.s.n.m.....	48
Foto 3.4: Depósito coluvio aluvial con erosión columnar en el corte de carretera, hacia el margen derecho de la Carretera Cajamarca – Ciudad de Dios. Coordenadas: E 697659; N 9200802; Cota 433 m.s.n.m.....	49
Foto 3.5: (A y B) Roca intrusiva, granodiorita, que forma parte de las intrusiones granitoides del Batolito. Coordenadas: E 697302; N 9199985; Cota 428 m.s.n.m.....	49
Foto 3.6: (a) Secuencia litológica de calizas arenosas fosilífera (parte superior), con limolitas calcáreas y margas (parte inferior) Az= N 75°, Buz= 20°S. (b) y (c) Caliza arenosa de textura bioesparítica. Coordenadas: E 699317; N 9201309; Cota= 410 m.s.n.m.....	50
Foto 3.7: Intercalación de areniscas calcáreas con limolitas ferruginosas, pertenecientes a la Formación Inca. Az= N 86°, Buz= 70°S. Coordenadas: E 698117; N 9201220; Cota = 410 m.s.n.m.....	51
Foto 3.8: Estratos de areniscas con espesor promedio de 1.5m, ligera a moderadamente meteorizada, perteneciente a la Formación Farrat. Az= N 98°, Buz= 68° SW. Coordenadas: E 699708, N 9201788, Cota = 430 m.s.n.m.....	52
Foto 3.9: Areniscas cuarzosas intercaladas con limolitas grises de textura laminar, pertenecientes a la Formación Carhuaz, identificables en corte de quebrada cerca de la Carretera. Los estratos de roca presentan un Az= N 277°, Buz= 66° NE. Coordenadas: E= 697955; N=9201321; Cota = 402 m.s.n.m.....	53

	Pág.
Foto 3.10: Estratificación subhorizontal en calizas arenosas de la Formación Chúlec. Az =N 227°, Buz= 8° NW. Coordenadas: E 697324; N 9200179; Cota= 435 m.s.n.m.....	54
Foto 3.11: Anticlinal volcado, formado por el plegamiento de rocas areniscas, pertenecientes a la Formación Farrat. Coordenadas: E 697349; N 9200973; Cota= 654 m.s.n.m.....	55
Foto 3.12: Sinclinal, donde el flanco izquierdo está erosionado y en el flanco derecho se observan la deformación de calizas nodulares de la Formación Chúlec. El eje del Sinclinal, atraviesa longitudinalmente la vía. Datos del flanco derecho del sinclinal. Az= N 94°, Buz= 62° SW. Coordenadas: E 697858; N=9200970; Cota= 421 m.s.n.m.....	56
Foto 3.13: Núcleo de Sinclinal, en la Formación Chúlec. El eje del Sinclinal, corta transversalmente la Carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Presenta los siguientes datos estructurales, Flanco izquierdo: Az= N 256°, Buz= 62° NW; Flanco derecho: Az= N 84°, Buz= 60° SE. Coordenadas: E 697328; N=9200406; Cota= 421 m.s.n.m.....	56
Foto 3.14 Plegamiento de calizas y limolitas calcáreas de la Formación Chúlec. Coordenadas: E 697349; N 9200441; Cota= 402 m.s.n.m.....	57
Foto 3.15: Familias de diaclasas en limolitas calcáreas: D1: Az=N170°, Buz=89°NE; D2: Az=N 101°, Buz=90° NE; D3: Az=N 47°, Buz=90°SE; D4: Az=N226°, Buz= 3°NW. Coordenadas: E 697377; N 9200146; Cota = 424 m.s.n.m.....	58
Foto 3.16: Fallas conjugadas en macizo granodiorítico altamente fracturado. Aparente Falla Normal: Az=N 185°, Buz=39°NW. Coordenadas: E 696864; N 9199854; Cota = 386 m.s.n.m.....	59
Foto 3.17: Falla Normal Sinistral en la Formación Inca. Az=N 225°, Buz=58° NW Pitch=60°. Coordenadas: E 698043; N 9201264; Cota= 441 m.s.n.m.....	59
Foto 3.18: Planicie ubicada bajo la Presa Gallito Ciego, correspondiente al Valle Jequetepeque. Coordenadas: E 696973; N 9199419; Cota= 305 m.s.n.m.....	61
Foto 3.19: Lomada cubierta con escasa vegetación, en el margen izquierdo de la carretera Ciudad de Dios-Cajamarca. Coordenadas: E 698651; N 9201329; Cota= 425 m.s.n.m.....	61

	Pág.
Foto 3.20: Ladera en la Formación Chúlec, en el margen derecho de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 697292; N 9200296; Cota= 439 m.s.n.m.....	62
Foto 3.21: Escarpas en la Formación Farrat, en el margen izquierdo de la carretera Ciudad de Dios-Cajamarca. Coordenadas: E 697232; N 9200817; Cota= 560 m.s.n.m.....	63
Foto 3.22: Probable deslizamiento rotacional ocurrido sobre masa rocosa triturada y depósito coluvio-aluvial. Coordenadas: E 698044; N 9201257; Cota= 428 m.s.n.m.....	64
Foto 3.23: Deslizamiento de rocas tipo traslacional planar, cubriendo la vía antigua entre las progresivas km.37+224 al Km. 37+364 de la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios. Coordenadas: E 698195; N 9201139; Cota= 427 m.s.n.m.....	65
Foto 3.24: Deslizamiento de rocas calizas con rotura planar, entre el Km.41+142 y Km. 41+217 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 700418; N 9201390; Cota= 435 m.s.n.m.....	66
Foto 3.25: Afloramiento de roca granodiorita, entre el Km.34+700 y Km. 35+033 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 696796; N 919982; Cota= 377 m.s.n.m.....	75
Foto 3.26: Vista perfil del talud PC-01, entre el Km.34+700 y Km. 35+033 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.....	76
Foto 3.27: Afloramiento de roca cuarcita, entre el Km.35+033 y Km. 35+111 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 697034; N 9199798; Cota= 390 m.s.n.m.....	87
Foto 3.28: Vista perfil del talud PC-02, entre el Km.35+033 y Km. 35+111 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.....	88
Foto 3.29: Depósito coluvio-aluvial cubriendo afloramiento de areniscas calcáreas, entre el Km.36+270 y Km. 36+366 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 697415; N 9200707; Cota= 429 m.s.n.m.....	99
Foto 3.30: Vista perfil del talud PC-03, entre el Km.36+270 y Km. 36+366 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.....	100
Foto 3.31: Afloramiento de areniscas calcáreas, entre el Km.36+366 y Km. 36+658 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 697577; N 9200763; Cota= 429 m.s.n.m.....	111

	Pág.
Foto 3.32: Vista perfil del talud PC-04, entre el Km.36+366 y Km. 36+658 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.....	112
Foto 3.33: Afloramiento limolitas ferruginosas, entre el Km.38+383 y Km. 38+471 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 698988; N 9201298; Cota= 428 m.s.n.m.....	120
Foto 3.34: Vista perfil del talud PC-05, entre el Km.38+383 y Km. 38+471 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.....	121
Foto 3.35: Afloramiento de calizas, entre el Km.38+775 y Km. 38+887 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 699413; N 9201319; Cota= 425 m.s.n.m.....	129
Foto 3.36: Vista perfil del talud PC-06, entre el Km.38+775 y Km. 38+887 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.....	130
Foto 3.37: Afloramiento de areniscas, entre el Km.39+678 y Km. 39+801 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 699768; N 9202081; Cota= 433 m.s.n.m.....	141
Foto 3.38: Vista perfil del talud PC-07, entre el Km.39+678 y Km. 39+801 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.....	142
Foto 3.39: Afloramiento de areniscas, entre el Km.40+000 y Km. 40+094 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 699949; N 9202164; Cota= 434 m.s.n.m.....	153
Foto 3.40: Vista perfil del talud PC-08, entre el Km.40+000 y Km. 40+094 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.....	154
Foto 3.41: Afloramiento de areniscas, entre el Km.41+525 y Km. 41+708 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 700848; N 9201477; Cota= 434 m.s.n.m.....	165
Foto 3.42: Vista perfil del talud PC-09, entre el Km.41+525 y Km. 41+708 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.....	166

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfica 3.1: Tendencias lineales de precipitaciones mensuales, comparadas anualmente desde el año 1995 al 2010.....	44
Gráfica 3.2: Curva granulométrica en escala logarítmica de trinchera para el talud PC-03, material de depósito coluvio-aluvial.....	102
Gráfica 4.1: Barras comparativas de Factor de seguridad para cada talud en condiciones normales.....	187
Gráfica 4.2: Barras comparativas de Factor de seguridad para cada talud en condiciones de saturación parcial.....	187
Gráfica 4.3: Barras comparativas de Factor de seguridad para cada talud en condiciones de saturación total.....	188
Gráfica 4.4: Barras comparativas de Factor de seguridad para cada talud en condiciones de sismicidad máxima.....	188
Gráfica 4.5: Barras comparativas de Factor de seguridad para cada talud en condiciones de saturación parcial y sismicidad máxima.....	189
Gráfica 4.6: Barras comparativas de Factor de seguridad para cada talud en condiciones de saturación total y sismicidad máxima.....	189

LISTA DE ABREVIATURAS

CN	:	Condiciones Normales.
Fm.	:	Formaciones.
FS	:	Factor Seguridad.
GSI	:	Geological Strength Index (Índice de Resistencia Geológica).
INDECI	:	Instituto Nacional de Defensa Civil.
INGEMMET	:	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
Máx.	:	Máxima.
MDE	:	Modelo Digital de Elevaciones.
MM	:	Movimiento en masa.
ND	:	Número de discontinuidades.
PREVAED	:	Programa Presupuestal Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres.
Prob.	:	Probabilidad
RMR ₈₉	:	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.
SM	:	Sismicidad Máxima.
SP	:	Saturación Parcial.
SP-SM	:	Saturación Parcial y Sismicidad Máxima.
ST	:	Saturación Total.
ST-SM	:	Saturación Total y Sismicidad Máxima.
SUCS	:	Unified Soil Classification System (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).
UTM	:	Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator.
WGS 84	:	World Geographic System 1984 (Sistema Geodésico Mundial 1984).

RESUMEN

La investigación determinó la inestabilidad geotécnica de los taludes entre el Km. 34+700 y Km. 42+200, de la carretera Ciudad de Dios-Cajamarca; encontrándose en las Formaciones Carhuaz, Farrat, Inca y Chúlec del Cretácico inferior; además, encontramos depósitos cuaternarios tipo coluvial, coluvio-aluvial y aluvial. Los taludes están en macizos rocosos fracturados y meteorizados y suelos, los cuales presentan inestabilidad geotécnica debido a factores desencadenantes como la precipitación, infiltración y sismicidad, provocando movimientos en masas por deslizamientos. El objetivo de la investigación fue determinar la inestabilidad de los taludes. Se consideraron nueve puntos de control, utilizándose en suelos la clasificación SUCS y en roca las clasificaciones geomecánicas Índice de Calidad de la Roca (RQD), Índice de Resistencia Geológica (GSI) y la Valoración del Macizo Rocoso (RMR_{89}). La información geoestructural fue procesada en el Software Dips para el análisis estereográfico y cinemático de cada talud, concluyéndose que existe deslizamientos tipo cuña con probabilidad máx.=57.79% y deslizamientos planar con probabilidad máx.=25.71%. Así mismo, 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 de saturación total (PC-01, PC-02, PC-03, PC-04, PC-05, PC-07 y PC-08); sismicidad (PC-03 y PC-04); saturación parcial y sismicidad (PC-03, PC-04 y PC-05); saturación total y sismicidad (PC-01, PC-02, PC-03, PC-04, PC-05, PC-07, PC-08 y PC-09).

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

ABSTRACT

The investigation reduces the geotechnical instability of the slopes between km 34+700 and km 42+200, of the Ciudad de Dios-Cajamarca highway; found in the Carhuaz, Farrat, Inca and Chúlec Formations of the lower Cretaceous; In addition, we find Quaternary deposits of the colluvial, colluvial-alluvial and alluvial type. The slopes are in fractured and weathered rock masses and soils, which present geotechnical instability due to triggering factors such as precipitation, infiltration and seismicity, causing mass movements due to landslides. The objective of the investigation was to determine the instability of the slopes. Nine control points are considered, using the USCS classification for soils and the geomechanical classifications for rock, Rock Quality Designation (RQD), Geological Strength Index (GSI) and the Rock Mass Rating (RMR₈₉). The geostructural information was processed in the Dips Software for the stereographic and cinematographic analysis of each slope, concluding that there are wedge-type landslides with a max. probability=57.79% and planar landslides with a max. probability=25.71%. Likewise, using the geomechanical parameters of the RocData Software together with the phreatic level and seismicity, it is prolonged in the Slide Software slopes with FS<1.0 considered unstable, such cases occur in conditions of total saturation (PC-01, PC-02, PC-03, PC-04, PC-05, PC-07 and PC-08); seismicity (PC-03 and PC-04); partial saturation and seismicity (PC-03, PC-04 and PC-05); total saturation and seismicity (PC-01, PC-02, PC-03, PC-04, PC-05, PC-07, PC-08 and PC-09).

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

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En obras de infraestructura vial, durante la construcción y mantenimiento de carreteras, determinar la inestabilidad de taludes es relevante, el cuál es un problema principal relacionado con la seguridad y la economía. Para ello, se suele 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; permitiendo definir las zonas de deslizamientos y/o desprendimientos de masas tanto en suelo como en roca.

El área de investigación se localiza entre las progresivas Km. 34+700 y Km 42+200, de la Carretera Ciudad de Dios – Cajamarca, sector Gallito Ciego; donde los taludes, sectorialmente 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 tanto física como química; 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 ensanchamiento de las grietas de tracción ocasionando presencia de cuñas, volcamiento y deslizamientos planares en rocas y deslizamientos tipo rotacional en depósitos cuaternarios.

De esta forma, se genera la incógnita: ¿La inestabilidad geotécnica de taludes en el tramo Km. 34+700 - Km. 42+200, de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca, es el resultado de la presencia de la precipitación, infiltración y

sismicidad en la secuencia litológica de rocas sedimentarias e intrusivas granodioríticas y de los depósitos cuaternarios?; así mismo, el desarrollo y éxito de la investigación gira en entorno a comprobar una respuesta anticipada, estructurada de la siguiente manera: las litomorfoestructuras constituidas por la secuencia litológica de rocas sedimentarias e intrusivas graníticas, además de los depósitos cuaternarios; son afectados por los factores detonantes como la precipitación, infiltración y sismicidad produciendo inestabilidad geotécnica en el tramo Km. 34+700 – Km. 42+200, de la Carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

Los desprendimientos y deslizamientos de rocas y suelos en depósitos cuaternarios entre las progresivas 34+700 y Km. 42+200, de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca, cerca de la Presa Gallito Ciego; representan peligro constante para esta vía de alta transitabilidad. Es por ello que, se realizará una investigación geotécnica, analizando y relacionando variables litomorfoestructurales con factores detonantes como la precipitación, infiltración y sismicidad para determinar el comportamiento geotécnico de inestabilidad de los taludes a lo largo del tramo de carretera en mención, con ello lograr definir las zonas críticas. Además, la información obtenida servirá de fuente para nuevos estudios, los cuales apoyarán la toma de decisiones para mejorar la transitabilidad y conservar la infraestructura vial; evitando el peligro para los transeúntes y el impacto económico negativo hacia los sectores del comercio y turismo en la zona Norte de la Costa y la Sierra.

La presente investigación tiene como objetivo general determinar la inestabilidad geotécnica de los macizos rocosos y depósitos cuaternarios de taludes entre el Km. 34+700 y Km. 42+200, de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca; cuyo estudio es de tipo descriptivo, correlacional y explicativo. Además, se tienen por objetivos específicos: Realizar el cartografiado geológico de las unidades litomorfoestructurales; Determinar las propiedades geomecánicas de los macizos rocoso y depósitos cuaternarios; Calcular los factores de seguridad de los taludes para cada tipo de rotura; Definir el comportamiento geotécnico de los taludes; Realizar una zonificación de inestabilidad geotécnica de las zonas críticas. No obstante, cabe resaltar que, tras la elaboración del presente trabajo de investigación, existió cierta limitación, que de alguna u otra manera dificultaron el

desarrollo de la misma, como la falta de financiamiento para realizar ensayos de compresión triaxial.

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. A Nivel Internacional

Cuevas et al. 2019; en su estudio: “Análisis de la inestabilidad de ladera en la carretera NN-4 en el tramo San Lucas–Las Sabanas Km. 233-235, Departamento de Madriz”; realizado en NICARAGUA, considera como condición base las características geológicas y geotécnicas, mediante la recolección de datos y muestras de campo permitiendo determinar los parámetros físico-mecánicos los cuales son insertados a un software de análisis de inestabilidad de ladera denominado GEOSTUDIO con el cual se obtiene el factor seguridad.

Hurtado, M. 2009; en su investigación: “Modelo para estabilización de taludes en la carretera Selva Alegre – Saguangal que permita disminuir costos de mantenimiento”; realizado en ECUADOR, evalúa la inestabilidad de taludes teniendo en cuenta factores condicionantes y desencadenantes para el movimiento de masas, complementándola con la geometría de los taludes analizados, determinando su factor de seguridad. Además, propone sistemas de estabilización como medidas correctoras para taludes inestables.

2.1.2. A Nivel Nacional

Gonzáles, L. 1997, realizó el: “Estudio Geológico-Geotécnico para la estabilidad de taludes de la carretera Olmos-Corral Quemado del Km. 0+000 al Km. 196+300”; donde asocia los niveles de riesgos con los datos geológico-geotécnicos para determinar cuáles son los tramos susceptibles de fenómenos geodinámicos externos, lográndose zonificar los tramos analizados de acuerdo al grado de inestabilidad que presentan los taludes comprometidos con la carretera.

Cabana, O. 2016, en su estudio: “Evaluación Geotécnica para estabilidad de taludes desde la progresiva Km. 09+000 – 18+000 de la obra: Mejoramiento de la carretera Tramo I Dv. Cara Cara-Lampa”; evalúa las características geotécnicas para determinar la estabilidad de taludes en tramos críticos consiguiendo los parámetros geotécnicos como cohesión, ángulo de fricción interna y la resistencia del suelo (factor de seguridad). Además, plantea la corrección de taludes inestables mediante la construcción de banquetas, muros de gaviones y revegetación para mitigar el grado de erosión del suelo.

2.1.3. A Nivel Local

Zavala, B. et al. (2011), por intermedio de INGEMMET, en su investigación: “Riesgos geológicos en la región Cajamarca”; identifica, georeferencia y determina el grado de peligrosidad de las ocurrencias recientes y antiguas de procesos de movimientos de masas. Además, evalúa los centros poblados y obras de infraestructura vulnerables a los peligros geológicos, logrando de esta manera, la elaboración de mapas de susceptibilidad, peligrosidad de amenaza, y de zonificación de áreas críticas a nivel regional.

Fidel, L. y Olivares, P. 1994, por intermedio de INGEMMET, realizaron el: “Estudio Geodinámico de la Cuenca del Río Jequetepeque”; analizan factores como litología, morfometría de la cuenca, los eventos hidrometeorológicos y geodinámica en base a observaciones en campo y fotografías aéreas. Así mismo, hace hincapié en la interpretación geotécnica de los terrenos y en el análisis de la estabilidad de taludes en el corte de carretera cerca de la Represa Gallito Ciego, en relación a los niveles de riesgo geodinámico.

Montoya, F. 2014. en su Tesis: “Evaluación Geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca – El Gavilán”; analiza y determina que dicho tramo de carretera tiene un comportamiento litomorfoestructural complejo, debido a la presencia de estructuras fuertemente disturbadas, lo cual ocasiona los deslizamientos existentes tipo planar y cuña, asociados a factores detonantes como la infiltración y la sismicidad.

Novoa, E. 2019, en su tesis: “Evaluación geotécnica para determinar la inestabilidad de los taludes en roca en la carretera del tramo Chilete-Puente Muyuna”; analiza e interpreta el comportamiento del macizo rocoso, relacionadas a la precipitación, geoestructuras, infiltración y sismicidad, en 10 estaciones, determinando ocho estaciones con probabilidad de rotura de tipo planar y cuña.

Rojas, C. 2018, en su tesis: “Comportamiento geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas – El Tayal, Provincia de Chota”; analiza las propiedades geomecánicas en los taludes de dicho tramo, estableciendo relación entre las litomorfoestructuras, la infiltración y la sísmica. Concluye que, la inestabilidad es provocada por el fuerte fracturamiento, existiendo mayor probabilidad de deslizamiento en cuña que planar.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Geodinámica

De acuerdo con Dávila (2011), la geodinámica, hace referencia a los cambios que se registran en la corteza terrestre debido a los procesos geológicos, que a su vez son provocados por esfuerzos endógenos y exógenos. Además, nos permite comprender las causas, factores, condiciones de ocurrencia y sus efectos en el globo terrestre.

La teoría ligada a la presente investigación, toma relevancia en la geodinámica externa, la cual señala Gómez (2017), “se apoya en otras disciplinas como la geomorfología, meteorología, estratigrafía, etc., que permiten conocer todos los factores que participan en el desarrollo de los eventos geodinámicos”.

La ocurrencia de estos eventos geodinámicos, dependen del agente principal y los factores que participan directamente en su generación.

➤ **Agentes geodinámicos**

El agua. Considerado el agente más importante, por su gran acción modeladora de la superficie terrestre. Participa en la meteorización, erosión, remoción de materiales y su consecuente sedimentación que casi siempre se realiza en medios acuosos.

El sol. Participa en los procesos de la Tierra, mediante las variaciones de temperatura, propiciando cambios en el estado o resistencia de los materiales (dilatación, contracción y ruptura).

La gravedad. Está presente en todos los procesos que tienen lugar en superficie y su acción se evidencia en los fenómenos de movimientos de masa, cuando es capaz de vencer la resistencia interna del material.

El viento. Participa en la erosión, y tiene mayor acción en regiones de clima seco y donde existe muy poca vegetación.

Organismos vivos. No solo el hombre contribuye a cambiar el modelado de la superficie terrestre sino también los seres unicelulares.

➤ **Factores geodinámicos.**

Condicionantes. Condicionan la tipología del fenómeno geodinámico a ocurrir, teniendo en cuenta las propiedades del material (físicas y mecánicas), morfología y condiciones ambientales. Tenemos factores: geológicos (litología, discontinuidades estratigráficas, alteración del material), hidrológicos e hidrogeológicas (cambio de presión de poros), geomorfológicos y climáticos.

Desencadenantes. Son los que actúan directamente sobre los materiales, modificando las condiciones iniciales y generando desequilibrio. Estos factores son: naturales (precipitaciones pluviales, filtraciones de agua,

sismos) y antrópicos (deforestación, incendios forestales, actividad minera, obras de infraestructura en general).

En el territorio peruano, según PREVAED (2019) los fenómenos de geodinámica externa de mayor ocurrencia son los movimientos en masa (MM), teniendo como factor desencadenante y destacado a las precipitaciones.

2.2.2. Movimientos en Masa

Existen muchas definiciones planteadas por diversos investigadores, como Vargas (2000), quien define los Movimientos en Masa (MM) a todo desplazamiento de material litológico y/o de escombros hacia abajo (vertical o en dirección del pie de una ladera) condicionado por la gravedad; conociéndose, además, en términos sinónimos como deslizamientos, derrumbes y movimientos de terreno, entre otros.

Sin embargo, GEMMA (2007), indica que la definición más simple y ampliamente aceptada es la empleada por Cruden (1991), quien define el término como: “Movimiento de una masa de roca, escombros o tierra a lo largo de una ladera, por efecto de la gravedad”.

Considerando que existe una gran variedad de movimientos en masa, algunos son lentos, pequeños e imperceptibles; en tanto otros involucran grandes volúmenes de material y alcanzan altas velocidades con un gran poder destructivo. De esta manera, los MM representan un peligro por geodinámica externa, por lo cual INDECI (2011) en el Manual de estimación del Riesgo ante Movimientos en Masa en Laderas, sostiene que:

Los movimientos en masa son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra cuyo origen obedece a una gran diversidad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos, mecánicos y actividades humanas que tienden a desestabilizar las laderas y cambiar el relieve a una condición más plana.

Esto implica que la posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa comienza desde el mismo momento en que se forma una ladera natural o se construye un talud artificial.

➤ **Nomenclatura de una ladera o talud**

Considerando la literatura técnica de Suárez (1998), en su texto académico *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en zonas Tropicales* define que, la ladera tiene su origen en un proceso natural y el talud se conforma artificialmente. Visualmente los podemos distinguir, tal cual se muestra en la figura 2.1.

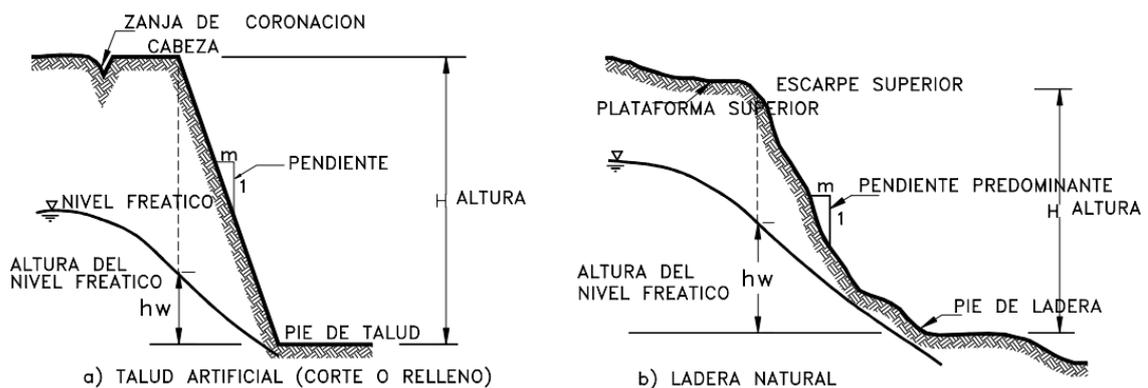


Figura 2.1: Nomenclatura de a) talud y b) ladera.
Fuente: Suarez (1998).

➤ **Clasificación de Movimientos en Masa**

El Manual de estimación del riesgo ante Movimientos en Masa en laderas, elaborado por INDECI (2011), considera la clasificación de MM en ladera desarrollada por el Proyecto Multinacional Andino, Geociencias para las Comunidades Andinas (2007), basada sustancialmente en la clasificación de Varnes (1978), modificada por Cruden y Varnes (1996). Varnes (1958 y 1978) emplea como criterio principal en la clasificación, el tipo de movimiento, y, en segundo lugar, el tipo de material. Así, divide los movimientos en masa en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos. Además, se divide los materiales en dos clases: rocas y suelos, estos últimos divididos en detritos y tierra.

Tabla 2.1. Clasificación de movimientos en masa.

TIPO DE MOVIMIENTO		ROCAS	SUELOS INGENIERILES	
			GRUESOS	FINOS
Caídas		Caídas de rocas	Caída de detritos	Caídas de tierra
Volcamientos		Volcamiento de rocas	Volcamiento de detritos	Volcamiento de tierra
Deslizamiento	Rotacional	Litología homogénea Hundimiento de rocas	Hundimiento de detritos	Hundimiento de tierra
	Traslacional	Litología heterogénea Deslizamiento de bloques de rocas	Deslizamiento de bloques. Deslizamiento de detritos.	Deslizamiento de bloques de tierra. Deslizamiento de tierra.
Propagación lateral		De rocas	De detritos	De tierras
Flujos		Flujo de rocas (Deep creep)	Flujo de detritos	De tierras
			Reptación	
Movimientos complejos		Combinación de dos o más tipos de movimientos.		

Fuente: Varnes (1978).

En el desarrollo del marco teórico de esta investigación, se hace hincapié a los deslizamientos; pues estos MM, son los de mayor ocurrencia y afectan la estabilidad de los taludes en el tramo de carretera donde se sitúa el área de investigación.

- **Deslizamientos**

González de Vallejo (2002), define a los deslizamientos como: “movimientos de masa de suelo, roca o combinación de ambos que se deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies”.

Así mismo, es importante tener en cuenta ciertos detalles para que ocurra un deslizamiento, tal y como explica Suárez (2009) en su libro Deslizamientos – Análisis Geotécnico, donde señala que:

Los taludes o laderas que han permanecido estables por muchos años, pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de agua subterránea, a los cambios en la

resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

La Figura 2.2, muestra la representación de un deslizamiento típico propuesto por Suárez (2009), donde encontramos la nomenclatura de sus diferentes partes.

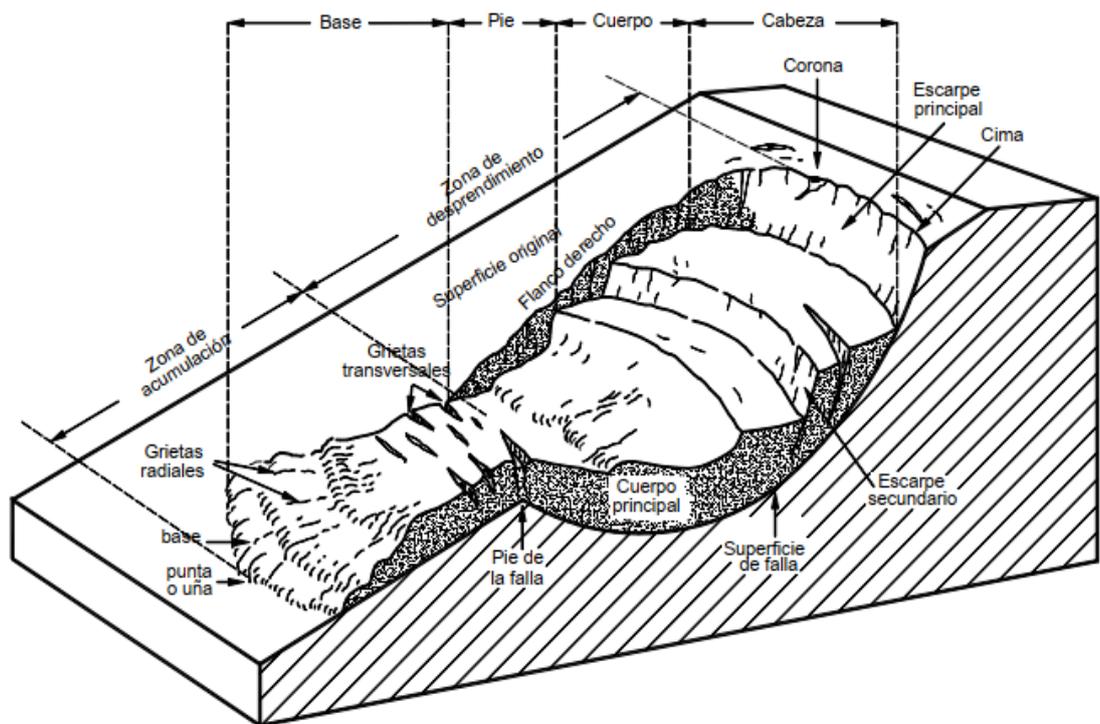


Figura 2.2: Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento.

Varnes (1978), clasifica los deslizamientos, según la forma de falla por la cual se desplaza el material, los cuales se indican a continuación:

Deslizamiento Rotacional

Es cuando el movimiento en masa de suelo, roca (altamente meteorizada) o ambas ocurre a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava en forma de cuchara, sobre la cual se desliza; teniendo su centro de giro por encima del centro de gravedad del cuerpo en movimiento.

González de Vallejo (2002), asegura que:

Este tipo de deslizamiento son más frecuentes en suelos cohesivos *homogéneos* donde la rotura puede ser superficial o profunda, y una vez iniciada la inestabilidad, la masa empieza a rotar, pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre sí y dan lugar a *escalones* con la superficie basculada hacia la ladera y a grietas de tracción estriadas.

Sin embargo, Corominas (2004), indica que este tipo de mecanismos también es característico en macizos rocosos intensamente fracturados.

Deslizamiento Traslacional

Suelen ser más superficiales que los rotacionales, y el desplazamiento de la masa ocurre con frecuencia a lo largo de las discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual o transportado que yace sobre ella.

En área de investigación no se han identificado deslizamientos traslacionales de suelos, pero sí deslizamientos de rocas.

En un macizo rocoso, el mecanismo de falla ocurre cuando una discontinuidad geológica tiene una dirección aproximadamente paralela a la de la cara del talud y buza hacia ésta con un ángulo mayor que el ángulo de fricción (Hoek y Bray, 1981).

GEMMA (2007), citando a Hoek y Bray (1981), indica que los casos más frecuentes de deslizamientos traslacionales son en roca, destacando dos tipos. *El deslizamiento planar*, cuyo desplazamiento de bloques se desliza sobre una superficie plana. Y el *deslizamiento en cuña*, donde el cuerpo a deslizar está delimitado por dos planos de discontinuidad que se intersectan entre sí e intersectan la cara de la ladera o talud, por lo que el

cuerpo se desplaza bien siguiendo la dirección de la línea de intersección de ambos planos, o el buzamiento de uno de ellos.

En la figura 2.3, se muestra la representación tanto del deslizamiento planar como en cuña en roca, tal y como señala GEMMA (2007).

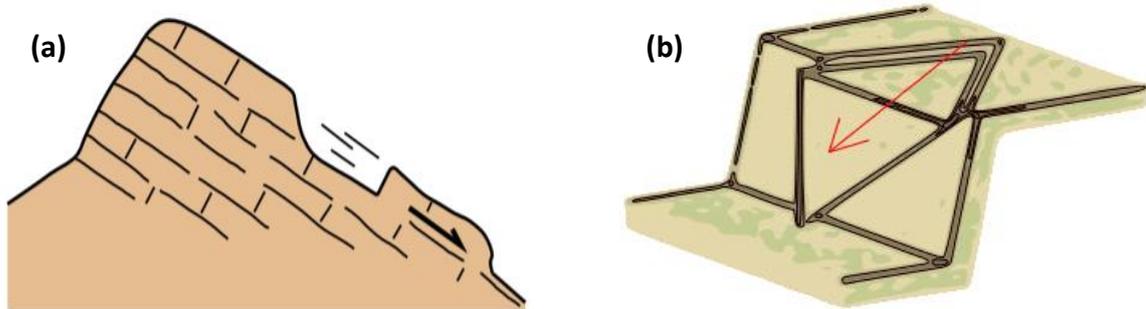


Figura 2.3: Deslizamientos traslacionales en roca: (a) Planar. (b) En cuña.
Fuente: GEMMA (2007).

2.2.3. Clasificación Geomecánica de la Roca

Se consideran 3 clasificaciones entre las más importantes aplicadas a taludes para el desarrollo de la presente tesis, así tenemos: RQD, GSI y RMR.

➤ Índice de Calidad de la Roca (RQD: Rock Quality Designation)

Desarrollada por Deere (1967), el cual propuso un índice cuantitativo porcentual de la calidad de la roca, basado en la recuperación de núcleos con perforación de diamante (Hoek y Brown, 1985). Sin embargo, cuando no se dispone de núcleos de perforación, el RDQ puede ser estimado a partir de una línea de muestreo, como se muestra en la figura 2.4; donde se puede obtener el promedio del espaciado de las discontinuidades o juntas (número de discontinuidades dividida para la longitud de la línea de muestreo), (Gavilanes y Andrade, 2004).

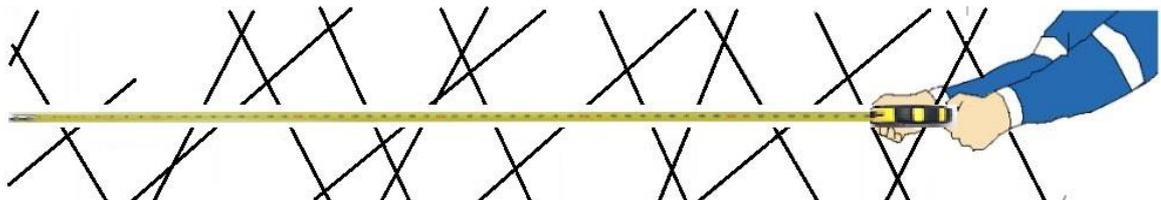


Figura 2.4: Representación esquemática para el conteo de discontinuidades en una línea de muestreo (cinta métrica).

Se calcula con la siguiente ecuación:

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

Donde: λ = N° de discontinuidades/ longitud (m.)

Tabla 2.2: Índice de calidad de la roca.

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

Fuente: Gavilanes y Andrade (2004).

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

Propuesto por Hoek (1994), y desarrollado por Hoek y Brown (1997). El GSI es un índice de calidad geomecánica para macizos rocosos y se basa en la identificación y clasificación en campo de dos características fundamentales: la macroestructura y la condición de las superficies de las discontinuidades.

Por tanto, la estimación del valor GSI, se realiza a partir de inspecciones visuales del macizo rocoso expuesto en superficies, como afloramientos, taludes y túneles, mediante el uso de la figura 2.5, basada en descripciones geológicas del macizo rocoso, propuesta por Hoek y Brown (1997).



Figura 2.5. Estimación del índice Geológico de resistencia, GSI, en base a una descripción geológica de macizo rocoso.

Fuente: Hoek y Brown (1997).

Por otro lado, el GSI puede ser estimado en relación al RMR_{89} , conforme al criterio de Hoek et al (1995), si $RMR_{89} \geq 23$, entonces:

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

Teniendo en cuenta las siguientes condiciones para el macizo rocoso:

- Agua subterránea (condición general: totalmente seco): 15
- Ajuste por orientación de las diaclasas (muy favorable): 0

Tabla 2.3: Índice de resistencia geológica (GSI).

Calidad del macizo	Tipo	GSI
Muy mala	V	0 - 20
Mala	IV	21 - 40
Regular	III	41 - 60
Buena	II	61 - 80
Muy buena	I	81 - 100

Fuente: Hoek (2002).

➤ **Valoración del Macizo Rocosó (RMR89: Rock Mass Rating, 1989)**

Postulado por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989. Clasifica a los macizos rocosos de 0 a 100 puntos, (González de Vallejo, 2002). Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos del RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.

Tabla 2.4: Parámetros de Clasificación geomecánica RMR₈₉.

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple	>250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Espaciamiento de discontinuidad		> 2m.	0,6m.-2m.	0,2m.- 0,6m.	0,06m.-0,2m.	< 0,06m.		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Persistencia de discontinuidad	< 1 m.	1-3 m.	3-10 m.	10-20 m.	> 20 m.		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0,1 mm.	0,1-1,0 mm.	1-5 mm.	> 5 mm.		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm.	Relleno duro > 5 mm.	Relleno blando < 5 mm.	Relleno 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 freática	Caudal por 10m. de túnel	Nulo	< 10 litros/min.	10-25 litros/min.	25-125 litros/min.	> 125 litros/min.		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación		15	10	7	4	0	

Fuente: Bieniawski (1989).

Tabla 2.5: Clasificación del macizo rocoso en relación al índice RMR₈₉.

Clase	Calidad	Valoración RMR ₈₉
I	Muy Buena	100 – 81
II	Buena	80 – 61
III	Media	60 – 41
IV	Mala	40 – 21
V	Muy Mala	<20

Fuente: González de Vallejo (2002).

2.2.4. Criterios de Rotura

➤ Criterio de Rotura Lineal de Mohr – Coulomb

Este criterio de rotura supone que la envolvente de los círculos de Mohr correspondientes a las combinaciones críticas de las tensiones principales, o sea, las que dan lugar a la rotura, es lineal (Ramírez, 2004).

Esta consideración nace con la Teoría de Ruptura de materiales de Mohr (1900), que sostiene que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante (Braja 2015).

Este criterio de rotura lineal, se aplica con mayor énfasis en mecánica de suelos y se expresa mediante la ecuación:

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

Donde:

$c = \text{cohesión}$

$\phi = \text{ángulo de fricción o rozamiento interna}$

En suelo saturado, el esfuerzo normal total en un punto es la suma del esfuerzo efectivo y la presión del agua intersticial:

$$\sigma = \sigma' + u$$

El esfuerzo efectivo, σ' , lo realizan los sólidos del suelo. Por lo tanto, para aplicar la ecuación a la mecánica de suelos, es necesario reescribirla como:

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

Donde:

c' = cohesión efectivo

ϕ' = ángulo de fricción o rozamiento interna efectivo

Braja (2015), considera que los valores de c' y ϕ' variarán dependiendo de la composición del suelo. Es así que, el valor de c' para arena y limo inorgánico es 0. Para arcillas normalmente consolidadas, c' se puede aproximar a 0. Las arcillas sobreconsolidadas tienen valores de c' mayores que 0. El ángulo de fricción, ϕ' , para arcillas normalmente consolidadas varía entre 20° y 30°. Para arcillas sobreconsolidadas, la magnitud de ϕ' , disminuye. Para suelos granulares, los valores típicos de ϕ' , se presentan en la siguiente tabla 2.6:

Tabla 2.6: Relación entre la densidad y el ángulo de fricción en suelos sin cohesión.

Estado del empaquetamiento	Densidad relativa (%)	Ángulo de fricción ϕ' (grados)
Muy suelto	< 20	< 30
Suelto	20 – 40	30 – 35
Compacto	40 – 60	35 – 40
Denso	60 – 80	40 – 45
Muy denso	> 80	> 45

Fuente: Braja (2015).

➤ **Criterio de Rotura No Lineal de Hoek y Brown**

El criterio de rotura de Hoek y Brown, es un criterio semi empírico que permite estimar la resistencia al corte de roca intacta y de los macizos rocosos, publicado en 1980 (Carranza y Torres, 2004).

Hoek et al (2002) señalan que, “en muchos problemas geotécnicos, en particular, estabilidad de taludes, es más conveniente tratar el criterio original de Hoek-Brown en términos de esfuerzos normales y al corte mas que en términos de esfuerzos principales”, según la ecuación original:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5}$$

Donde:

σ'_1 y σ'_3 , son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de rotura.

σ_{ci} , es la resistencia a compresión uniaxial del material intacto.

m y s , son las constantes del material, donde $s = 1$ para roca intacta.

De esta manera, Carranza y Torres (2004) representa esquemáticamente a partir de la ecuación de Hoek y Brown, la relación no lineal entre los esfuerzos principales, así como en términos de esfuerzos normales y de corte, mostradas en las figuras 2.6 y 2.7.

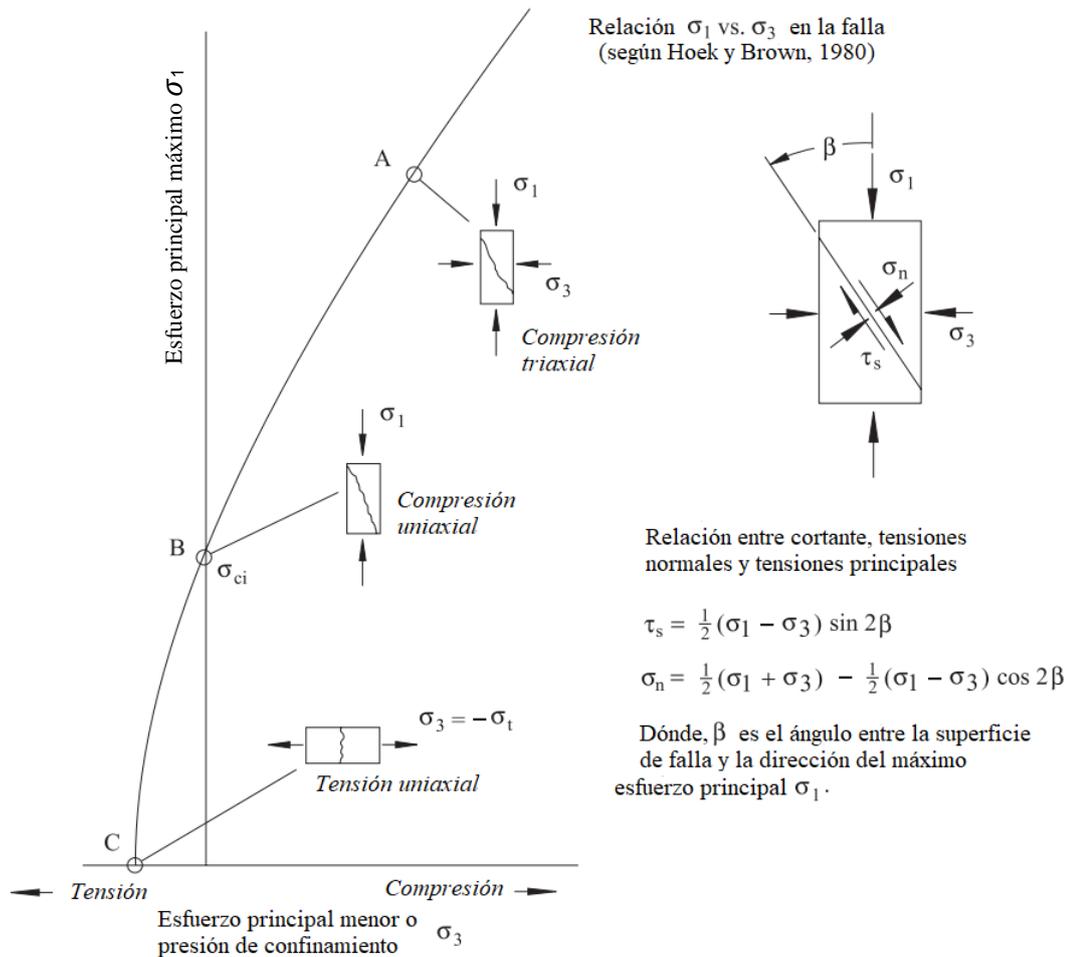


Figura 2.6. Representación esquemática del criterio de rotura no lineal de Hoek-Brown expresado en términos de esfuerzos principales.

Fuente: Carranza y Torres (2004).

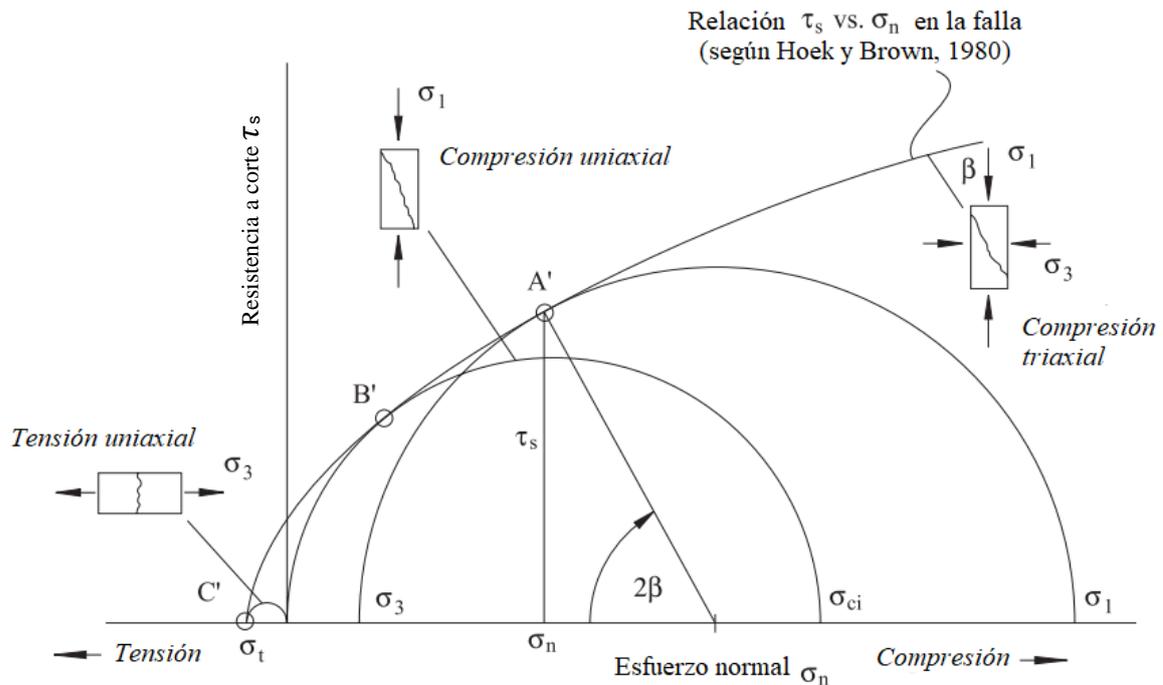


Figura 2.7: Representación esquemática del criterio de rotura no lineal de Hoek-Brown expresado en términos de esfuerzos normales y de corte en el plano de rotura a partir de Hoek y Brown, 1980.
Fuente: Carranza y Torres (2004)

Este criterio de rotura ha ido evolucionando a lo largo de los años, tal y como señala Puell et al (2004), indicando que la fórmula original ha sufrido ligeras modificaciones, dando lugar al denominado *Criterio de Hoek-Brown Generalizado*. Donde Hoek et al (2002), señala que la forma de la curva de la tensión principal o la envolvente de Mohr podría ajustarse por medio de un coeficiente variable, α , en lugar del término de la raíz cuadrada de la ecuación inicial de Hoek y Brown.

Es así que, la relación entre los esfuerzos principales en la rotura para el caso de macizos rocosos obedece la siguiente ecuación:

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

Donde m_b , s , y a son parámetros que dependen de la estructura de las discontinuidades en el macizo rocoso, además, estos parámetros se correlacionan con el GSI.

Matemáticamente se expresan de la siguiente manera:

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

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

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

Cabe señalar que:

- m_b es un valor reducido de la constante del material m_i .
- s y a son constantes del macizo rocoso.
- D es un factor que depende sobre todo del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos muy alterados.

La tabla 2.7, muestra la guía de estimación para el factor D , a partir de la experiencia y del análisis de varios estudios realizados en taludes, advirtiéndose que los valores aplicados deben ser tomados con cautela.

Tabla 2.7: Guías para estimar el factor de alteración “D”.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor <i>D</i> sugerido
	<p>Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.</p>	<p><i>D</i>=0</p>
	<p>Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante.</p> <p>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 figura.</p>	<p><i>D</i>=0</p> <p><i>D</i>=0.5</p> <p>No invertir</p>
	<p>Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m. en el macizo circundante.</p>	<p><i>D</i>=0.8</p>
	<p>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 tensiones resulta en alguna alteración.</p>	<p><i>D</i>=0.7 Buena voladura</p> <p><i>D</i>=1.0 Mala voladura</p>
	<p>Los taludes en grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento.</p> <p>En algunas rocas blancas 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.</p>	<p><i>D</i>=1.0 Voladura de producción</p> <p><i>D</i>=0.7 Excavación mecánica</p>

Fuente: Hoek et al (2002).

Por otro lado, Puell et al (2004), señala que:

Una de las dificultades en la aplicación práctica de este criterio radica en que la envolvente de rotura no es lineal, por lo que se genera una dificultad añadida en el cálculo del factor de seguridad tradicional, debiendo realizarse una linealización previa a la envolvente tipo Mohr-Coulomb, con las posibles incorrecciones que esto puede provocar.

Lo anterior, hace referencia a muchos softwares geotécnicos que están configurados en términos del criterio de rotura de Mohr-Coulomb; por tanto, es necesario, determinar los ángulos de fricción y las resistencias cohesivas para cada macizo rocoso e intervalo de esfuerzos. Por ello Hoek et al (2002) proponen un ajuste mediante el *método de área equivalentes*, que consiste en equilibrar las áreas por encima y por debajo de la curva de Mohr-Coulomb, dando lugar a las siguientes ecuaciones para el ángulo de fricción ϕ' y la resistencia cohesiva c' :

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

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

Hoek et al (2002), agrega que, la resistencia al corte para de Mohr-Coulomb τ , para un esfuerzo normal dado σ'_n , se encuentra sustituyendo estos valores de c' y ϕ' en la ecuación:

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

La gráfica equivalente, en términos de esfuerzos principales menor y mayor, como se muestra en la figura 2.8, está definida por:

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

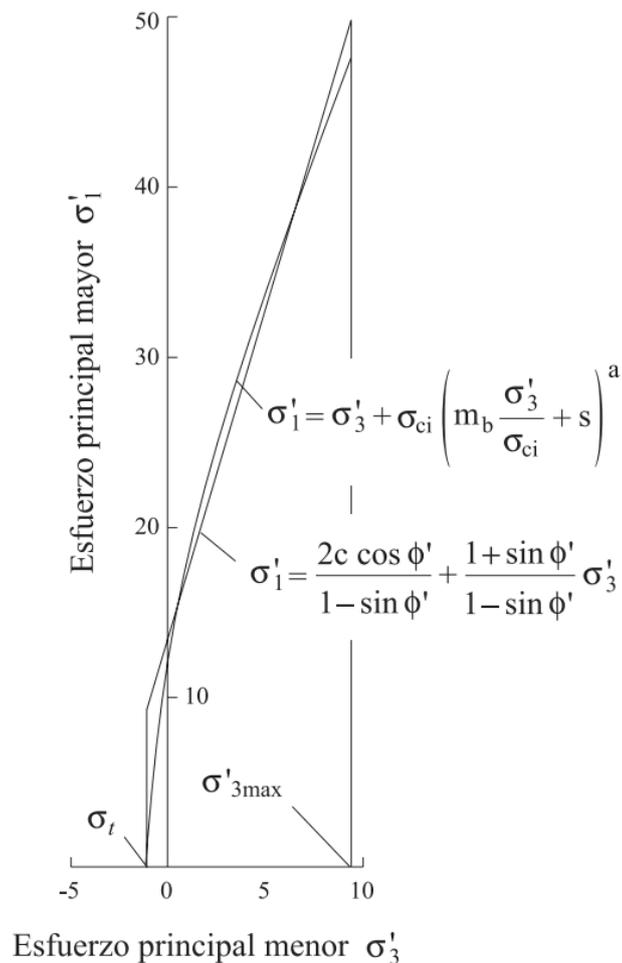


Figura 2.8: Relaciones entre esfuerzos principales mayores y menores para el criterio de Hoek-Brown y el equivalente de Mohr-Coulomb.

2.2.5. Metodología para el Análisis de Taludes

➤ Análisis estabilidad de taludes

La modelación matemática de los taludes es parte de la práctica de la ingeniería geotécnica, con el objetivo de analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales, la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales (Suarez, 2009).

Gonzales de Vallejo (2002) indica que: “se debe elegir un coeficiente o factor de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud”. Es así, como los análisis permiten definir la geometría de la excavación o las fuerzas externas que deben ser aplicadas para lograr el factor de seguridad requerido. En el caso de taludes inestables, los análisis permiten diseñar las medidas de corrección o estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos.

Factor seguridad (FS)

Empleado para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña (Suarez, 2009).

Braja (2015), señala que: “la tarea del ingeniero encargado de analizar la estabilidad de taludes es determinar el factor de seguridad”. En general, el factor de seguridad se define como:

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Donde:

FS_s = factor de seguridad con respecto a la resistencia.

τ_f = Resistencia cortante.

τ_d = Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie de falla.

➤ **Métodos de cálculo para la estabilidad de taludes.**

De las distintas metodologías disponibles para el análisis de la estabilidad, los métodos de equilibrio límite, son los más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional y de falla rotacional, así como las fallas de inclinación (“toppling”) y las fallas en cuña (Suarez, 2009).

Métodos de equilibrio límite.

Este sistema supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1,0 (Suarez, 2009).

González de Vallejo (2002), señala que se basan en:

- La selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
- El criterio de rotura de Mohr-Coulumb.
- La definición de coeficiente de seguridad.

- **Método de las dovelas o rebanadas**

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas.

Este método permite realizar cálculos de geometrías complejas, condiciones variables del terreno e incluir fuerzas externas de diverso origen (sobrecargas, anclajes), por lo que una vez implementado en un programa de ordenador, se convierte en una herramienta práctica y versátil, que se puede aplicar y de hecho se aplica para resolver la mayor parte de los problemas de rotura circular (Ramírez, 2004).

El factor se halla mediante la fórmula de Braja M. Das (1984), como se muestra en la ecuación:

$$FS_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \phi)}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}$$

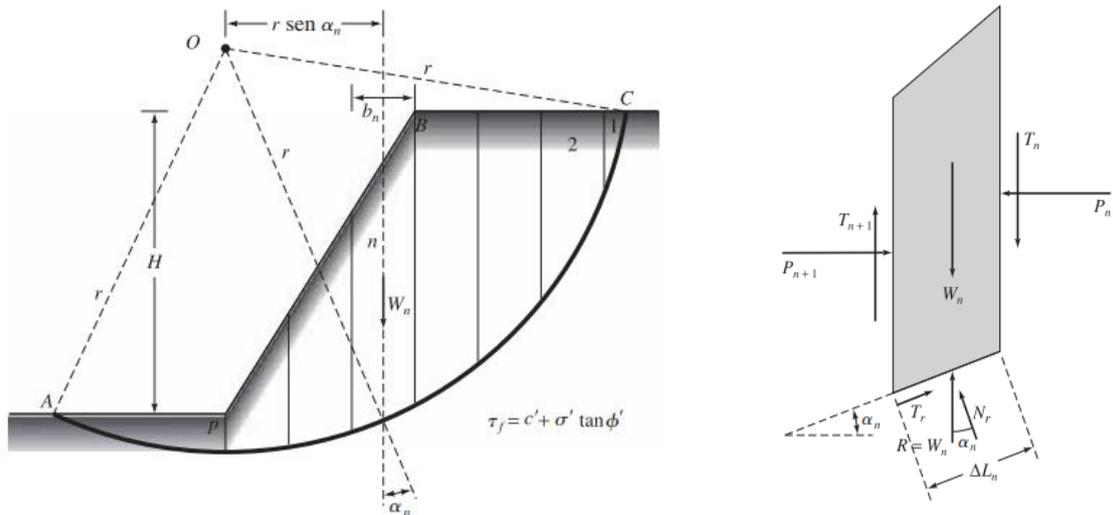


Figura 2.9: Análisis de estabilidad por el método ordinario de dovelas: (a) superficie de la prueba de falla; (b) fuerzas actuantes en la n-ésima dovela.
Fuente: Braja (2015)

En la presente investigación se consideran los siguientes métodos de cálculo para el análisis de estabilidad de taludes:

Método de Bishop Simplificado (1955)

Es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Y aunque existen métodos de mayor precisión que el método de Bishop, las diferencias de los factores de seguridad calculados, no son grandes. Bishop plantea las siguientes hipótesis:

- Se supone una superficie de rotura circular.
- La masa deslizante se divide en “n” rebanadas o fajas verticales.
- Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo.
- De la condición de equilibrio de fuerzas verticales en cada rebanada se obtienen las fuerzas N (normales a la superficie de rotura) y se sustituyen en la ecuación resultante de equilibrio de momentos.
- Asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales; es decir, que no tiene en cuenta las fuerzas de cortante.

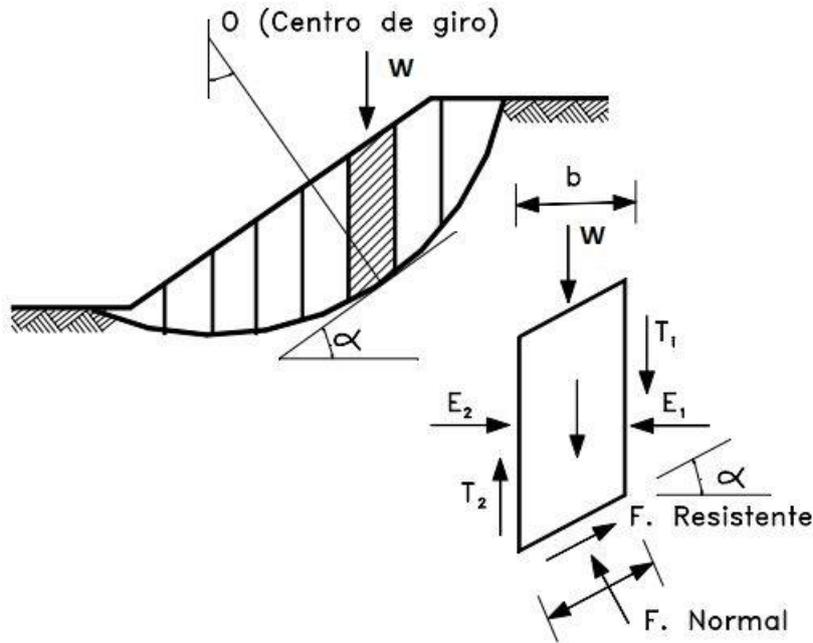


Figura 2.10: Método de las dovelas de Bishop simplificado.
Fuente: Suárez (1998)

Braja (2015), el factor seguridad se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$FS_S = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c' b_n + (W_n - u_n b_n) \tan \phi'] \frac{1}{m_{(a)n}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \text{sen} \alpha_n}$$

Donde:

$$m_{(a)n} = \cos \alpha_n + \left(\frac{\tan \phi' \text{sen} \alpha_n}{FS_S} \right)$$

b_n = ancho de la dovela

c', ϕ' = Parámetros de resistencia del suelo.

u_n = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w \times h_w$

α = Ángulo del radio y la vertical en cada dovela.

El término factor seguridad (FS), se encuentra tanto en la izquierda como en la derecha de la ecuación; se requiere un proceso de iteración para calcular el factor seguridad. Una vez que se obtiene el valor del factor de

seguridad de la superficie considerada, se supone una segunda superficie circular y se determina un nuevo valor de FS; y así sucesivamente hasta obtener un mínimo.

Método de Spencer (1967)

Spencer inicialmente propuso su método para superficies circulares pero este procedimiento se puede extender fácilmente a superficies no circulares.

En este método se suponen todas las fuerzas entre elementos; donde, W , son las cargas verticales externas, E_L y E_R , las fuerzas normales izquierda y derecha entre rebanadas; X_L y X_R , fuerzas verticales entre rebanadas a izquierda y derecha; P y S son la fuerza normal y tangencial a la base de la rebanada.

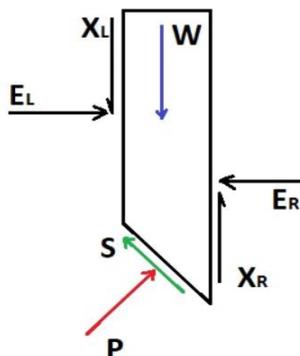


Figura 2.11: Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada consideradas en el método de Spencer y Morgenstern – Price.
Fuente: Ramírez (2004)

También se supone que las fuerzas entre rebanadas tienen una inclinación constante (θ) a lo largo de toda la recta, de forma que:

$$X / E = \tan \theta$$

Donde X son las fuerzas verticales y E las horizontales. La fuerza normal en la base del elemento será pues:

$$P = \left[W(E_R - E_L) \tan \theta - \frac{1}{FS} (c'l \sin i - u l \tan \phi \sin i) \right] / m_i$$

$$m_i = \cos i \cdot \left(1 + \tan i \cdot \frac{\tan \phi'}{FS} \right)$$

Dónde:

FS: factor de seguridad definido como la tensión de corte movilizada respecto la disponible.

E_R y E_L : son las fuerzas horizontales derecha e izquierda respectivamente, entre los elementos de rebanada.

u : es la presión de poro en la superficie de rotura.

l : es la longitud de la base de la rebanada.

i : la inclinación de la base del elemento.

c' y ϕ : cohesión y ángulo de fricción en la superficie de rotura.

Suponiendo que el ángulo θ es constante para todos los elementos de la vertiente, se pueden hacer ambos, el equilibrio global de momentos y el de fuerzas, de manera que se encuentran dos valores del Factor de seguridad, el equilibrio de fuerzas (F_f) y el de momentos (F_m). Se puede encontrar un valor de θ tal que ambos factores de seguridad coincidan, que será el factor de seguridad de la vertiente.

Método de Morgenstern – Price (1965)

Estos autores proponen un método similar al de Spencer, sólo que la inclinación de las fuerzas resultantes aplicadas en las caras de las dovelas se asume que varía de acuerdo con un tramo de una función arbitraria. Análogamente al método de Spencer, el de Morgenstern y Price es un método exacto, que introduce una incógnita, el parámetro λ , (Ramírez, 2004).

Se expresa en la siguiente ecuación:

$$\lambda f(x) = X/E$$

donde $f(x)$ es una función que se elige arbitrariamente (por ejemplo, la función seno o la función mitad del seno), siendo necesario un ordenador para realizar los tanteos precisos para que la función $f(x)$ sea la más idónea.

➤ **Análisis estereográfico - cinemático de taludes.**

Rotura planar

Las fallas planas ocurren a lo largo de una superficie aproximadamente plana. La condición básica es la presencia de discontinuidades buzando a favor del talud y con su misma dirección (Gonzales de Vallejo, 2002).

El análisis cinemático tiene en cuenta las siguientes condiciones estructurales (Suarez, 2005):

- La dirección de buzamiento (Dip Dir) de la discontinuidad planar (β) debe estar a $\pm 20^\circ$ del Dip Dir de la superficie del talud (α).
- El buzamiento de la discontinuidad (ψ_p) debe ser menor que el buzamiento de la superficie del talud (ψ_f). Es decir: $\psi_p < \psi_f$
- El buzamiento de la discontinuidad (ψ_p) debe ser mayor que su ángulo de fricción (ϕ_p). Es decir: $\psi_p > \phi_p$
- La extensión lateral de la masa potencial de falla debe ser definida por superficies laterales que no contribuyen a la estabilidad.

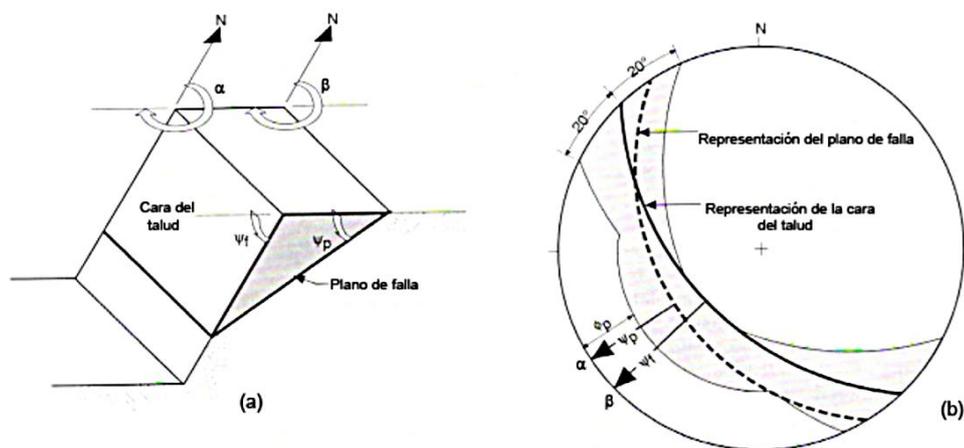


Figura 2.12: (a) Condición estructural de una rotura planar. (b) Representación estereográfica (los círculos máximos que se encuentren en el área sombreada son propensos a generar deslizamiento planar).

Fuente: Armas (2004).

Se debe tener en cuenta para la evaluación que, el deslizamiento plano puede verse afectado por la presencia de presión de agua (presión de poros) a lo largo de la superficie de falla, pudiendo causar deslizamiento incluso si el ángulo de fricción es más alto que el buzamiento de la estructura.

Rotura en cuña

La falla en cuña ocurre cuando la masa de roca se desliza a lo largo de dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud. La formación de una falla en cuña depende primordialmente, de la litología y de la masa de roca (Suarez, 2005).

El análisis cinemático de una falla en cuña es controlado por la orientación de la línea de intersección de los dos planos. Las condiciones estructurales que se deben cumplir son las siguientes:

- La dirección de la línea de intersección (χ) debe aproximarse a la dirección de buzamiento (dip dir) de la superficie del talud.
- La línea de intersección debe aflorar en el talud. Para esto el buzamiento de la línea de intersección (ψ_i) debe ser menor que el buzamiento de la superficie del talud (ψ_f). Es decir: $\psi_i < \psi_f$.
- El buzamiento de la línea de intersección (ψ_i) debe ser mayor que el ángulo de fricción de la superficie (ϕ). En caso de que el ángulo de fricción de ambas superficies que generan la cuña sea muy distinto, puede considerarse un ángulo de fricción promedio de ambas.
- Si los ángulos de buzamiento de los planos de las estructuras son menores a los ángulos de dirección de buzamiento (dip dir) del talud y de la dirección de la línea de intersección, entonces el deslizamiento ocurrirá en el plano de las estructuras de mayor buzamiento; en caso contrario, el deslizamiento ocurrirá a lo largo de la línea de intersección.

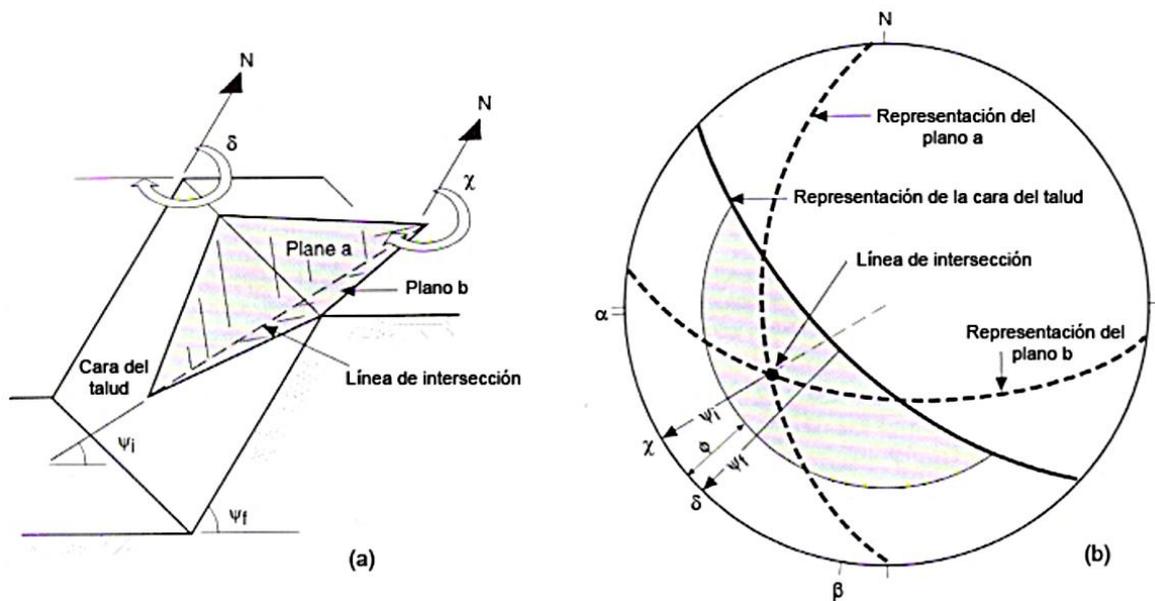


Figura 2.13: (a) condición estructural de un deslizamiento en cuña.
 (b) Representación estereográfica.

Fuente: Armas (2004).

2.2.6. Sismicidad.

Para definir las condiciones sísmicas se tomó como referencia la Modificación de la Norma Técnica E.30 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones (en su Capítulo II, Artículo 10: Zonificación), según Resolución Ministerial N°355-2018-Vivienda, publicada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018); donde señala que: “El territorio nacional se considera dividido en cuatro zonas sísmicas (ver Figura 2.14). La zonificación propuesta se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de éstos con la distancia epicentral, así como, en la información neotectónica”.

A cada zona se asigna un factor Z según se indica en la Tabla 2.8. Este factor se interpreta como la aceleración sísmica máxima del terreno con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años. El factor Z se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad.



Figura 2.14: Zonificación sísmica en el territorio peruano.
Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones (2018).

Tabla 2.8: Factores de zona “Z”.

ZONA	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones (2018).

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.

Macizo rocoso. Es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso. (González de Vallejo, 2002).

Deslizamiento. Consiste en movimientos de masas de roca, residuos o tierra hacia debajo de un talud (Cruden, 1991).

Desprendimiento. Masa generalmente de rocas que se desprenden de un talud abrupto, mediante una superficie de corte y descienden por caída libre. (Elorza, 2008).

Talud. Masa de tierra que no es plana, sino que posee pendientes o cambios bruscos de altura. Cuando este se desarrolla en forma natural sin intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera. (Suárez, 2005).

Factores condicionantes. Son intrínsecos a los materiales naturales e inciden en los procesos de inestabilidad de taludes y laderas. Estos factores pueden ser: geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, climáticos. (Watler, 2012).

Factores desencadenantes. Son externos, denominados también detonantes, puesto que, se les considera la causa que provoca la inestabilidad. Estos factores pueden ser naturales (precipitaciones pluviales, filtraciones de agua, temperatura, sismos, entre otros), o antrópicos (deforestación, incendios forestales, cortes de talud, uso indebido del suelo, otros). (Watler, 2012).

Factor de seguridad. Equilibrio entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes, entre las cuales es determinante la fuerza de gravedad. (Suarez, 2005).

Ángulo de fricción (ϕ). Representa matemáticamente, el coeficiente de rozamiento. El ángulo de fricción en suelos granulares secos coincide con el ángulo de reposo. Todos los suelos poseen fricción. Sin embargo, a los suelos arcillosos con fricción muy baja o despreciable, se les denomina suelos cohesivos, donde $\phi = 0$. (Suarez, 2005).

Zonas críticas. Delimitación espacial que hace referencia del estado actual respecto a variables físicas y temporales. (Dávila, 2011).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

El área de estudio, limitada por las progresivas Km. 34+700 y 42+200, pertenecientes a la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca, se ubica políticamente en el Distrito de Yonán, provincia de Contumazá y departamento de Cajamarca; tomando como referencia inicial y final, la Represa Gallito Ciego (lado Oeste) y la localidad de Tembladera (lado Este), respectivamente. Esta área, corresponde al cuadrángulo 15-e, zona 17S; conformando un tramo de 7 Km. + 500m. de longitud, con la siguiente georeferenciación:

Tabla 3.1: Georeferenciación del área de estudio en Sistema de coordenadas UTM, DATUM WGS-84 - Zona 17S.

Progresiva (Km.)	Coordenada		Cota (m.s.n.m.)
	Longitud	Latitud	
Inicio: 34 + 700	696734	9199949	378
Final: 42 + 200	701406	9201464	410

3.2. ACCESO

Para acceder al tramo de investigación, es por medio de la vía principal nacional, carretera Cajamarca – Ciudad de Dios, completamente asfaltada, atravesando varios centros poblados, entre los principales: San Juan, Choropampa, Magdalena, Chilete, Tembladera y Gallito Ciego, siendo este último el punto de referencia donde inicia el tramo de investigación.

Tabla 3.2: Acceso al área de investigación.

Ruta terrestre	Distancia	Estado	Tiempo
Cajamarca - Tembladera	127 Km.	Asfaltada	2h 49 min
Tembladera – Gallito Ciego (Km. 34+700)	14 Km.	Asfaltada	15 min

Fuente: Extraído de Google maps (2021).

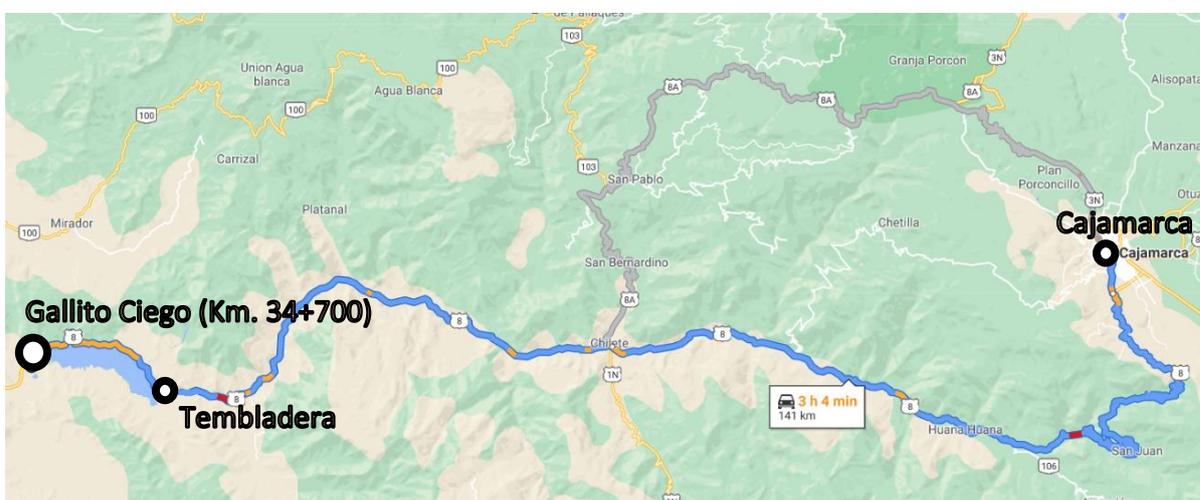


Figura 3.1. Accesibilidad al área de investigación.

3.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

3.3.1. Tipo de Investigación.

El proyecto de investigación se enfocó en describir, asociar y explicar los factores involucrados para causar la inestabilidad natural en los taludes, empleando métodos de valoración y evaluación para determinadas circunstancias; de manera que, la investigación es de tipo descriptivo, correlacional y explicativo; desarrollado en un diseño no experimental, debido a que no se manipulan las variables. Así mismo, es transversal ya que los datos se recogen en un solo punto del tiempo.

3.3.2. Población de estudio.

Los taludes comprendidos entre el Km. 34+700 y Km. 42+200, de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca, de una longitud total de 7.5 Km.

3.3.3. Muestra.

Puntos de control geotécnico, desde la progresiva Km. 34+700 al Km. 42+200, de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca.

3.3.4. Unidad de Análisis.

Están relacionadas con las variables: Macizo rocoso, geoestructuras, geoformas, precipitación, infiltración, sismicidad.

3.3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.

➤ Técnicas.

En el desarrollo del proyecto de investigación se aplicaron las siguientes técnicas:

- Búsqueda de información; relacionada con el problema de la investigación (informes anteriores, base teórica).
- Interpretación de imágenes satelitales; realizando la evaluación de estructuras geológicas, redes hídricas, topografía y contactos litológicos, corroborados en campo y su posteriormente cartografiado geológico a escala 1:15000.
- Recopilación de información específica de campo; mediante la observación y descripción In situ para la caracterización geomecánica usando las tablas 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y la figura 2.5.
- Ensayos geomecánicos In situ; utilizando la picota para golpear la superficie de roca intacta en los macizos rocosos y determinar la resistencia a la compresión uniaxial.
- Procesamiento de datos; utilizando los Softwares RocData v.4.0 (se hallaron los parámetros físico-mecánicos de las rocas analizadas), Dips v.7.0 (el análisis estereográfico-cinemático determinó el tipo de rotura planar y cuña y su probabilidad de ocurrencia), Slide v.6.0 (permitió calcular el factor de

seguridad considerando los métodos de equilibrio límite de bishop simplificado, LE/Morgenstern-Price y Spencer).

➤ **Instrumentos.**

- Registro geológico – geotécnico (formato de campo) y tablas geomecánicas, utilizado para recopilación de datos específicos en zonas de interés.
- Plano satelital 1/15000, Plano Modelo Digital de Elevaciones 1/20000 y geológico a escala 1/15000; planos base que sirvieron para contrastar la información panorámica, topográfica y geológica de la zona de investigación.
- Libreta de campo, utilizada para registro de datos.
- Lapiceros y lápices, utilizado como herramientas para escribir y dibujar datos durante el cartografiado geológico.
- Cámara fotográfica de 20MPX, utilizado para el registro topográfico.
- GPS Garmin 64S, sirvió para la ubicación en los planos base mediante la toma de coordenadas UTM (latitud y longitud) y cota, en campo.
- Picota de geólogo, utilizada para la extracción de muestras y ensayos In situ mediante golpeo sobre la superficie de la roca intacta a fin de determinar la resistencia de la compresión uniaxial.
- Brújula azimutal y/o geotécnica, usada para la medición de datos orientación e inclinación (buzamiento).
- Lupas 20x, utilizado para el reconocimiento de minerales y rocas.
- Protactor de escalas 1/1500 y 1/2000, sirvió para el cartografiado geológico.
- Flexómetro de 5m., usado para la medición geométrica del talud, así como, para medición de algunos datos geomecánicos (espaciado y persistencia de las discontinuidades).
- Lápiz rayador, utilizado para el reconocimiento de minerales mediante la determinación su dureza relativa.
- Ácido clorhídrico al 15% de concentración, utilizado para el reconocimiento de rocas calcáreas mediante reacción química.
- Laptop, sirvió para el procesamiento de datos, redacción de informe de tesis y elaboración de planos.

3.3.6. Procedimiento.

➤ Etapa de gabinete (Pre campo).

Conformada por dos fases: la primera, que consiste en la planificación de actividades, elaborándose un cronograma de las mismas, a fin de que el proyecto investigativo tenga un proceso ordenado. Se comienza por la recopilación de información bibliográfica enfocada a la problemática de la investigación (mediante libros, informes, artículos científicos, y otros); análisis e interpretación de imágenes satelitales; información geológica publicada con anterioridad por el INGEMMET, teniendo como referencia el Mapa del Cuadrángulo de Chepén (hoja 15-e) y su base geológica integrada más reciente (2017), a escala 1: 50000, de la Carta geológica del Perú; elaboración de planos básicos a partir de la información geológica antes mencionada; y a adquisición de los instrumentos para la recolección de datos.

➤ Etapa de campo.

Consistió en actividades netamente de campo, donde se realizó el cartografiado geológico a escala 1:15000, observación y descripción de las condiciones geológicas, identificación y medición de geoestructuras, y la caracterización geomecánica y geotécnica en el registro geológico-geotécnico de los taludes, de acuerdo a los puntos de control considerados en el tramo Km. 34+700 al Km. 42+200, de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca. Todo ello, trabajando en un sistema de georreferenciación UTM, Datum WGS - 84, en la zona 17 S.

➤ Etapa final (Post campo).

La información de campo recolectada pasó a procesarse en varios Softwares como: SAS Planet, Global Mapper, ArcGIS 10.8, Dips, Rock Data, Slide. De ellos se obtuvieron figuras, planos y resultados que fueron objeto de análisis para su posterior interpretación.

3.4. CLIMA.

De acuerdo a SENAMHI, el área de investigación se ubica dentro de un clima “Desértico semicálido” [E(d) B1´H3], caracterizado por la deficiencia de lluvias en todas las estaciones del año, y humedad relativa calificada como húmeda.

De acuerdo a los datos históricos meteorológicos (1995 – 2010), la precipitación promedio anual es de 124,1 mm. Hay escasa precipitación entre los meses de Junio y Agosto, con un promedio de 0 mm. La mayor cantidad de precipitación ocurre en el mes de Marzo, con un promedio de 50,0 mm. Enero es el mes más caluroso del año con una temperatura media de 11,3 °C. Las temperaturas medias más bajas del año se producen en Junio, cuando está alrededor de 10,2 °C.

La variación de temperaturas durante todo el año es de 0,5 °C. El mes que presenta mayor humedad es Marzo, con 85%.

Tabla 3.3: Datos históricos meteorológicos, comprendidos entre 1995 y 2010.

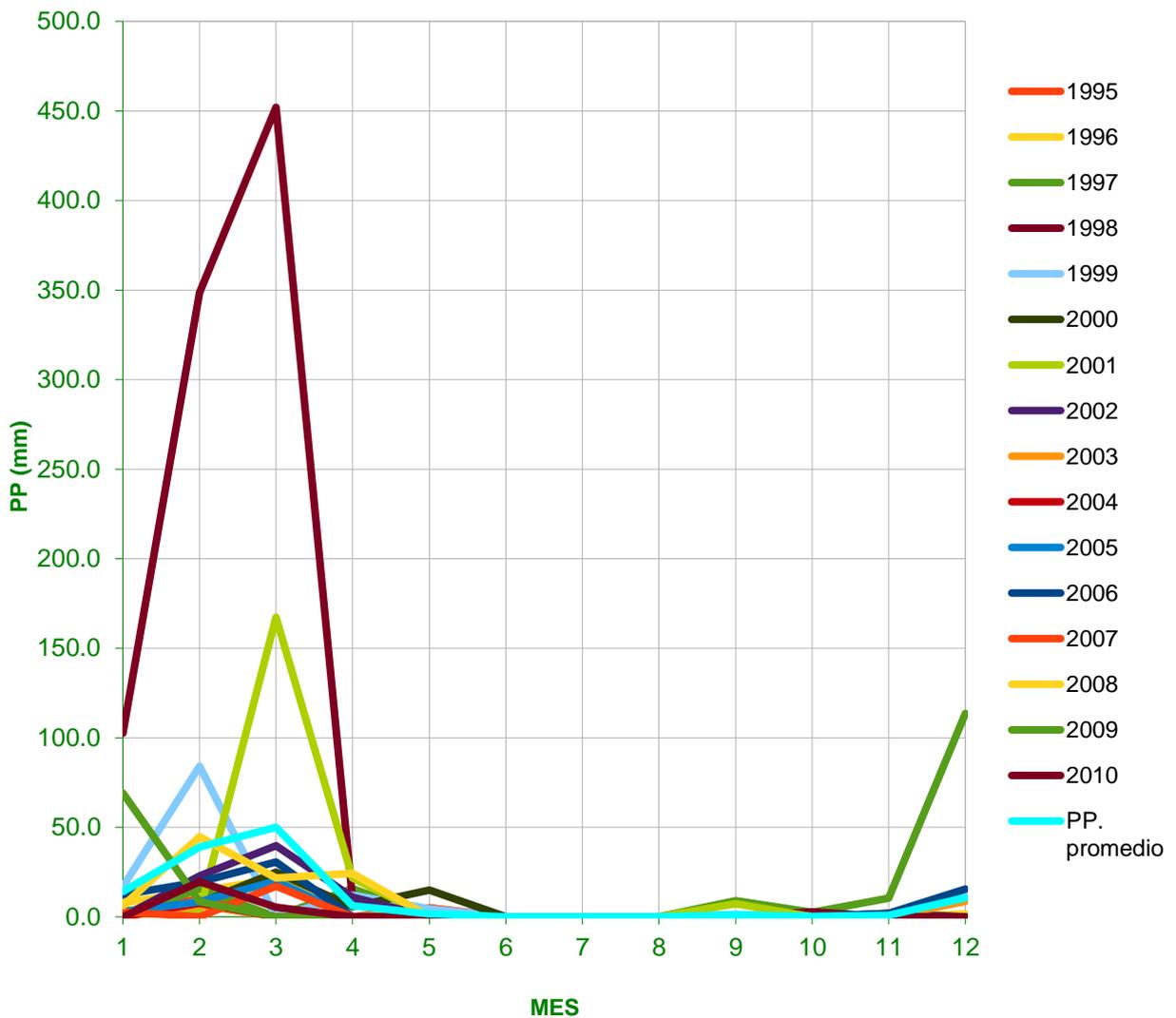
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura Media (°C)	11,3	11,0	11,1	11,2	11,0	10,2	10,3	10,7	10,9	11,0	10,9	10,9
Temperatura Mín (°C)	18,4	19,3	19,3	18,7	17,3	16,2	15,4	15,3	15,9	16,2	16,9	17,9
Temperatura Máx (°C)	29,7	30,3	30,4	29,8	28,3	26,5	25,7	26,0	26,7	27,1	27,7	28,7
Precipitación (mm.)	14,2	39,0	50,0	6,3	1,7	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,9	10,8
Humedad (%)	75,0	84,0	85,0	80,0	71,0	67,0	60,0	55,0	60,0	61,0	59,0	66,0

Fuente: SEMANHI, 2017

Además, es necesario mencionar que, en el lapso de 1995 al 2010, SENAMHI, registra una anomalía en cuanto a las precipitaciones, al realizar una comparación anual; dicha anomalía es asociada a precipitaciones extremas ocurridas en toda la Costa Norte del Perú, durante el fenómeno de “El Niño”, a fines del año 1997 y comienzos de 1998, tal y como muestra la Gráfica 3.1.

Por tanto, para la presente investigación es importante considerar en el análisis de taludes las condiciones saturadas en los materiales que lo conforman, a fin de determinar factor de seguridad real.

ESTACIÓN MONTE GRANDE PRECIPITACIÓN MENSUAL (COMPARACIÓN ANUAL)



Gráfica 3.1: Tendencias lineales de precipitaciones mensuales, comparadas anualmente desde el año 1995 al 2010.

Fuente: SEMANHI (2017).

3.5. GEOLOGÍA LOCAL.

3.5.1. Estratigrafía.

La geología local que engloba el área de investigación para consideración del tramo Km. 34+700 al Km. 42+200 de la carretera Ciudad de Dios Cajamarca, sector Gallito Ciego; está conformada por formaciones estratigráficas pertenecientes al Cretácico Inferior. Lográndose identificar por sus constituyentes litológicos característicos, a las Formaciones Carhuaz y Farrat, como parte del Grupo Goyllarisquizga; subyaciendo concordantemente a las Formaciones Inca, y Chúlec. Así mismo, se identifican rocas ígneas intrusivas como granodioritas y monzogranitos; la primera, presentando gran afloramiento; y la segunda, encontrándose emplazada y algo visible en el corte de carretera, formando un pequeño halo de alteración e inconformidad con las rocas constituyentes de la Formación Chúlec, ambas se localizan hacia el lado Sur-Oeste.

Las Formaciones estratigráficas mencionadas se encuentran cubiertas parcialmente por depósitos cuaternarios de tipo coluvial, coluvio-aluvial y aluvial, en pendientes de inclinación moderada a leve; y en las zonas más bajas de la Cuenca del Río Jequetepeque, se encuentran depósitos de tipo fluvial.

➤ Depósitos Cuaternarios.

Depósitos antrópogénicos (Qh-an)

Los depósitos generados por la actividad humana en el área de investigación, se distinguen, especialmente, cerca del vertedero de la presa Gallito Ciego; donde se observa, además, muros de contención y bancos en el talud para soportar y estabilizar dicho material.

Depósitos fluviales (Qh-fl)

Identificados bajo la Presa Gallito Ciego, en el Valle del Jequetepeque, donde se asienta parte de la población. Estos depósitos extensionalmente se encuentran formando algunas terrazas; y se componen de material polimíctico, entre bloques, cantos y gravas, de forma esférica redondeada a muy redondeada, con matriz arenosa, y limo arenosa.



Foto 3.1. Depósitos cuaternarios de tipo antrópico y fluvial. Parte baja del Valle Jequetepeque. Coordenadas: E 697282; N 9199954; Cota 418 m.s.n.m.

Depósitos aluviales (Qh-al)

La presencia de este tipo de depósitos en el área de investigación, destaca en las quebradas que intersecan la carretera en todo el tramo de interés, formando pequeños abanicos en la base del depósito colindante con el agua del Reservorio Gallito Ciego. Se compone de bloques, cantos, gravas, cuyos clastos son de forma esférica subredondeada a redondeada; además de arenas, limos y arcilla. El material parental predominante, son areniscas y cuarcitas, litología que conforma a las Formaciones Farrat y Carhuaz.



Foto 3.2: Depósito cuaternario aluvial localizado en quebrada.
Coordenadas: E 697299; N 9200613; Cota 426 m.s.n.m.

Depósitos coluviales (Qh-co)

Estos depósitos se pueden observar en el pie de sectores elevados, los cuales colindan con el tramo de carretera en estudio. Se encuentran formando algunos derrubios en ladera a consecuencia de los desprendimientos de rocas de zonas escarpadas, entre clastos de granodiorita y areniscas cuarcíticas, distribuidas de forma caótica.

De esta manera, los depósitos coluviales identificados, se componen de bloques, cantos y gravas, cuyos clastos presentan una forma subprismáticas de contornos angulosos; en mayores volúmenes se presentan no consolidados (suelos) y en otros con algo de matriz, pudiendo ser limo arenosas o limo arcillosas.

Sus componentes líticos provienen de rocas areniscas, calizas y granodiorita (en menor proporción).

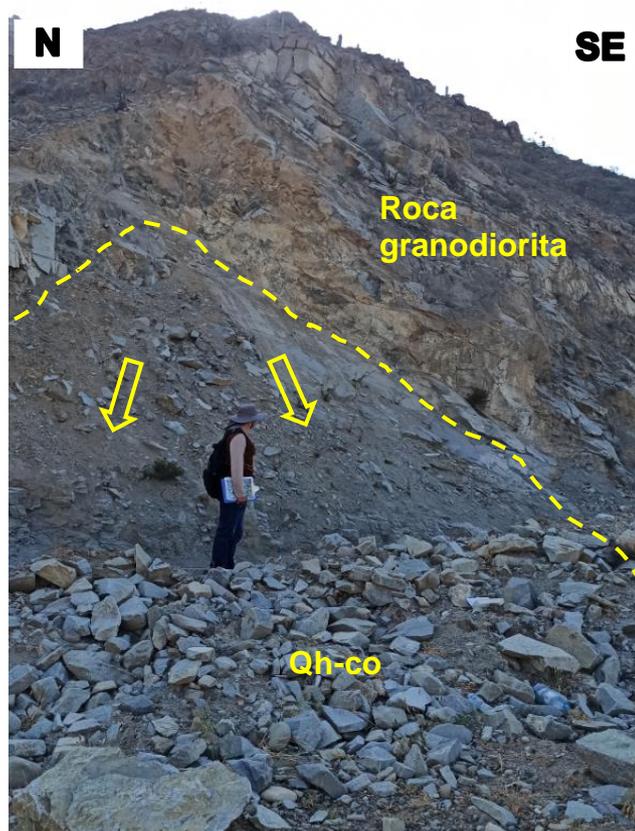


Foto 3.3: Depósito coluvial, compuesto por clastos de roca granodiorita sueltos meteorizados, formando cono de derrubio.
Coordenadas: E 696972; N 9199843; Cota: 401 m.s.n.m.

Depósitos coluvio aluviales (Qh-coal)

Ubicados en la parte inferior de los depósitos coluviales y de poca cobertura. Son visibles en el corte de carretera y se componen de gravas, cantos y algunos bloques, cuyos clastos son de forma subprismática subangulosas, en matriz limo arenosa. Los clastos heterométricos se distribuyen caóticamente, y se encuentran semiconsolidados. Su génesis debe al material coluvial transportado paulatinamente, debido al escurrimiento de aguas de lluvias, el cual hace que las rocas pierdan cierto grado de angulosidad. El material parental proviene de las areniscas y cuarcitas de la Formación Farrat.

El depósito coluvio aluvial se encuentra intersecando la carretera, y formando en ciertas áreas, terrazas ligeramente inclinadas.



Foto 3.4: Depósito coluvio aluvial con erosión columnar en el corte de carretera, hacia el margen derecho de la Carretera Cajamarca – Ciudad de Dios.
 Coordenadas: E 697659; N 9200802; Cota 433 m.s.n.m.

➤ **Rocas intrusivas.**

Hacia el lado Sur Oeste del área de investigación, se observan rocas plutónicas como granodioritas y monzogranitos pertenecientes al Batolito de la Costa.

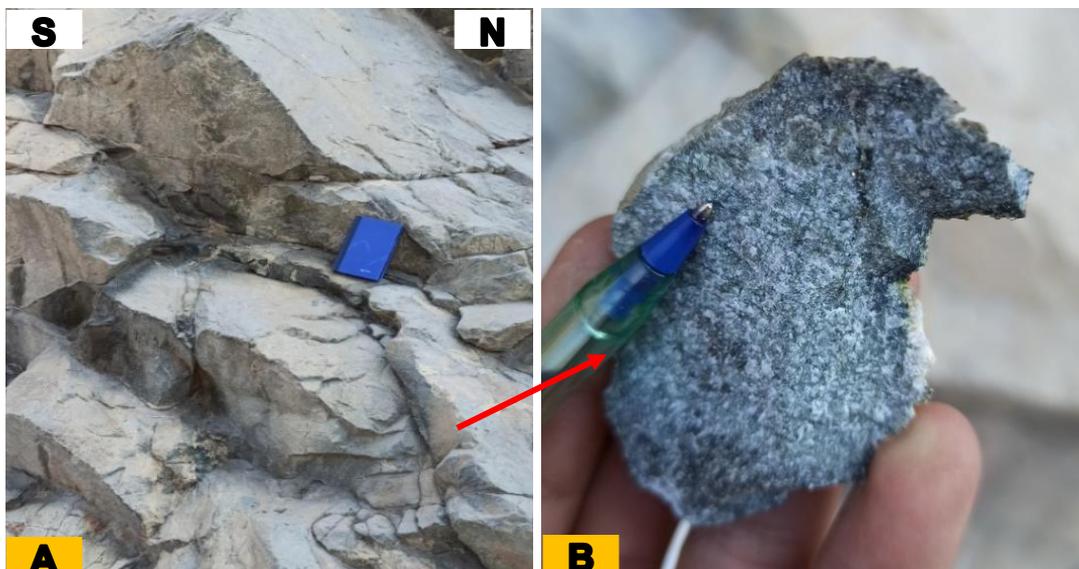


Foto 3.5: (A y B) Roca intrusiva, granodiorita, que forma parte de las intrusiones granitoides del Batolito.
 Coordenadas: E 697302; N 9199985; Cota 428 m.s.n.m.

➤ **Formación Chúlec (Ki-chu)**

Se presenta de manera discontinua a lo largo del tramo de carretera, y cuyos estratos están orientados de Sur-Oeste a Nor-Este. En lado Sur-Oeste del área de investigación, la Formación Chúlec está en contacto con roca intrusiva perteneciente al batolito de la costa, formando un halo de moderada alteración permitiendo reconocer las rocas sedimentarias que la conforman. Litológicamente, se constituye de una secuencia fosilífera de calizas arenosas de coloración pardo amarillenta, limolitas calcáreas y margas de coloración amarillenta; siendo apreciadas notoriamente en el corte de carretera, localizadas hacia el lado Nor-Este de la zona de estudio.



Foto 3.6: (a) Secuencia litológica de calizas arenosas fosilífera (parte superior), con limolitas calcáreas y margas (parte inferior) Az= N 75°, Buz= 20°S. (b) y (c) Caliza arenosa de textura bioesparítica.

Coordenadas: E 699317; N 9201309; Cota= 410 m.s.n.m.

➤ **Formación Inca (Ki-in)**

Se puede apreciar en los cortes de carretera, específicamente en la zona central del área de investigación, el afloramiento que constituye la Fm. Inca; cuya conformidad litológica se encuentra orientada de Sur-Oeste a Nor-Este. Se identifican, areniscas calcáreas intercaladas con limolitas ferruginosas.



Foto 3.7: Intercalación de areniscas calcáreas con limolitas ferruginosas, pertenecientes a la Formación Inca. Az= N 86°, Buz= 70°S. Coordenadas: E 698117; N 9201220; Cota = 410 m.s.n.m.

➤ **Grupo Goyllarisquizga (Ki-g)**

• **Formación Farrat (Ki-f)**

Se puede observar al Nor-Este del área de investigación, en el corte de carretera, donde se logra identificar areniscas blancas. Debido a la meteorización química sus caras se muestran de color rojizo. Se estima un afloramiento máximo de 25m. y desde una vista panorámica, hacia la parte superior de la vía, la Formación Farrat resalta su litología competente, resistente a la erosión.

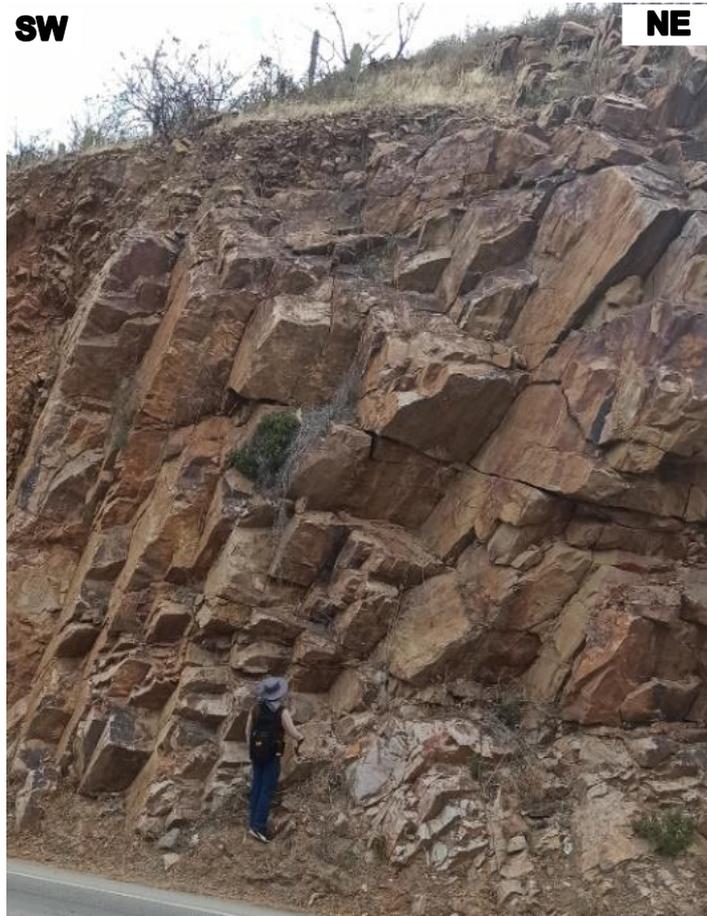


Foto 3.8: Estratos de areniscas con espesor promedio de 1.5m, ligera a moderadamente meteorizada, perteneciente a la Formación Farrat.
Az= N 98°, Buz= 68° SW. Coordenadas: E 699708, N 9201788, Cota = 430 m.s.n.m.

- **Formación Carhuaz (Ki-ca)**

Visible en corte de carretera, al Nor-Este de la zona de estudio entre los tramos Km 39+500 y Km. 40+200, aproximadamente. Su litología está afectada predominantemente por meteorización física y química (decoloración en las caras de la roca). Se reconocen In situ, areniscas, areniscas cuarzosas, ligeramente meteorizada de color amarillento en la parte superficial y cuyo espesores oscilan entre 0.25m. a 1.20m.; intercaladas con limolitas grises de textura laminar (fisil), de un espesor menor a 0.2m.

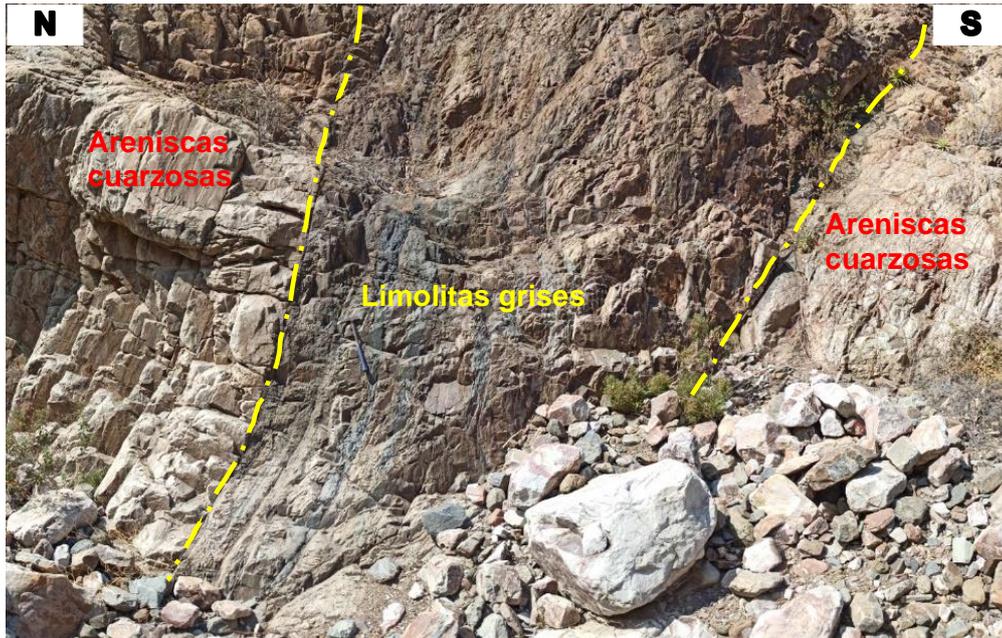


Foto 3.9: Areniscas cuarzosas intercaladas con limolitas grises de textura laminar, pertenecientes a la Formación Carhuaz, identificables en corte de quebrada cerca de la Carretera. Los estratos de roca presentan un $Az = N 277^\circ$, $Buz = 66^\circ NE$.
 Coordenadas: E= 697955; N=9201321; Cota = 402 m.s.n.m.

3.5.2. Geología Estructural.

Se han identificado diversas geoestructuras en el tramo de carretera, Km. 34+700 al Km. 42+200, y alrededores que engloba el área de investigación; generadas por las fuerzas tectónicas predominantemente compresivas y de regular intensidad, formando deformaciones dúctiles (anticlinal, sinclinal y plegamientos locales) y deformaciones frágiles (diaclasas y fallas), como parte del proceso de la orogénesis. La ocurrencia de estas geoestructuras, se estima durante finales del cretácico y continuadas durante el Cenozoico.

➤ Estructuras primarias.

Son aquellas que tienen su origen durante la deposición del sedimento, determinando el ambiente en que se depositó.

- **Estratos**

En los cortes de la carretera del tramo en estudio, se pueden visualizar estratos litológicos de rocas calizas arenosas, limolitas, areniscas y areniscas calcáreas, cada una de ellas presentan diferente espesor (entre 0.20 m a 1.2m.), con determinada orientación e inclinación. El tipo de litología permite determinar su ambiente de formación, y globalmente comparten el grado de fracturamiento (de alto a moderado).



Foto 3.10: Estratificación subhorizontal en calizas arenosas de la Formación Chúlec. Az =N 227°, Buz= 8° NW. Coordenadas: E 697324; N 9200179; Cota= 435 m.s.n.m.

➤ **Estructuras secundarias**

Ocurridas después de la litificación, y relacionados con los agentes geológicos internos (fuerzas de compresión y tensión) que generan deformación y desplazamiento de grandes masas rocosas.

- **Deformación dúctil.**

Cuando las rocas tienden a deformarse formando pliegues, al ser sometidos a determinado esfuerzos.

Anticlinal Volcado.

En la parte superior de la carretera (del tramo en estudio), desde una vista panorámica, se puede observar la cresta del anticlinal parcialmente erosionada, presente en las areniscas pertenecientes a la Formación Farrat, donde su plano axial se encuentra inclinado formando un plegamiento asimétrico, cuyo eje se encuentra orientado de Sur-Oeste a Nor-Este.

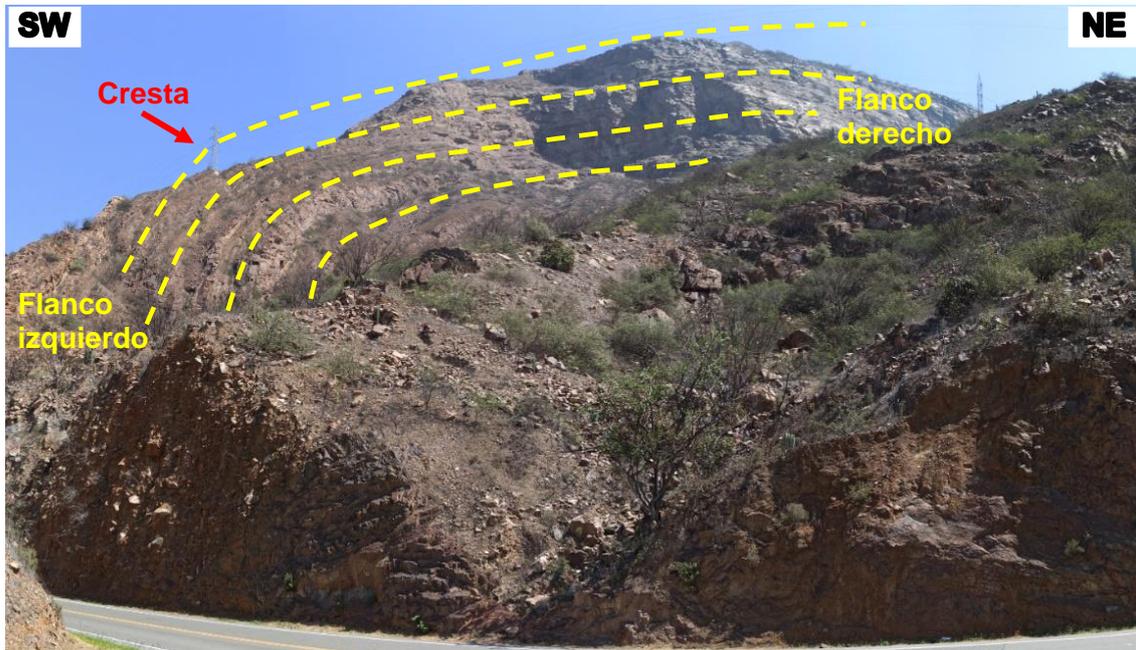


Foto 3.11: Anticlinal volcado, formado por el plegamiento de rocas areniscas, pertenecientes a la Formación Farrat.
Coordenadas: E 697349; N 9200973; Cota= 654 m.s.n.m.

Sinclinal

Se han identificado dos núcleos de sinclinales. El primero, hacia el lado Nor-Este del área de investigación, donde dicha estructura se encuentra deformando los delgados bancos de calizas nodulares, perteneciente a la Formación Chúlec. Uno de sus flancos se encuentra erosionado, pero se puede estimar la proyección del eje del sinclinal, teniendo una orientación Sur-Oeste a Nor-Este o viceversa; además, su proyección es cuasiparalelo a la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca, entre el tramo Km. 38+ 600 y Km. 38+900.

El segundo sinclinal, se localiza al lado Oeste del área de investigación, donde el núcleo se puede observar claramente en el corte de carretera. Esta estructura encuentra deformando las calizas arenosas fosilíferas, pertenecientes también a la Formación Chúlec, cuyo eje está orientado de Sur-Oeste a Nor-Este o viceversa, cortando transversalmente la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

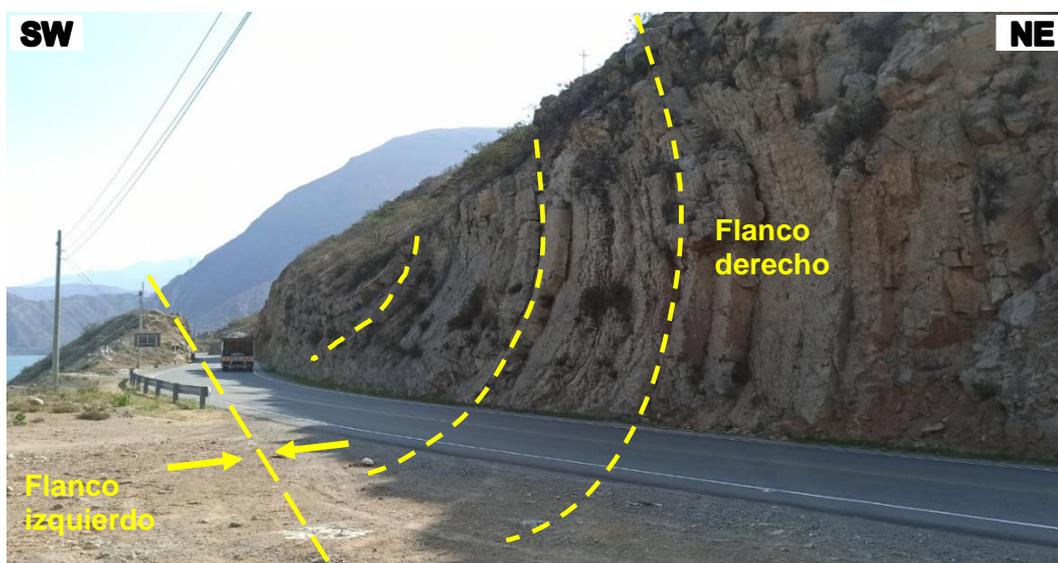


Foto 3.12: Sinclinal, donde el flanco izquierdo está erosionado y en el flanco derecho se observan la deformación de calizas nodulares de la Formación Chúlec. El eje del Sinclinal, atraviesa longitudinalmente la vía. Datos del flanco derecho del sinclinal: Az= N 94°, Buz= 62° SW. Coordenadas: E 697858; N=9200970; Cota= 421 m.s.n.m.



Foto 3.13: Núcleo de Sinclinal, en la Formación Chúlec. El eje del Sinclinal, corta transversalmente la Carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Presenta los siguientes datos estructurales, Flanco izquierdo: Az= N 256°, Buz= 62° NW; Flanco derecho: Az= N 84°, Buz= 60° SE Coordenadas: E 697328; N=9200406; Cota= 421 m.s.n.m.

Pliegues

Localmente, se observan en las limolitas calcáreas y calizas de la Formación Chúlec, y las limolitas ferruginosas de la Formación Inca. Estos estratos son de poco espesor, y, en los cortes de carretera, se encuentran formando plegamientos sinuosos, encajados entre otras rocas de mayor resistencia.

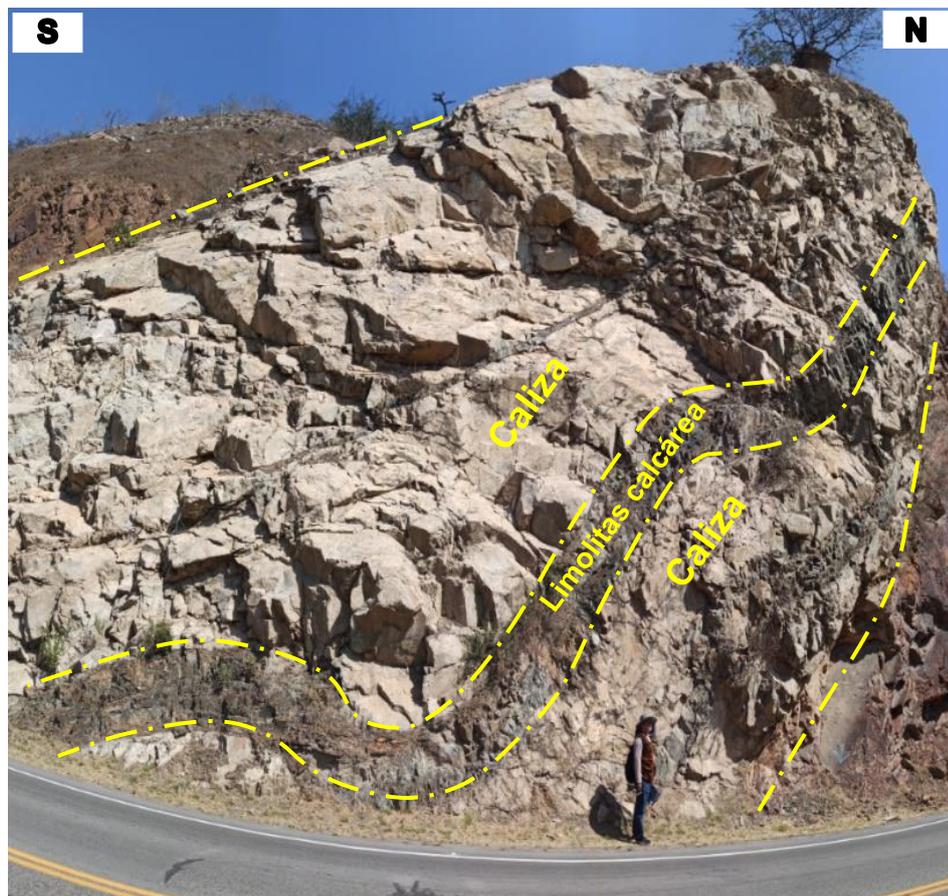


Foto 3.14: Plegamiento en calizas y limolitas calcáreas de la Formación Chúlec.
Coordenadas: E 697349; N 9200441; Cota= 402 m.s.n.m.

- **Deformación frágil**

Cuando las rocas superan el límite de deformación plástica, estas tienden a fracturarse al ser sometidos a determinados esfuerzos.

Diaclasas

Estos planos de fractura sin desplazamiento de bloques, se pueden percibir en toda el área de estudio, siendo más evidente en los taludes de la carretera, definiendo el grado de fracturamiento de los macizos rocosos.

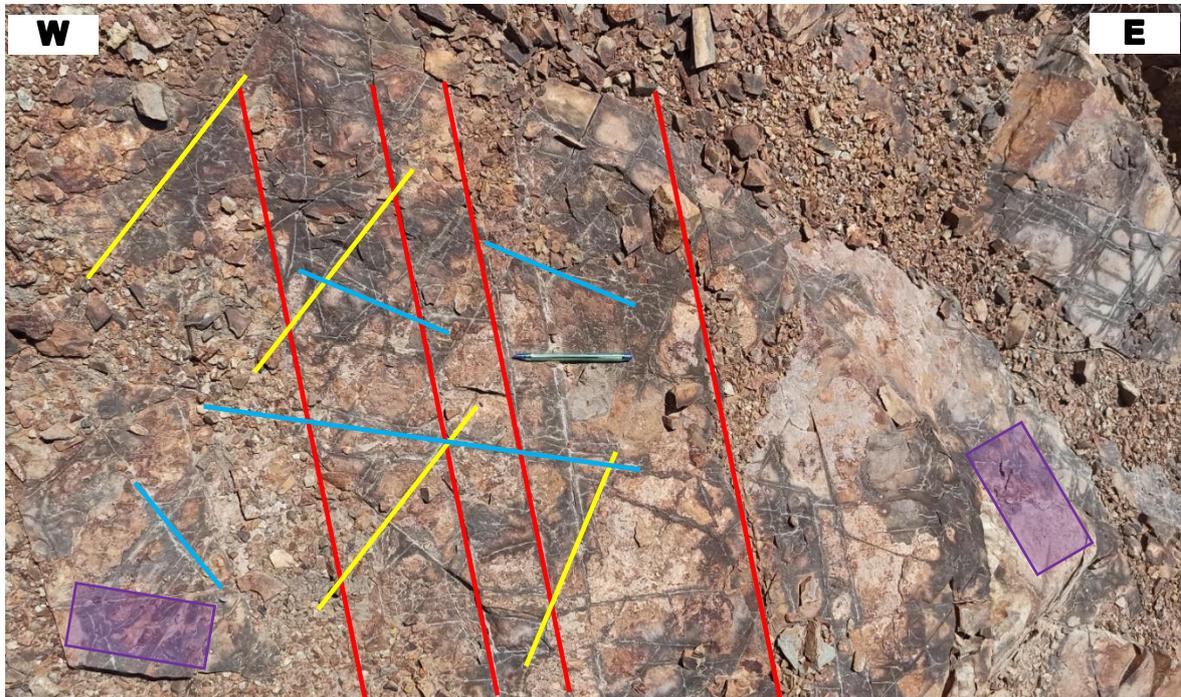


Foto 3.15: Familias de diaclasas en limolitas calcáreas: D1 (—): Az=N170°, Buz=89°NE; D2 (—): Az=N 101°, Buz=90° NE; D3 (—): Az=N 47°, Buz=90°SE; D4 (□): Az=N226°, Buz= 3°NW.
Coordenadas: E 697377; N 9200146; Cota = 424 m.s.n.m.

Fallas

Este tipo de planos de fractura tienen un desplazamiento apreciable. En el lugar de la investigación se han identificado fallas normales, localizadas tanto en rocas granodioritas (falla normal aparente) como en el paquete litológico de la Formación Inca (falla normal sinistral). Dichas fallas, se encuentran cortando transversalmente la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca en las progresivas, Km. 37+300 y Km. 34+800; respectivamente.



Foto 3.16: Fallas conjugadas en macizo granodiorítico altamente fracturado
 Aparente Falla Normal: Az=N 185°, Buz=39°NW.
 Coordenadas: E 696864; N 9199854; Cota = 386 m.s.n.m.

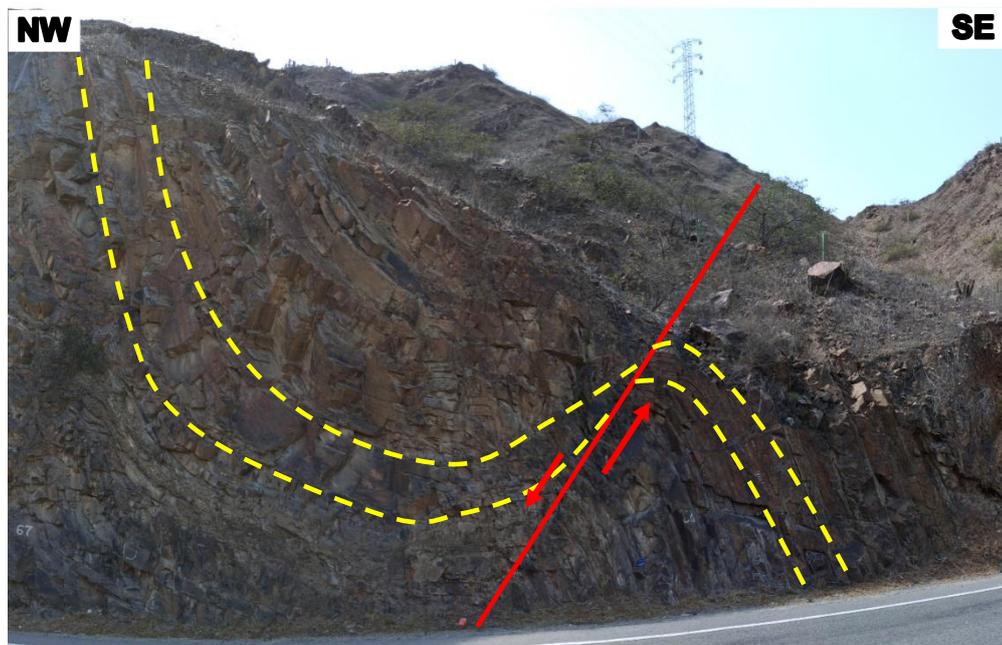


Foto 3.17: Falla Normal Sinistral en la Formación Inca. Az=N 225°, Buz=58° NW
 Pitch=60°. Coordenadas: E 698043; N 9201264; Cota= 441 m.s.n.m.

3.5.3. Unidades Morfogenéticas.

Las geoformas están directamente relacionadas con los procesos de erosión, y para definir las, se considera utilizar la Clasificación modificada de Rodríguez (2016), que denomina al relieve como Unidades Morfogenéticas, y cuantifica la geometría del relieve (inclinación de la pendiente), de acuerdo a la tabla 3.4; a partir de una propuesta inicial planteada por Tapia-Varela, G. y López-Blanco, J. (2001), los cuales consideran variables base como génesis, edad de las rocas, geometría y tipo del relieve; considerando aplicar esta clasificación para áreas pequeñas, como es el caso de la presente investigación.

Tabla 3.4: Clasificación de Unidades Morfogenéticas.

Tipo de relieve	Geometría	Litología	Origen	Edad de la litología		
				Período	Época	Edad
Unidad Morfogenética	Pendiente	Asociada a su composición	Asociado al evento o proceso geológico			
Planicies	0° - 8°					
Lomadas	8° - 20°					
Laderas	20° - 50°					
Escarpas	>50°					

Fuente: Rodríguez (2016)

3.5.3.1. Planicies

Son superficies cuya morfología es bastante homogénea, ligeramente ondulada, donde los procesos de agradación superan a los de degradación. Ésta comprende áreas correspondientes al Valle del Jequetepeque (ver foto 3.19), afectadas por los procesos de erosión pluvial. Su rango de pendiente está entre 0° y 8°. Están relacionados con los depósitos aluviales y fluviales, producto de la erosión de las rocas del Cretácico inferior hasta el Neógeno y depositadas en el Cuaternario entre el Pleistoceno y Holoceno.

3.5.3.2. Lomadas

Son superficies de terreno con pequeñas elevaciones, homogéneas y pendientes suaves. El rango de pendiente para esta Unidad Morfogenética oscila de 8° a 20°. Corresponde a gran parte del área donde se encuentra trazada la

carretera, ubicada en el lateral izquierdo (orientado de NO-NE) del Reservorio Gallito Ciego.

Parcialmente este terreno es utilizado para actividades de pastoreo. Y en campo se observa que, litológicamente, está asociado a areniscas calcáreas, limolitas ferruginosas, calizas arenosas, margas y calizas nodulares, pertenecientes a las Formaciones, Inca y Chúlec, pertenecientes al Cretácico Inferior y algunos depósitos coluviales, pertenecientes al Cuaternario; distribuyéndose de forma paralela y hacia el margen izquierdo del Reservorio Gallito Ciego, siguiendo la orientación de la carretera.



Foto 3.18: Planicie ubicada bajo la Presa Gallito Ciego, correspondiente al Valle Jequetepeque. Coordenadas: E 696973; N 9199419; Cota= 305 m.s.n.m.



Foto 3.19: Lomada cubierta con escasa vegetación, en el margen izquierdo de la carretera Ciudad de Dios-Cajamarca. Coordenadas: E 698651; N 9201329; Cota= 425 m.s.n.m.

3.5.3.3. Laderas

De acuerdo a clasificación, para la investigación, se considera un rango de pendiente entre 20° y 50°, lo cual indica que la superficie del terreno cada vez se encuentra más empinada.

De acuerdo al área de investigación, esta geoforma está determinada por la Formación Farrat, conformada por areniscas y cuarcitas muy competentes, moderadamente fracturadas y plegadas; y por la Formación Chúlec, compuesta de calizas arenosas, limolitas calcáreas y margas; estimándose la formación de geoestructuras a fines del Mesozoico e inicios del Cenozoico.

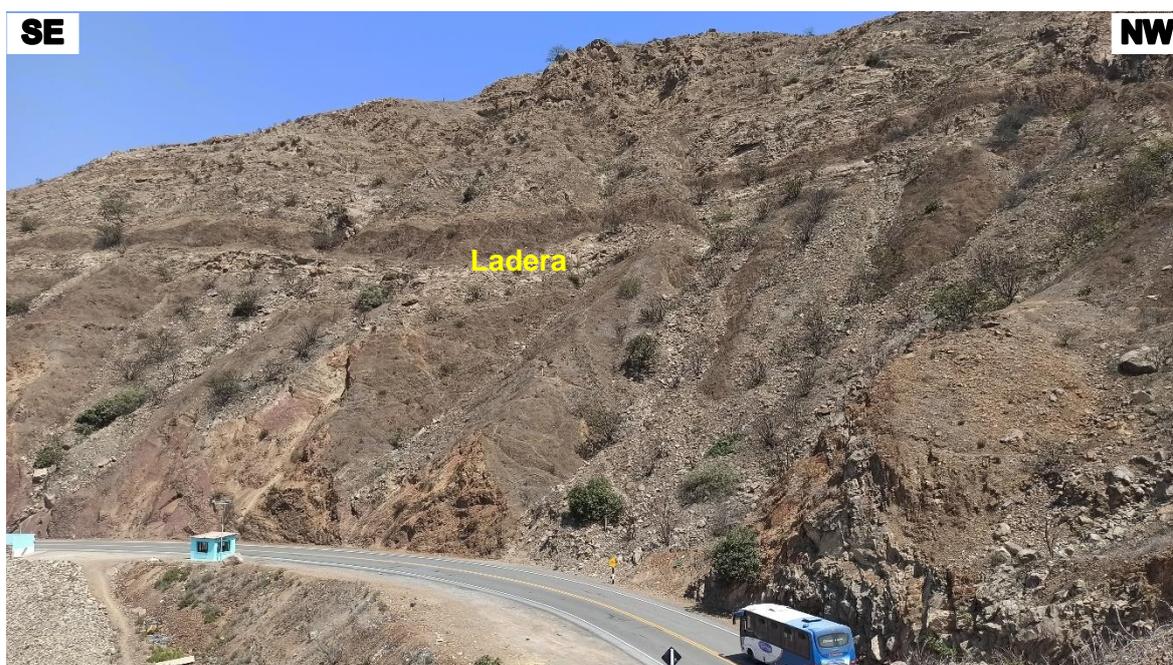


Foto 3.20: Ladera en la Formación Chúlec, en el margen derecho de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 697292; N 9200296; Cota= 439 m.s.n.m.

3.5.3.4. Escarpas

Dávila (2011), lo define como un fuerte desnivel en los terrenos que delimita a dos superficies más o menos planas. Es así que, para el área de investigación, se identifica hacia la parte más superior del trazado de la carretera, un desnivel con superficies no necesariamente planas, dado a la existencia de diferentes geoformas; esto, debido al resultado del comportamiento del macizo rocoso frente a las deformaciones estructurales y al grado de erosión.

El rango de pendiente definida para esta Unidad Morfogenética, es ser mayor a 50°. Y el área que involucra, corresponde a parte de la Formación Farrat y la Formación Carhuaz, pertenecientes al Cretácico Inferior, conformadas por areniscas y cuarcitas, de ligera a moderado grado de fracturamiento. En algunos sectores presentan inestabilidad, observándose al pie del fuerte desnivel conos de detritos.



Foto 3.21: Escarpas en la Formación Farrat, en el margen izquierdo de la carretera Ciudad de Dios-Cajamarca. Coordenadas: E 697232; N 9200817; Cota= 560 m.s.n.m.

Tabla 3.5: Unidades Morfogenéticas del área de investigación.

Tipo de relieve	Geometría	Litología	Origen	Edad de la litología		
Unidad Morfogenética	Pendiente	Asociada a su composición	Asociado al evento o proceso geológico	Período	Época	Edad
Planicies	0° - 8°	Depósitos al, fl, an	Transportado	Cuaternario	Pleistoceno-Holoceno	
Lomadas	8° - 20°	Depósitos co, coal	Transportado	Cuaternario	Pleistoceno-Holoceno	
Lomadas Laderas	15° - 20° 20° - 45°	Roca Intrusiva gd, tn, mgr	Ígneo	Paleógeno - Neógeno	Oligoceno - Plioceno	
Lomadas Laderas	8° - 20° 20° - 39°	Formación Inca	Sedimentario	Cretácico	Inferior	Aptiano
Lomadas Laderas	12° - 20° 20° - 38°	Formación Chúlec	Sedimentario	Cretácico	Inferior	Aptiano
Laderas	20° - 48°	Formación Carhuaz	Sedimentario	Cretácico	Inferior	Barremiano
Laderas Escarpas	38° - 50° >50°	Formación Farrat	Sedimentario	Cretácico	Inferior	Barremiano

3.5.4. Geodinámica.

La meteorización (mecánica y química) como la erosión, son procesos geológicos los cuales ocurren sobre y debajo de la superficie de la corteza terrestre; evidencia de ello, se muestran los taludes entre el Km. 34+700 y Km. 42+200 de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca, afectados por agentes geológicos y atmosféricos. La trascendencia de estos procesos, han dado resultado a la ocurrencia de fenómenos geodinámicos, presenciándose MM de suelo y roca, que generan inestabilidad en los taludes además de convertirse en zonas inseguras para la transitabilidad vehicular y peatonal.

En el área de investigación, resaltan tres MM ocurridos en los cortes de talud de la carretera, los cuales han sido denominados como M-Qin, M-In y M-Chu. El primero (M-Qin), tuvo lugar en las areniscas calcáreas de la Formación Inca, cuyo macizo rocoso se encuentra triturado y cubierto por depósito coluvio-aluvial (espesor promedio de 1.7m. en el talud), donde el movimiento de masa presenta un asemejo a un deslizamiento rotacional o tiende a serlo dada sus características, tal y como se observa en la Foto 3.23, con un ancho de 50 m. y un largo de 30 m., aproximadamente. La figura 3.2, muestra el perfil del talud y los materiales que la componen.

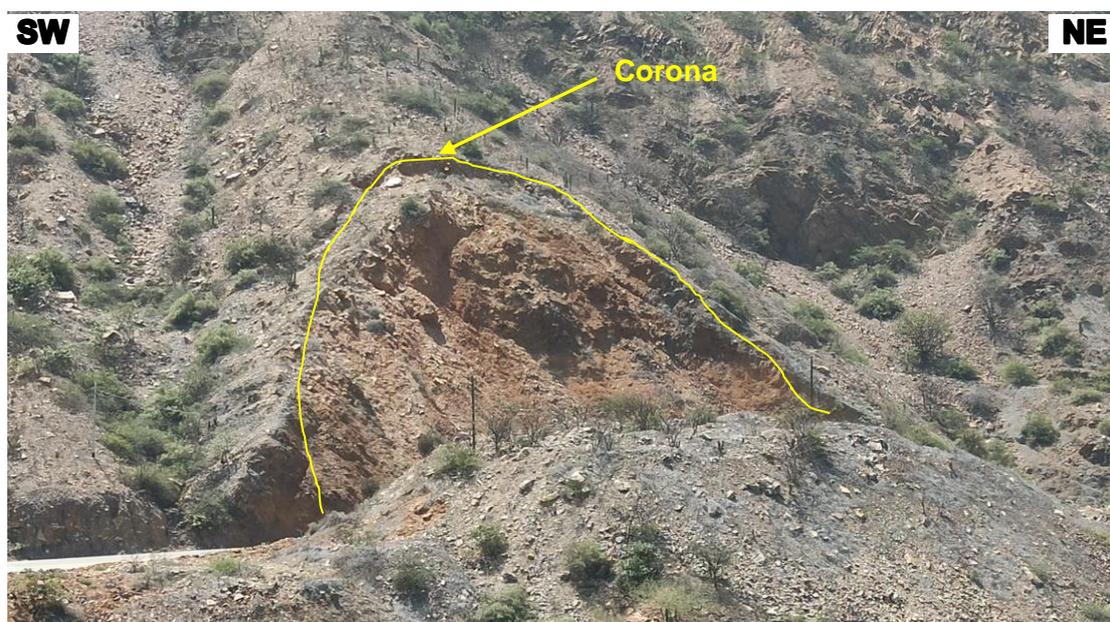


Foto 3.22: Probable deslizamiento rotacional ocurrido sobre masa rocosa triturada y depósito coluvio-aluvial. Coordenadas: E 698044; N 9201257; Cota= 428 m.s.n.m.

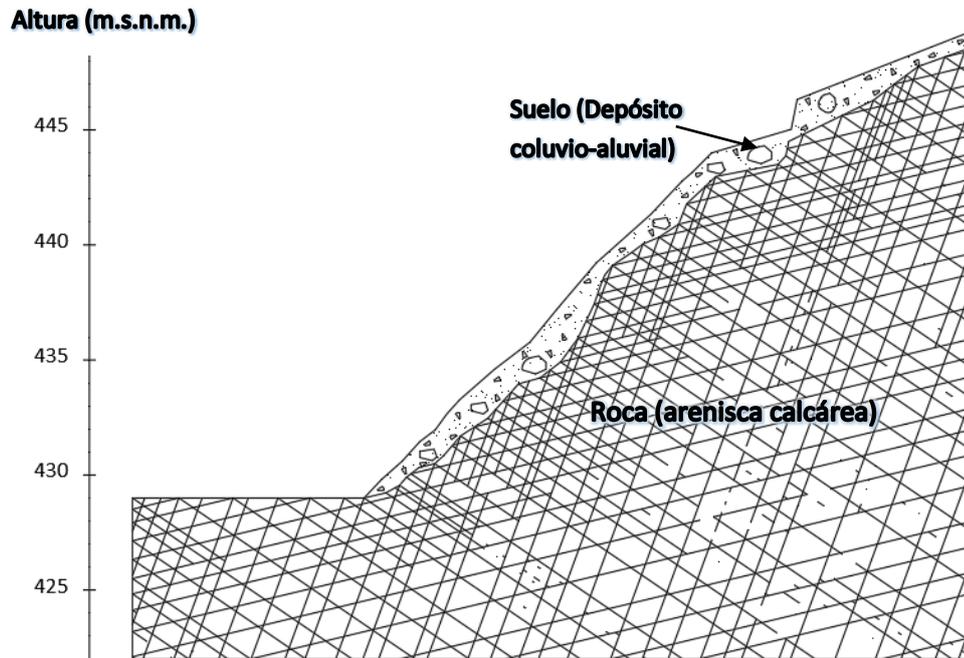


Figura 3.2. Representación de perfil del talud y disposición de los materiales que lo conforma.

El segundo MM ocurrido (M-In), se identifica como un deslizamiento traslacional planar que desplazó masa de roca arenisca calcárea (perteneciente a la Formación Inca) sobre la vía antigua, presentando un ancho de 50m. y un largo de 42m., aproximadamente. El trazado actual de la vía, se encuentra 20m. distanciada del deslizamiento, volviéndola una zona segura frente a la inestabilidad del talud, tal y como se observa en la Foto 3.24.



Foto 3.23: Deslizamiento de rocas tipo traslacional planar, cubriendo la vía antigua entre las progresivas km.37+224 al Km. 37+364 de la carretera Cajamarca – Ciudad de Dios. Coordenadas: E 698195; N 9201139; Cota= 427 m.s.n.m.

El tercer MM ocurrido (M-Chu), se identifica también como deslizamiento traslacional con rotura planar desplazando rocas de calizas arenosas de la Formación Chúlec hacia la vía, cuyas dimensiones son de un ancho de 50m. y un largo de 58m., aproximadamente. Actualmente la masa rocosa se encuentra acumulada en el pie de talud donde se observan bloques de roca de hasta 3.5m de largo, tal y como se muestra en la Foto 3.25.



Foto 3.24: Deslizamiento de rocas calizas con rotura planar, entre el Km.41+142 y Km. 41+217 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.
Coordenadas: E 700418; N 9201390; Cota= 435 m.s.n.m.

Coincidentemente (según testimonios de habitantes aledaños), estos MM se desencadenaron ante las precipitaciones pluviales frecuentes y anómalas, durante el fenómeno del niño. Sin embargo, el alto grado de fracturamiento rocoso, en ciertos sectores y visibles en el corte de carretera, no exenta que, ante cualquier movimiento sísmico se pueda desencadenar mayores movimientos de masas. Actualmente, se ha evidenciado la caída de pequeños fragmentos de roca hacia el pie de talud, berma y en algunos casos, hasta el centro del ancho de la vía; debido a las vibraciones generadas por el tránsito de vehículos pesados.

3.6. GEOTECNIA

Este ítem comprende la investigación geotécnica necesaria para la determinación de inestabilidad en los taludes comprendidos entre el Km. 34+700 y Km. 42+200, de la Carretera Ciudad de Dios – Cajamarca. Para ello, las investigaciones de campo comenzaron con la inspección general de los taludes en todo el corte de carretera, cuyo fin es conocer la disposición de los materiales que los constituyen, así como, los indicios que lleven a considerarlos como inestables o tiendan a la inestabilidad, de acuerdo a la geodinámica activante.

Dicha inspección segmentó el tramo de carretera a investigar, sectorizándose los subtramos de interés, los cuales fueron evaluados aplicando métodos empíricos mediante el uso de las principales clasificaciones geomecánicas, como: Índice de calidad de la roca (RQD) según Deere 1967, Índice Geológico de Resistencia (GSI) según Hoek 1997, y Valoración del macizo rocoso (RMR) según Bieniawski 1989.

Parte de las condiciones de inestabilidad en taludes, también es obtenida mediante el método analítico; para esto, se realizaron proyecciones estereográficas con las familias de discontinuidades del macizo rocoso, utilizando la falsilla de Schmidt (igual área) en el Software Dips v7.0, las cuales son propensas a provocar fallas tipo planar y en cuña; y, cuyo grado de ocurrencia es determinada porcentualmente mediante el análisis cinemático.

Adicionalmente, en conjunto con los criterios de rotura de Morh-Coulumb y Hoek & Brown, se procesaron otros datos en el Software RocData v4.0, determinando cuantitativamente los parámetros de resistencia, cuyos valores fueron analizados e ingresados a los métodos de equilibrio límite a fin de obtener el factor de seguridad (mediante Software Slide v6.0), que definen de manera numérica la inestabilidad de los taludes en el tramo de investigación.

Se ha utilizado el Software Loadcap de la empresa Geostru 2018 para el cálculo de los coeficientes sísmicos horizontal (k_h) y vertical (k_v) necesarios para el análisis sísmico, teniendo en cuenta la base teórica del ítem 2.2.6. del presente

informe. El área de investigación se localiza en la Zona Sísmica 3 (ver Figura 3.3), correspondiente a la aceleración sísmica máxima considerada 0.35.

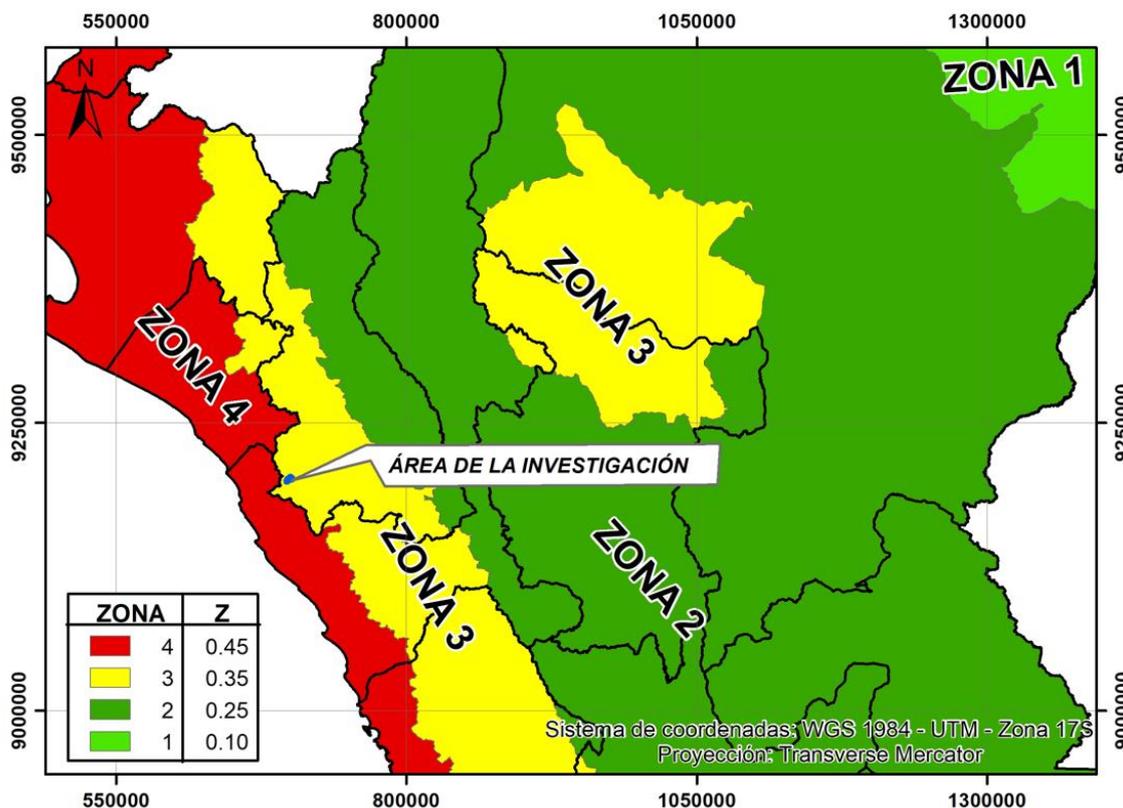


Figura 3.3: Localización del área de investigación en Zona Sísmica 3.

El Software Loadcap trabaja con Eurocódigos, los cuales son normas europeas para la ingeniería, redactadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN); este caso, se considera la Normativa italiana O.P.C.M. 3274 dado que la clasificación de sus zonas sísmicas coincide con las del Perú, teniendo una sola variación en particular donde la Zona Sísmica 3, para la normativa europea es la Zona Sísmica 1. Además, considera otros parámetros de entrada como el coeficiente de amplificación topográfica (S_T) y la categoría del perfil estratigráfico (S), mostrada en la Tabla 3.6.

En función a dicha tabla, se ha asignado el valor de $S_T = 1$, dado que los taludes tienen alturas menores a 30 m y no presentan topografías irregulares con cretas largas. Así mismo, se ha asignado en valor de $S = 1$, dado que los taludes analizados son del tipo A. De esta manera, se ha obtenido los valores de coeficiente de sísmico horizontal $k_h = 0.175$ y coeficiente de sísmico vertical $k_v = 0.088$, como se muestra en la Figura 3.4.

Tabla 3.6. Parámetros de entrada para el cálculo de los coeficientes sísmicos.

Factor de zona (Z)	Coefficiente de Amplificación topográfica (S_T)	Categoría del Perfil estratigráfico (S)
4 = 0.45	$S_T = 1$ Pendientes topográficas regulares, crestas inferiores al ancho de la base y altura menor a los 30 m.	Tipo A: $S = 1$ Roca u otra formación geológica similar a una roca.
3 = 0.35	$S_T \geq 1.2$ Sitios de proximidad al borde superior de taludes y laderas aislados, ángulo de pendiente > 15°.	Tipo B: $S = 1.25$ Depósitos de arenas o gravas muy densas, o arcillas muy consistentes.
2 = 0.25	$S_T \geq 1.2$ Sitios de proximidad al borde superior de taludes y laderas aislados, ángulo de pendiente < 30°.	Tipo C: $S = 1.25$ Depósitos de arenas o gravas densas, o arcillas consistentes.
1 = 0.10	$S_T \geq 1.4$ Sitios cercanos a la cúspide de la ladera, con crestas significativamente menores al ancho de la base y pendiente > 30°.	Tipo D: $S = 1.35$ Depósito de terrenos granulares sueltos a poco densos de cohesión media a no cohesivos. Tipo E: $S = 1.25$ Perfil de suelo formado por una capa aluvial superficial.

The image displays two overlapping software windows from the 'Software Loadcap de Geostru' application. The top window, titled 'Azione sismica', shows the main configuration for seismic action, with 'O.P.C.M. 3274' selected in the dropdown menu. Below this, the 'Calcolo coefficienti sismici' section shows a maximum acceleration of 0.35 ag/g. The 'Coefficienti sismici' section displays calculated values: 0.175 for the horizontal coefficient (Khk) and 0.088 for the vertical coefficient (Khi). The 'Effetto sismico secondo' is set to 'Nessuno effetto sismico'. The bottom window, titled 'Parametri sismici OPCM', provides a detailed view of the input parameters: 'Zona Sismica' is set to 1, 'Accelerazione massima / g' is 0.35, 'Coefficiente amplificazione topografica' is 1.0, 'Categoria profilo stratigrafico' is A, and the horizontal (Kh) and vertical (Kv) intensity coefficients are 0.175 and 0.088, respectively. Both windows include 'Ok', 'Annulla', and '?' buttons.

Figura 3.4: Cálculo del coeficiente sísmico horizontal y vertical mediante el Software Loadcap de Geostru.

Finalmente, para obtener el factor seguridad en los taludes, se plantearon distintos escenarios (6), como se muestra en la tabla 3.6, los cuales señalan las condiciones de análisis para cada talud; entre ellos, la saturación del material debido a filtración de las precipitaciones pluviales, y la sismicidad.

Tabla 3.7: Descripción de escenarios para el análisis de taludes.

Análisis	Escenario	Gravedad (m/s ²)	Kh	Kv	Nivel Freático	Descripción
1	Condiciones normales (CN)	9.81	0	0	Ausente	Condiciones estáticas drenadas (Tensiones Totales)
2	Saturación Parcial (SP)	9.81	0	0	Profundidad media del material crítico	Condiciones de lluvias intensas (Tensiones Totales y Tensiones Efectivas)
3	Saturación Total (ST)	9.81	0	0	Hasta la superficie del terreno	Condición de lluvias extraordinariamente intensas (Tensiones Efectivas)
4	Sismicidad Máxima (SM)	9.81	0.175	0.088	Ausente	Máximas aceleraciones sísmicas en la zona
5	Saturación Parcial y Sismicidad Máxima (SP-SM)	9.81	0.175	0.088	Profundidad media del material crítico	Combinación de las condiciones 2 y 4.
6	Saturación Total y Sismicidad Máxima (SP-SM)	9.81	0.175	0.088	Hasta la superficie del terreno	Combinación de las condiciones 3 y 4.

Estos escenarios configurados en el Software Slide v6.0, utiliza tres métodos de dovelas, los cuales realizan equilibrio de fuerzas y de momentos: Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern – Price.

3.6.1. Inventario de condiciones geológica-geotécnicas de los taludes

Con el fin de conocer en qué circunstancias se encuentran los taludes, localizados entre las progresivas Km. 34+700 al Km. 42+200 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca; se hizo un reconocimiento general para inspeccionar y registrar las características geológicas y geotécnicas que, ayuden a dar señales de ocurrencia de fenómenos geodinámicos con hincapié a los deslizamientos tipo cuña y planar, dando como resultante, el fraccionamiento del tramo en sí, según el estado predominante de los taludes. De ellos, las zonas de mayor interés son escogidas para ser objeto de análisis, a través de puntos de control y determinar si estos taludes son inestables.

Tabla 3.8: Inventario de condiciones geológica-geotécnicas de los taludes.

Progresivas (Km.)	Descripción
34+700 – 35+033	<p>Se observa únicamente afloramiento de roca intrusiva, granodiorita, perteneciente al Batolito de la Costa. El macizo rocoso posee un grado de fracturamiento moderado a muy fracturado, con superficies de discontinuidades ligera a moderadamente meteorizadas. Entre estas progresivas, la carretera es sinuosa y va en ascenso presentando pendiente entre 5° y 9°. Los cortes de taludes presentan una variabilidad de altura de acuerdo a la morfología del área, estimándose una altura promedio de 10 m. Por el grado de fracturamiento y disposición de sus discontinuidades, en condiciones saturadas y sísmicas, estos taludes pueden afectar su estabilidad.</p>
35+033 – 35+111	<p>En este tramo afloran rocas de arenisca, perteneciente a la Formación Farrat. El macizo rocoso se encuentra moderadamente fracturado y ligera a moderadamente meteorizado. Comprende una zona de carretera curva y debido a la resistencia de la roca se observa un perfilado adentado en la cara del talud, cuyas discontinuidades tienden orientarse a favor del mismo. Se estima la altura promedio del talud de 14 m. Por el grado de fracturamiento y disposición de sus discontinuidades en condiciones saturadas y sísmicas, estos taludes pueden afectar su estabilidad.</p>
35+111 – 36+270	<p>Los cortes de talud de este tramo, muestran macizos rocosos heterogéneos y anisotrópicos donde afloran sectorialmente, calizas arenosas y limolitas calcáreas (Fm. Chúlec); areniscas calcáreas y limolitas ferruginosas (Fm. Inca). También afloran rocas intrusivas como, monzogranito (emplazado entre las calizas arenosas de la Fm. Chúlec) y granodiorita (emplazado en las areniscas calcáreas de la Fm. Inca). Predomina un leve grado de fracturamiento con una meteorización variable entre moderado a fresco. La altura de los taludes es variable moldeada a la morfología del terreno, oscilando entre 8m. y 15m. Se destaca la presencia de geoestructuras como fallas normales y un sinclinal que inciden sobre la Fm. Chúlec, principalmente.</p> <p>Se descarta la probabilidad de inestabilidad de los taludes ante la saturación y/o actividad sísmica que pueda ocurrir para este tramo.</p>
36+270 – 36+366	<p>Se observa afloramiento de roca arenisca calcárea (perteneciente a la Fm. Inca) con alto grado de fracturamiento y meteorización, cubierta por depósito coluvio-aluvial compuesto por cantos, gravas y algunos bloques subangulosos en matriz limo arenoso. Particularmente, este tramo aparenta tener la forma de un deslizamiento rotacional, observándose en la parte superior del talud un ligero desplazamiento del terreno, existiendo la probabilidad de deslizamiento de estos materiales haciendo inestable el talud; especialmente en temporadas de lluvias y/o ante movimientos sísmicos. Este corte de talud tiene una altura promedio de 15m. y bajo sus condiciones morfoestructurales adquiere una inclinación de 45°.</p>

Progresivas (Km.)	Descripción
36+366 – 36+658	<p>Afloran areniscas calcáreas, pertenecientes a la Fm. Inca. En este tramo existe homogeneidad y cierto grado de anisotropía en los macizos rocosos, pues, en el corte de carretera se muestran con alto grado de fracturamiento y con meteorización muy alta a moderada, con tendencia a convertirse como un suelo. La altura de los taludes varía de acuerdo a la morfología del terreno, con una altura máxima de 13 m.</p> <p>Es probable que los taludes adquieran un comportamiento inestable ante condiciones saturadas debido a lluvias y ante movimientos sísmicos.</p>
36+658 – 38+383	<p>En los cortes de talud de este sector, se observan depósitos coluviales, constituidos por bloques, cantos y gravas angulosos; depósitos coluvio-aluviales, conformados por cantos, gravas y algunos bloques subangulosos en matriz limo arenoso; además, areniscas calcáreas y limolitas ferruginosas, pertenecientes a la Fm. Inca. Los macizos rocosos se muestran con meteorización moderada a leve y con fracturamiento moderado a leve. La altura de los taludes varían de 5m. a 9m. y su inclinación de 80° a 85°, en material rocoso; mientras que, en suelo los taludes no superan los 4 m. de altura y son casi verticales. Cabe mencionar, la presencia de una falla normal sinistral que corta el paquete litológico de la Fm. Inca, orientada de Suroeste a Noreste.</p> <p>Para este tramo, se descarta la probabilidad de inestabilidad de los taludes, aún en condiciones saturadas y/o sísmicas.</p>
38+383 – 38+471	<p>Afloran en este tramo, limolitas ferruginosas, perteneciente a la Fm. Inca. El macizo rocoso presenta un moderado grado de meteorización y alto grado de fracturamiento. Los taludes poseen una altura máxima de 10m. y una inclinación uniforme de 85°. Se evidencia algunos bloques de roca de hasta 60 cm. de largo al pie de talud, por lo que, ante condiciones pseudoestáticas y/o saturadas del material, estos taludes pueden presentar inestabilidad.</p>
38+471– 38+775	<p>La carretera corta longitudinalmente a la Fm. Chúlec y en los cortes de talud se observan calizas arenosas nodulares y fosilíferas, en concordancia con limolitas calcáreas y margas. Los macizos rocosos presentan una ligera meteorización y un grado de fracturamiento bajo. La altura máxima de los taludes es de 12m. y por estar conformada predominantemente por roca competente se descarta la probabilidad de inestabilidad.</p>
38+775 – 38+887	<p>En el corte de carretera de este sector, afloran calizas nodulares, pertenecientes a la Fm. Chúlec, donde se observan los estratos plegados formando el flanco derecho del Sinclinal erosionado, cuyo eje está orientado de Suroeste a Noreste. Presenta un macizo rocoso homogéneo e isotrópico, caracterizado por un grado de fracturamiento moderado y meteorización moderada a leve; así mismo, uno de los planos de debilidad tiende a inclinarse a favor del talud, por lo que, existe la probabilidad de que los taludes presenten inestabilidad ante condiciones pseudoestática y/o saturadas. La altura máxima de estos taludes es de 13m.</p>

Progresivas (Km.)	Descripción
38+887 – 39+678	Se observa en los cortes de carretera, calizas nodulares (Fm. Chúlec), areniscas calcáreas con limolitas ferruginosas (Fm. Inca), areniscas (Fm. Farrat), areniscas cuarzosas (Fm. Carhuaz) y depósitos coluviales conformado cantos y bloques, gravas angulosos; cuya fuente litológica proviene de las Formaciones Inca y Chúlec. Los macizos rocosos presentan meteorización moderada a leve y un grado de fracturamiento bajo. Los taludes tienen una altura máxima de 7m. y poseen buena estabilidad.
39+678 – 39+801	Afloran areniscas, pertenecientes a la Fm. Carhuaz. El macizo rocoso presenta grado de meteorización moderado a alto y su grado de fracturamiento es alto a moderado. En las áreas más fracturadas del talud, se concentra lodo seco otorgando de manera natural cierta adherencia a los fragmentos. Los cortes en los taludes se amoldan de acuerdo a la morfología del lugar, adquiriendo una altura máxima de 16 m. En condiciones naturales, este sector muestra una aparente estabilidad para sus taludes, sin embargo, existe la probabilidad de volverse inestable ante condiciones pseudoestáticas y saturadas.
39+801 – 40+000	El 70% de este sector, comprende espacio abierto debido al encauce de la Quebrada Los Leones (existe un puente con el mismo nombre que conecta la vía) que vierten sus aguas al embalse de la Represa Gallito Ciego; observándose depósitos de tipo aluvial, antrópico y coluvio-aluvial, además de, rocas areniscas perteneciente a la Fm. Carhuaz; los cuales son intersectados por la vía. Escasamente se observan taludes.
40+000 – 40+094	Se observan areniscas, perteneciente a la Fm. Carhuaz. Los taludes presentan el macizo rocoso con grado de fracturamiento moderado y meteorización moderada. En la parte superior del corte de carretera, se visualizan fracturas más abiertas propensas a tener un deslizamiento lateral a favor del talud, los mismos que, alcanzan una altura máxima de 12m. acorde al amoldamiento del terreno.
40+094 – 41+525	La carretera secciona afloramientos de areniscas cuarzosas (Fm. Carhuaz); areniscas (Fm. Farrat); areniscas calcáreas con limolitas ferruginosas (Fm. Inca); calizas nodulares (Fm. Chúlec), y depósitos coluviales conformado por cantos, bloques y gravas angulosas. En los macizos rocosos, el grado de fracturamiento oscila de moderado a leve y la meteorización de moderada a ligera. En este tramo, los taludes forman parte de laderas con topografía más suave, existiendo pocos y mayormente localizados dentro de la Formación Chúlec. También se identifica un deslizamiento ocurrido en roca de tipo traslacional planar, donde actualmente la masa de roca se encuentra autosostenida por sus fragmentos. Por otra parte, no hay mayor indicio que vulnere la estabilidad de los taludes en este sector.

Progresivas (Km.)	Descripción
41+525 – 41+708	<p>Comprende afloramiento de roca caliza nodular, perteneciente a la Fm. Chúlec. Presenta los taludes más altos de todo el tramo en estudio, alcanzando un máximo de 20m. y muestra los estratos como extensas planchas buzando hacia el talud. El macizo rocoso, presenta un grado de fracturamiento leve a moderado y meteorización ligera a moderada.</p> <p>Este caso, en particular, se puede considerar para evaluar la respuesta del talud con tal altura sometidas a condiciones de movimientos sísmicos y de saturación.</p>
41+708 – 42+200	<p>En este sector, los taludes siguen continuidad morfológica del terreno donde la altura se reduce debido a la topografía suave y dada la competencia de la roca se denotan estables. Litológicamente comprende rocas de calizas nodulares y capas delgadas de limolitas calcáreas, también se hallan depósitos coluviales.</p> <p>El macizo rocoso se muestra con grado de meteorización ligera a moderada y fracturamiento leve. Se descarta la probabilidad de inestabilidad para estos taludes.</p>

3.6.2. Punto de control 01 entre progresivas km. 34+700 al km. 35+033

Tabla 3.9: Localización y descripción del talud en el PC-01.

DATA GPS		DESCRIPCIÓN
Datum: WGS 84 Zona: 17S		<p>El talud se conforma de roca granodiorita (emplazamiento intrusivo perteneciente al Batolito de la Costa), de color gris claro. El macizo rocoso se caracteriza por presentar bloques pequeños regulares a irregulares, con meteorización moderada a leve y con grado de fracturamiento medio tendiendo a alto, identificándose 5 familias de discontinuidades cuyas aberturas superan los 5mm. Geométricamente, el talud posee una altura de 10m. y una inclinación de 85°; la cabeza continua a la geofoma del terreno. La diversas familias de diaclasas tienden a formar cuñas y planos de deslizamiento con buzamiento hacia el talud. Esto afecta la estabilidad del talud, especialmente, ante la ocurrencia de movimientos sísmicos y precipitación pluvial extrema.</p>
Este (m.)	696796	
Norte (m.)	9199892	
Cota (m.s.n.m.)	377	



Foto 3.25: Afloramiento de roca granodiorita, entre el Km.34+700 y Km. 35+033 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.
 Coordenadas: E 696796; N 919982; Cota= 377 m.s.n.m.

Tabla 3.10: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-01.

Litología/ Formación	MACIZO ROCOSO			ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES		
	Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	Tipo	Dip	Dip Direction
Granodiorita / Batolito	1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-regular	Familia D-1	24°	223°
	2=Lev Met	2=Med	2=Bloq-irregular	Familia D-2	84°	289°
	3=Mod	3=Bajo	3=Bloq y capas	Familia D-3	83°	166°
	4=Alt		4=Frac-Intenso	Familia D-4	54°	56°
	5=Comp Met			Familia D-5	83°	245°
	6=Suelo			GEOMETRÍA DEL TALUD		
			Altura	10		
			Pie	10.50		
			Dirección	Talud	Cabeza	
			Dip	85°	30°	
	3-2	2	2 / 48	Dip Direction	235°	235°

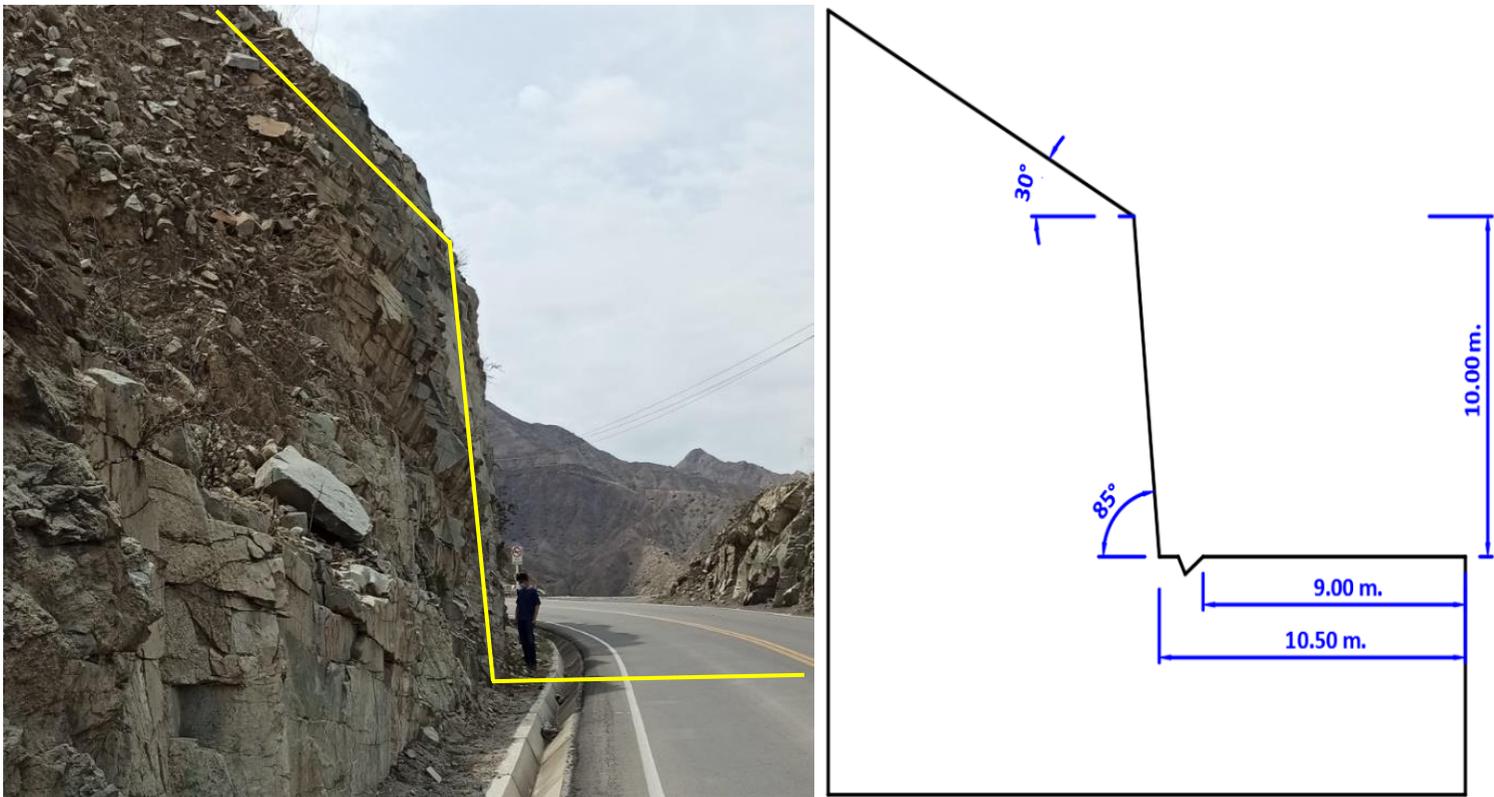


Foto 3.26: Vista perfil del talud PC-01, entre el Km.34+700 y Km. 35+033 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

Tabla 3.11: Cálculo de RQD del Talud PC-01.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1)$	ND	L(m.)	λ	RQD (%)
	53	4.5	11.78	67.07

Tabla 3.12: Valoración RMR del Talud PC-01.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
Parámetro	Rango de valores y valoraciones					Valor	
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	25-5 (2) 5-1 (1) <1 (0)	4	
RQD (%)	90%-100% (20)	75%-90% (17)	50%-75% (13)	25%-50% (6)	< 25% (3)	13	
Espaciamiento de la discontinuidad (m.)	> 2m. (20)	0,6m.-2m. (15)	0,2m.- 0,6m. (10)	0,06m.-0,2m. (8)	< 0,06m. (5)	8	
Persistencia de la discontinuidad	< 1 m. (6)	1-3 m. (4)	3-10 m. (2)	10-20 m. (1)	> 20 m. (0)	4	
Estado de las discontinuidades	Abertura	Nada (6)	< 0,1 mm. (5)	0,1-1,0 mm. (3)	1-5 mm. (1)	> 5 mm. (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Ligeramente Rugosa (3)	Ondulada (1)	Suave (0)	3
	Relleno	Ninguno (6)	Relleno duro < 5 mm. (4)	Relleno duro > 5 mm. (2)	Relleno blando < 5 mm. (2)	Relleno blando > 5 mm. (0)	2
	Alteración	Inalterada (6)	Ligeramente alterada (5)	Moderadamente alterada (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
Agua subterránea	Seco (15)	Ligeramente húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)	15	
Valor total RMR						52	

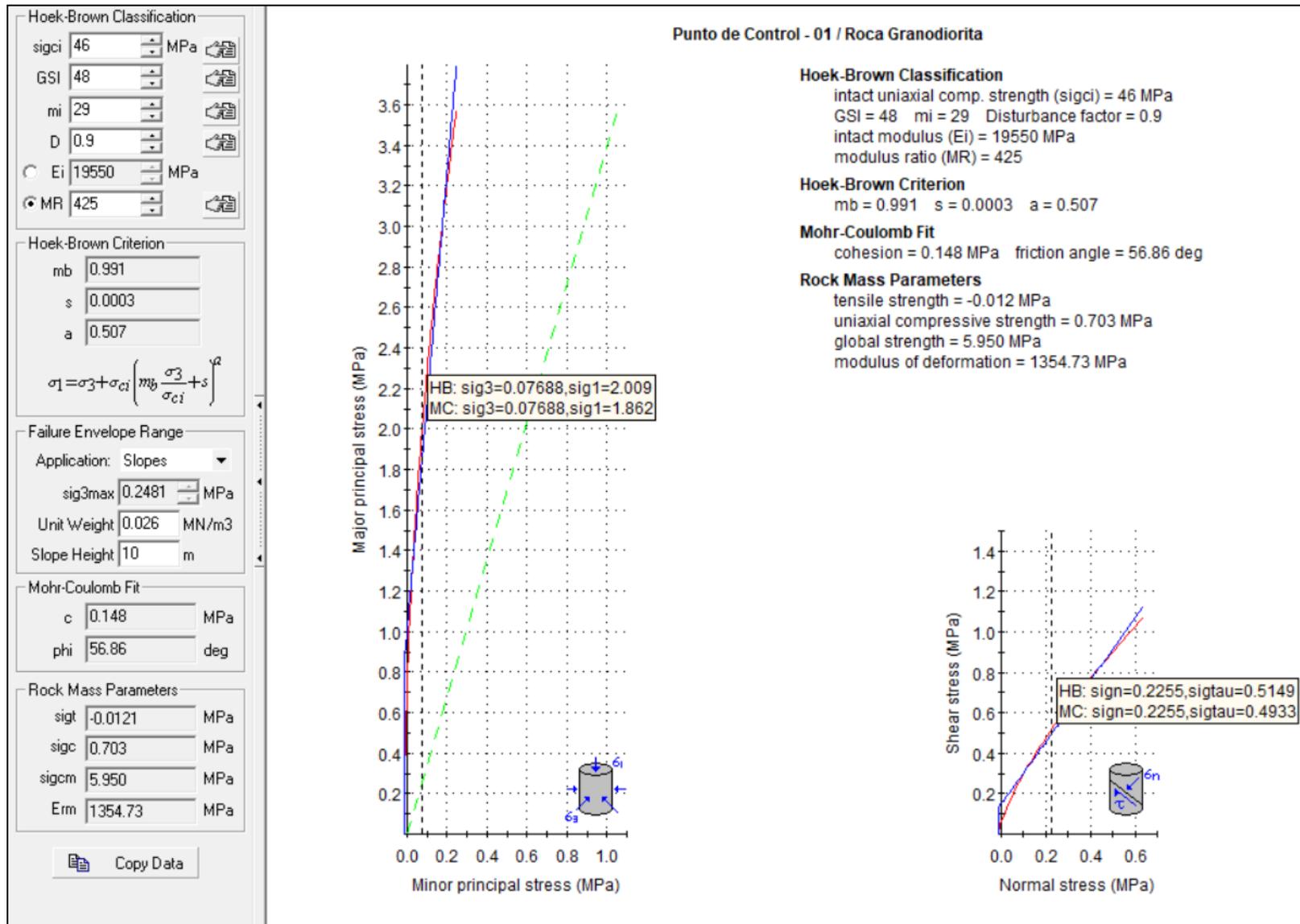


Figura 3.5: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de roca granodiorita en el talud PC-01.

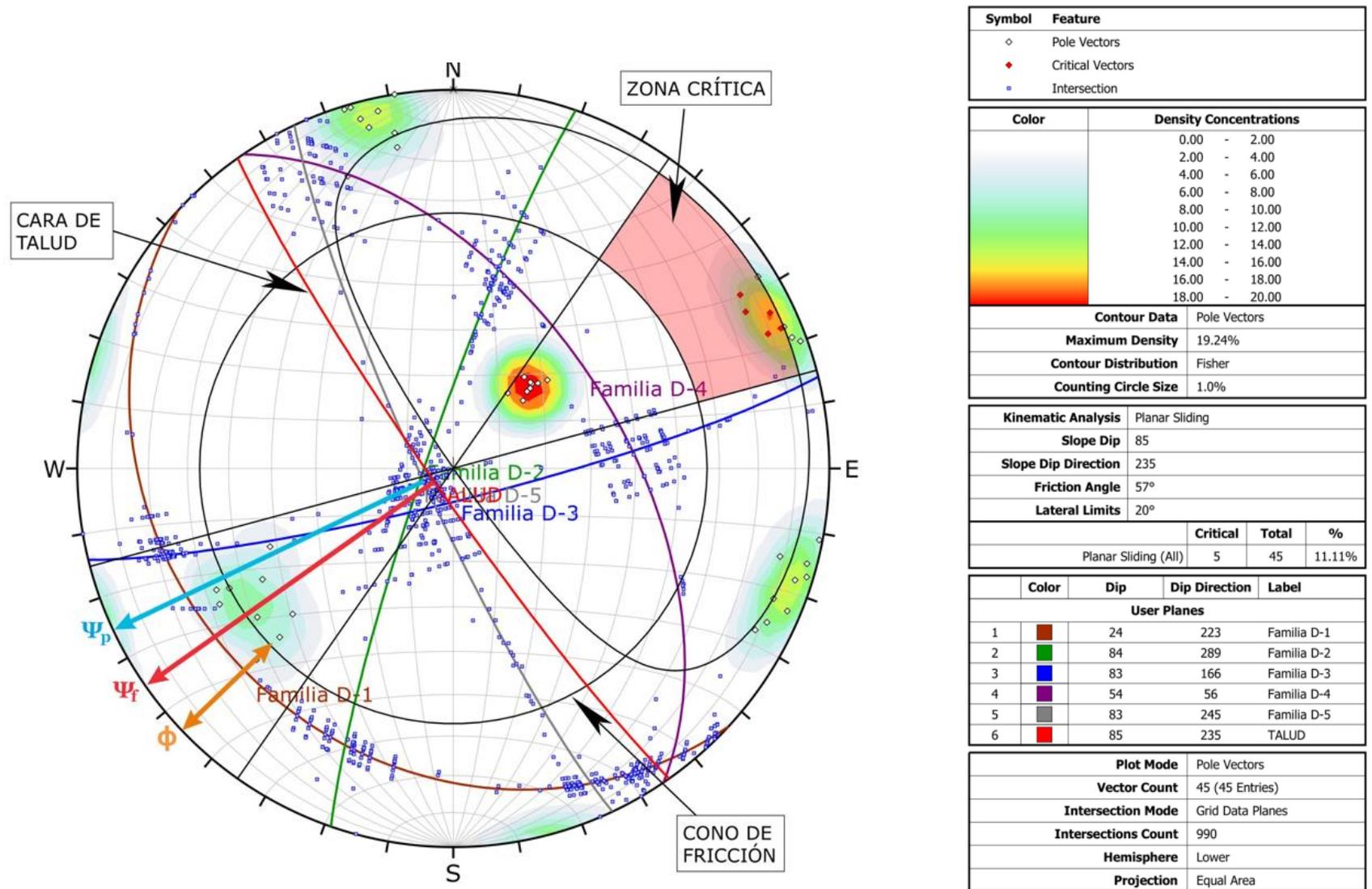
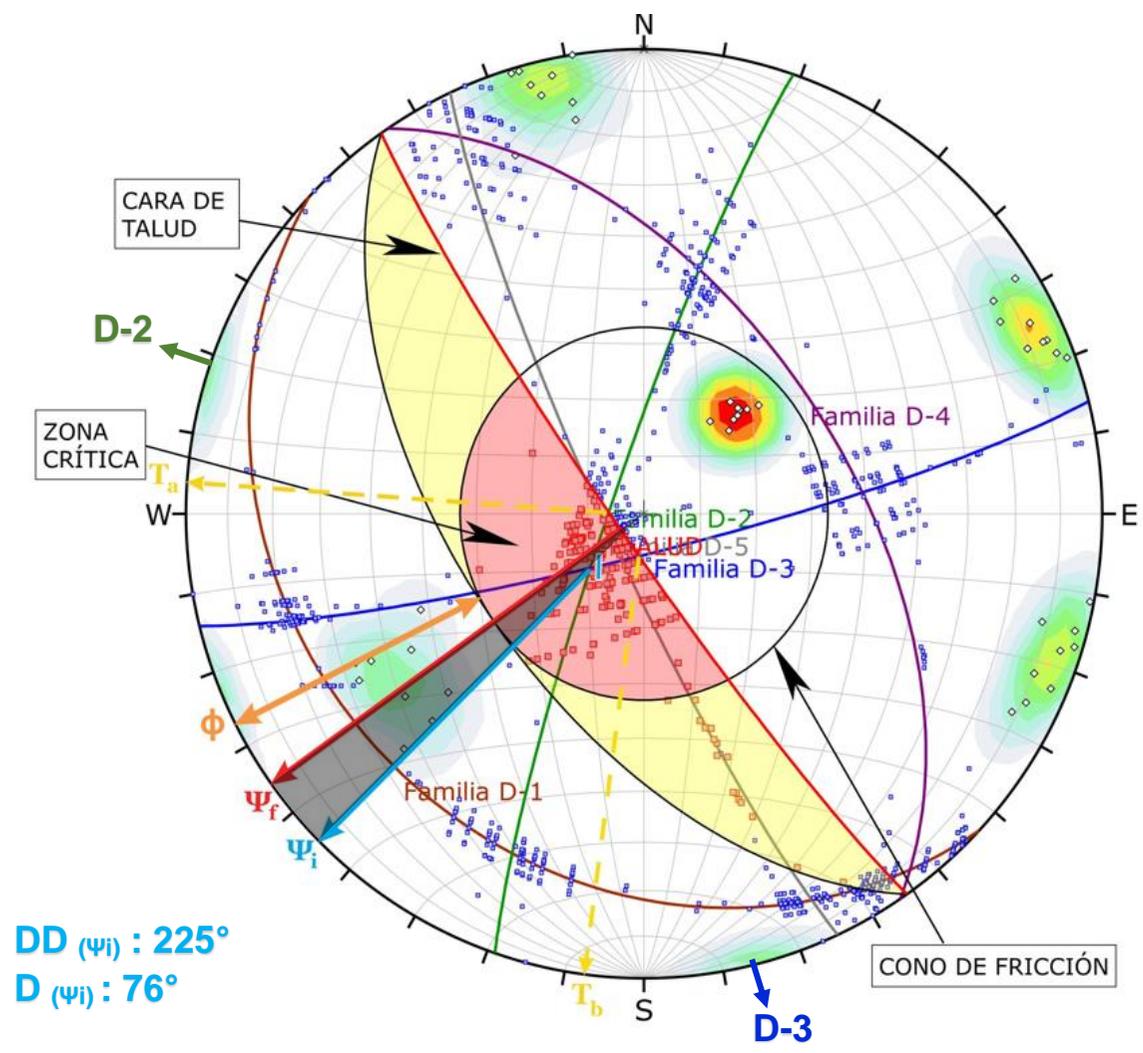


Figura 3.6: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-01, indicando una probabilidad de falla de 11.11 %.



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
■	Critical Intersection
●	Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.00
	2.00 - 4.00
	4.00 - 6.00
	6.00 - 8.00
	8.00 - 10.00
	10.00 - 12.00
	12.00 - 14.00
	14.00 - 16.00
	16.00 - 18.00
	18.00 - 20.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	19.24%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding		
Slope Dip	85		
Slope Dip Direction	235		
Friction Angle	57°		
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	209	990	21.11%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	24	223	Familia D-1
2	■	84	289	Familia D-2
3	■	83	166	Familia D-3
4	■	54	56	Familia D-4
5	■	83	245	Familia D-5
6	■	85	235	TALUD

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	45 (45 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	990
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.7: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-01, indicando una probabilidad de falla de 21.11 %.

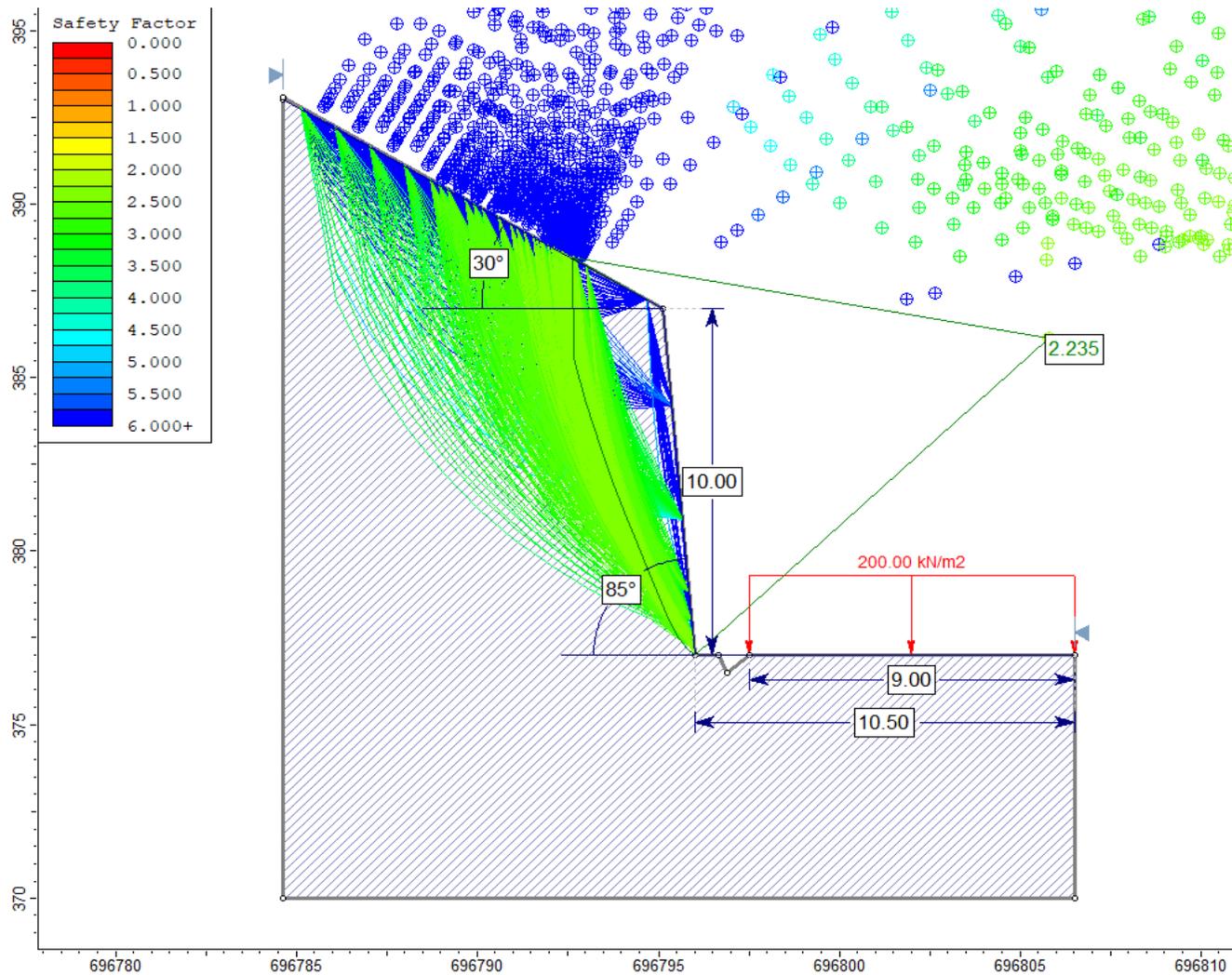


Figura 3.8: Análisis slide del talud PC-01, en Condiciones Normales.

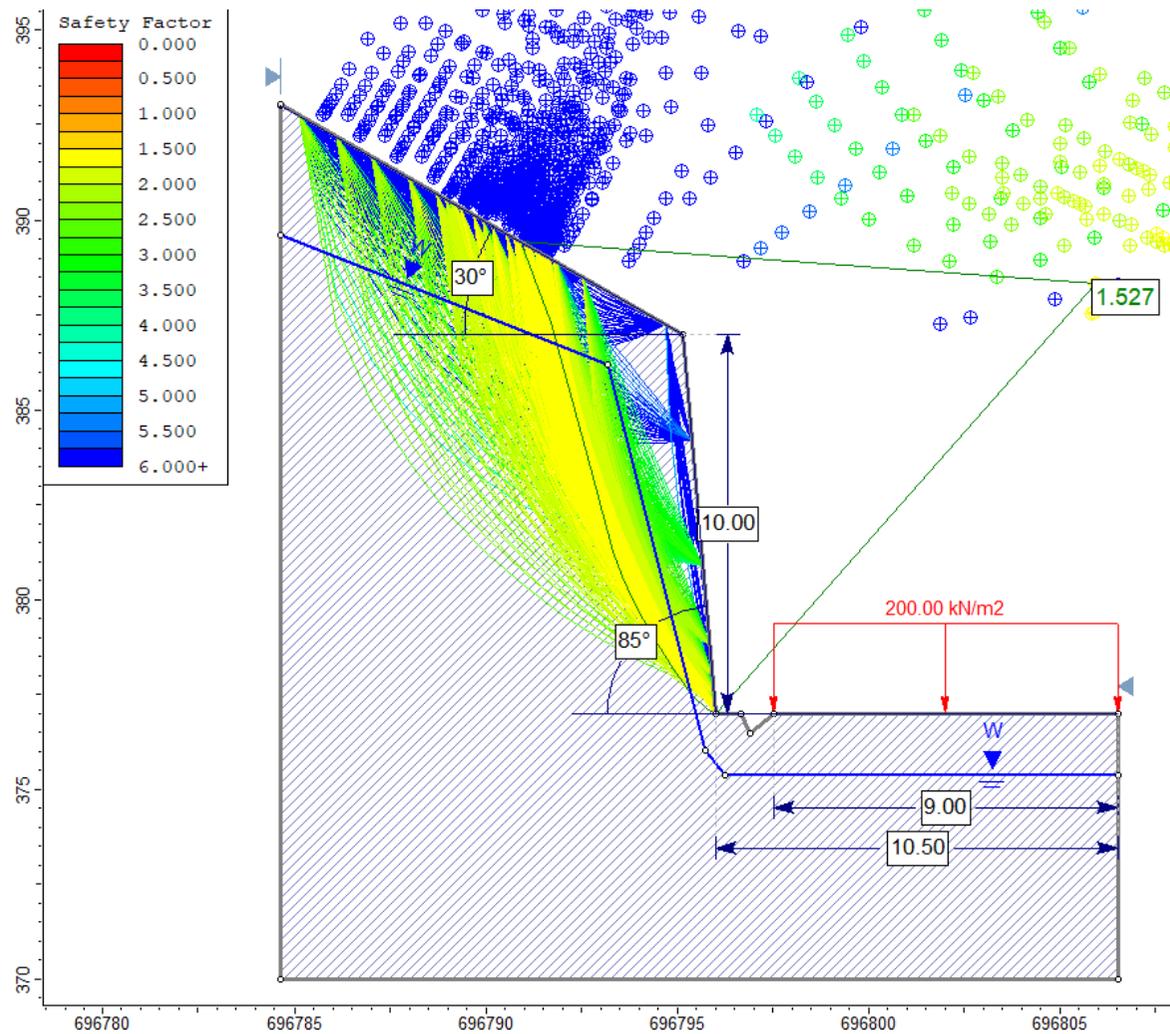


Figura 3.9: Análisis slide del talud PC-01, en condiciones de Saturación Parcial.

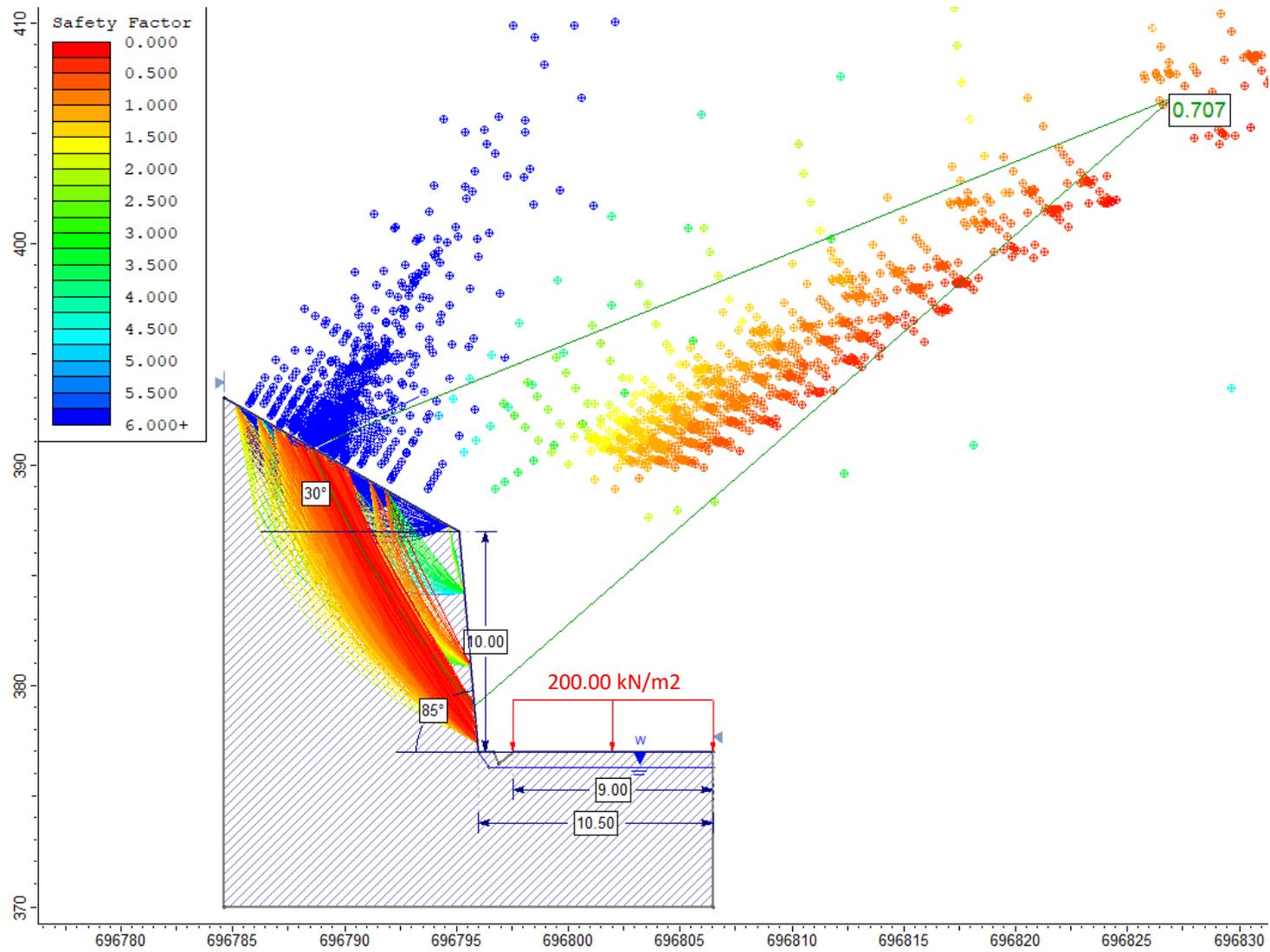


Figura 3.10: Análisis slide del talud PC-01, en condiciones de Saturación Total.

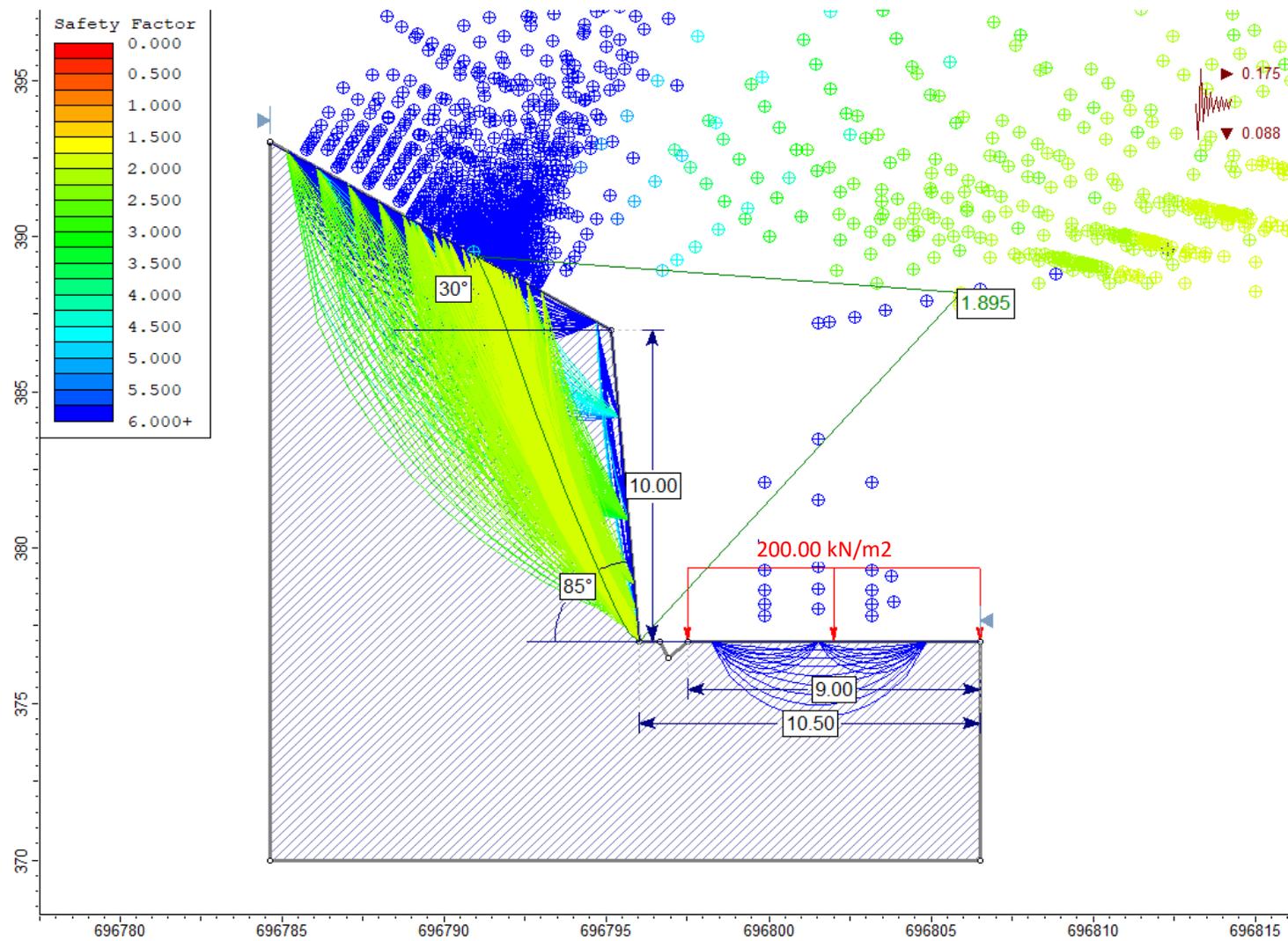


Figura 3.11: Análisis slide del talud PC-01, en condiciones de Sismicidad.

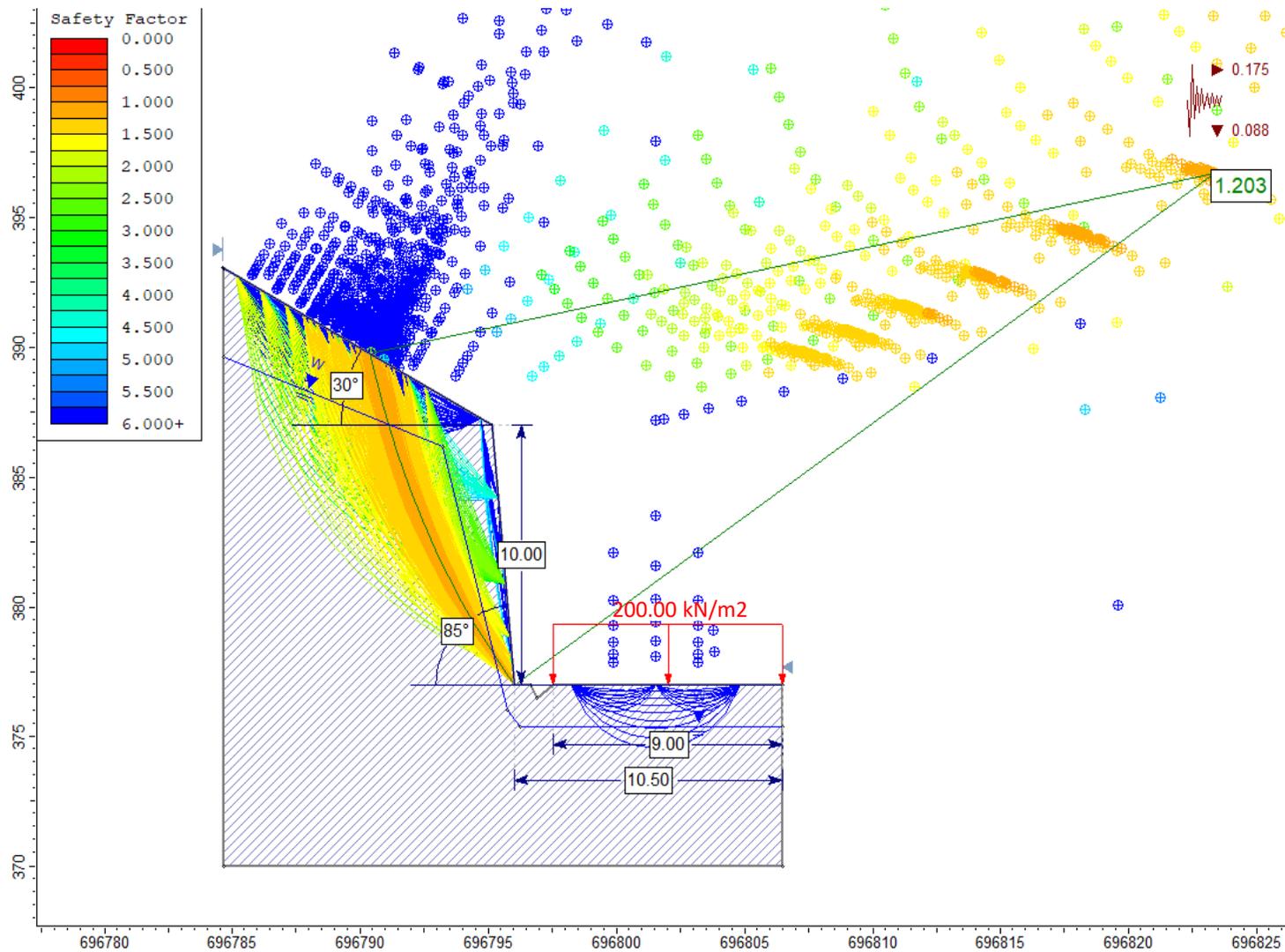


Figura 3.12: Análisis slide del talud PC-01, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad .

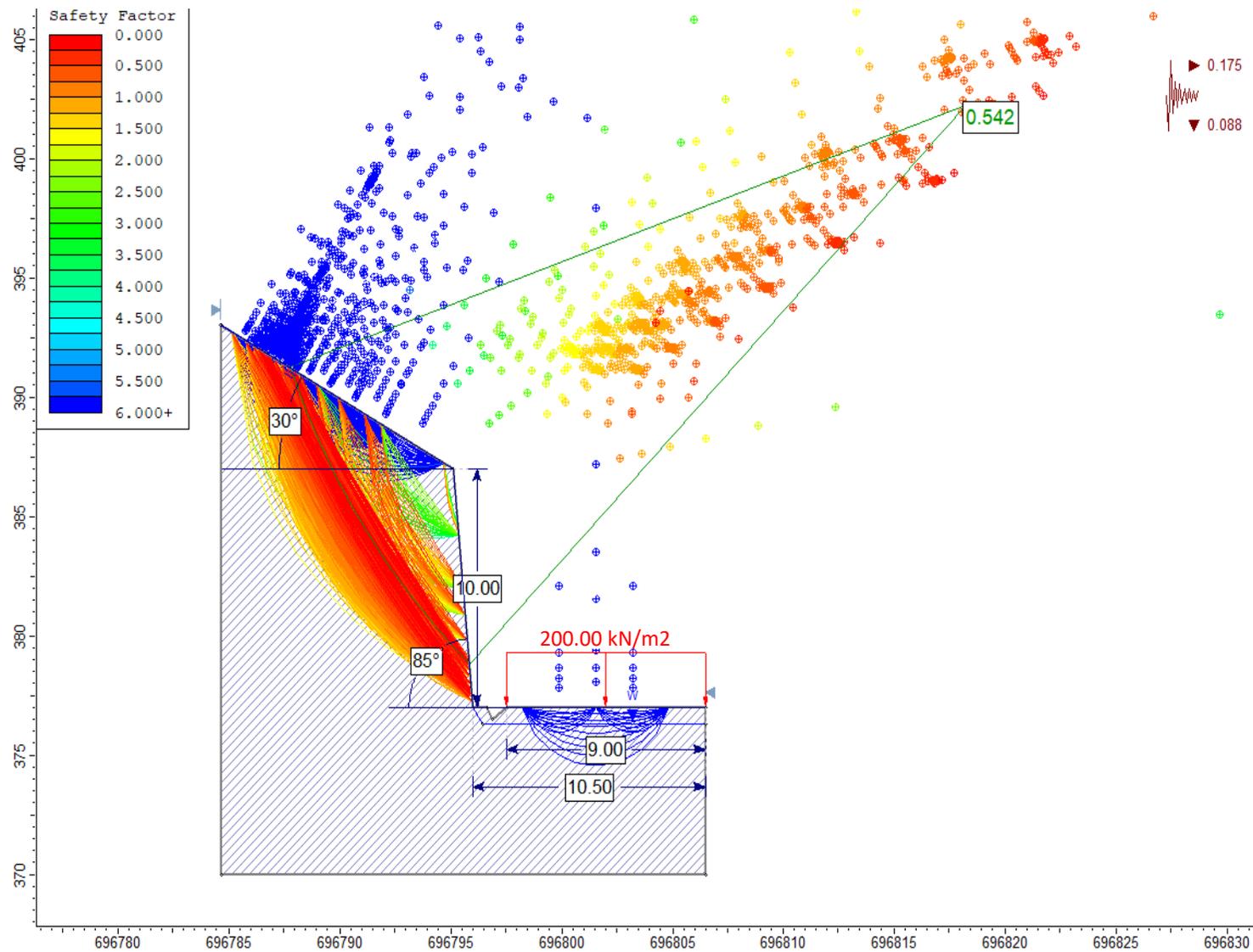


Figura 3.13: Análisis slide del talud PC-01, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.

3.6.3. Punto de control 02 entre progresivas km. 35+033 al km. 35+111.

Tabla 3.13: Localización y descripción del talud en el PC-02.

DATA GPS		DESCRIPCIÓN
Datum: WGS 84 Zona: 17S		La litología que conforma el talud, corresponde a rocas de arenisca, perteneciente a la Fm. Farrat. Se caracteriza por presentar estratos de espesores entre 0.35cm. y 0.85cm. El macizo rocoso se presenta en bloques regulares cúbicos de tamaño medio, con meteorización moderada a leve y con grado de fracturamiento medio, identificándose 3 familias de discontinuidades donde su mayor abertura entre ellas alcanza los 4.4mm. Geométricamente, el talud posee una altura de 14m., una inclinación de 85° y la cabeza continua a la geoforma del terreno. Se evidencia la formación de cuñas con los planos de discontinuidad propensos a generar inestabilidad en el talud mediante deslizamiento de masa rocosa, especialmente, ante la ocurrencia de movimientos sísmicos y/o precipitación pluvial extrema.
Este (m.)	697034	
Norte (m.)	9199798	
Cota (m.s.n.m.)	390	



Foto 3.27: Afloramiento de roca arenisca, entre el Km.35+033 y Km. 35+111 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.
Coordenadas: E 697034; N 9199798; Cota= 390 m.s.n.m.

Tabla 3.14: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-02.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES		
Litología/ Formación	Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	Tipo	Dip	Dip Direction
Arenisca / Fm. Farrat	1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-regular	Estrato	39°	131°
	2=Lev Met	2=Med	2=Bloq-irregular	Familia D-1	81°	173°
	3=Mod	3=Bajo	3=Bloq y capas	Familia D-2	87°	253°
	4=Alt		4=Frac-Intenso			
	5=Comp Met					
	6=Suelo					
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
				Altura	14	
				Pie	10.50	
				Dirección	Talud	Cabeza
				Dip	85°	40°
				Dip Direction	195°	195°
3-2		2	2 / 48			

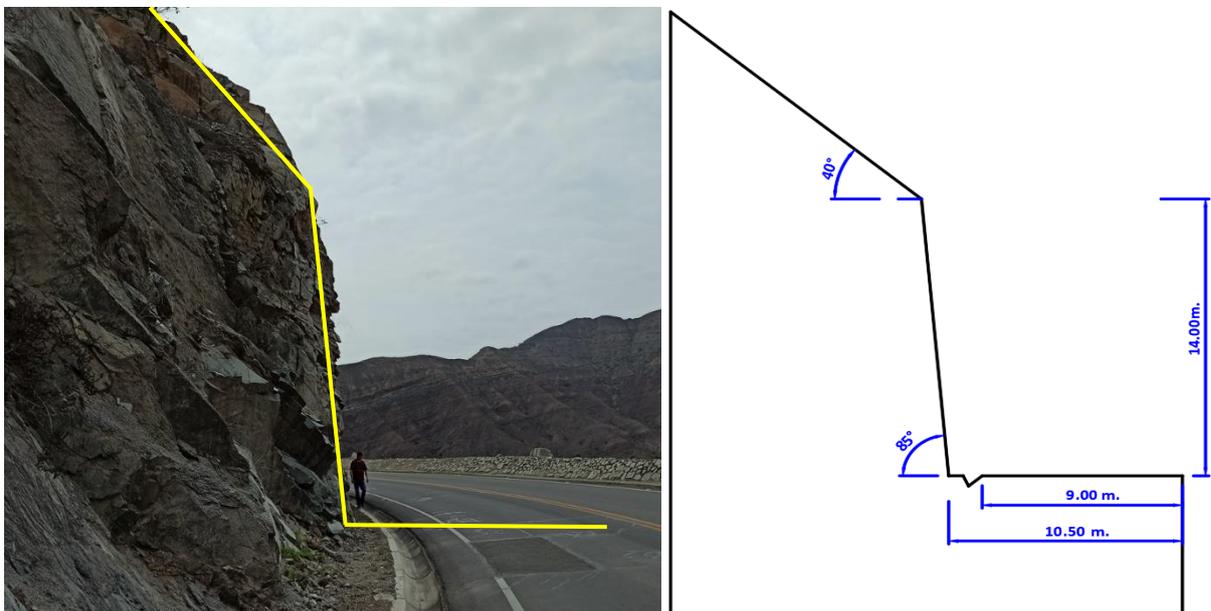


Foto 3.28: Vista perfil del talud PC-02, entre el Km.35+033 y Km. 35+111 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

Tabla 3.15: Cálculo de RQD del Talud PC-02.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1)$	ND	L(m.)	λ	RQD (%)
	55	4.5	12.22	65.46

Tabla 3.16: Valoración RMR del Talud PC-02.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
Parámetro	Rango de valores y valoraciones					Valor	
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	25-5 (2) 5-1 (1) <1 (0)	7	
RQD (%)	90%-100% (20)	75%-90% (17)	50%-75% (13)	25%-50% (6)	< 25% (3)	13	
Espaciamiento de la discontinuidad (m.)	> 2m. (20)	0,6m.-2m. (15)	0,2m.- 0,6m. (10)	0,06m.-0,2m. (8)	< 0,06m. (5)	10	
Persistencia de la discontinuidad	< 1 m. (6)	1-3 m. (4)	3-10 m. (2)	10-20 m. (1)	> 20 m. (0)	2	
Estado de las discontinuidades	Abertura	Nada (6)	< 0,1 mm. (5)	0,1-1,0 mm. (3)	1-5 mm. (1)	> 5 mm. (0)	1
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Ligeramente Rugosa (3)	Ondulada (1)	Suave (0)	3
	Relleno	Ninguno (6)	Relleno duro < 5 mm. (4)	Relleno duro > 5 mm. (2)	Relleno blando < 5 mm. (2)	Relleno blando > 5 mm. (0)	2
	Alteración	Inalterada (6)	Ligeramente alterada (5)	Moderadamente alterada (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	5
	Agua subterránea	Seco (15)	Ligeramente húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)	10
	Valor total RMR						53

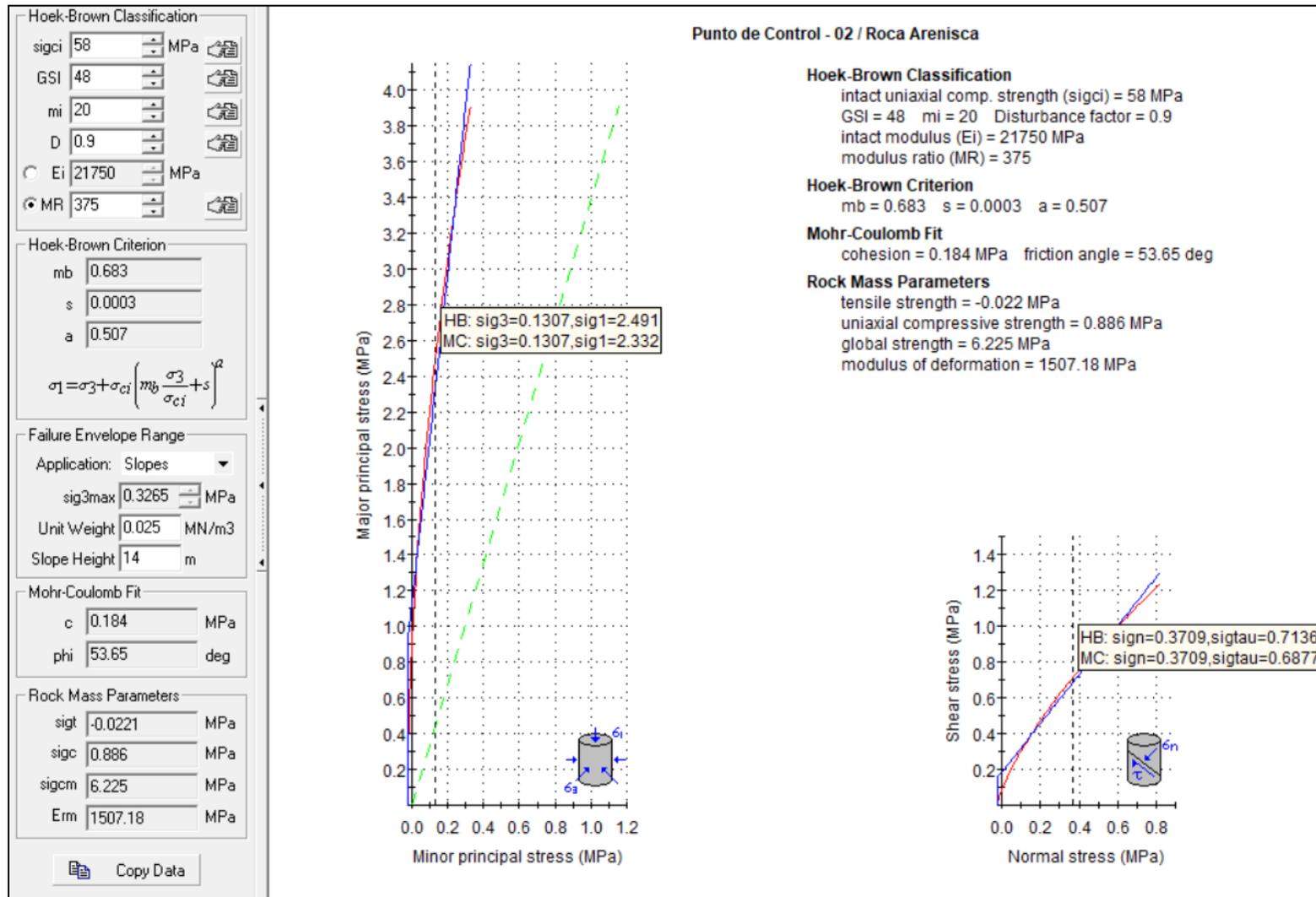


Figura 3.14: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de arenisca de la Fm. Farrat, en el talud PC-02.

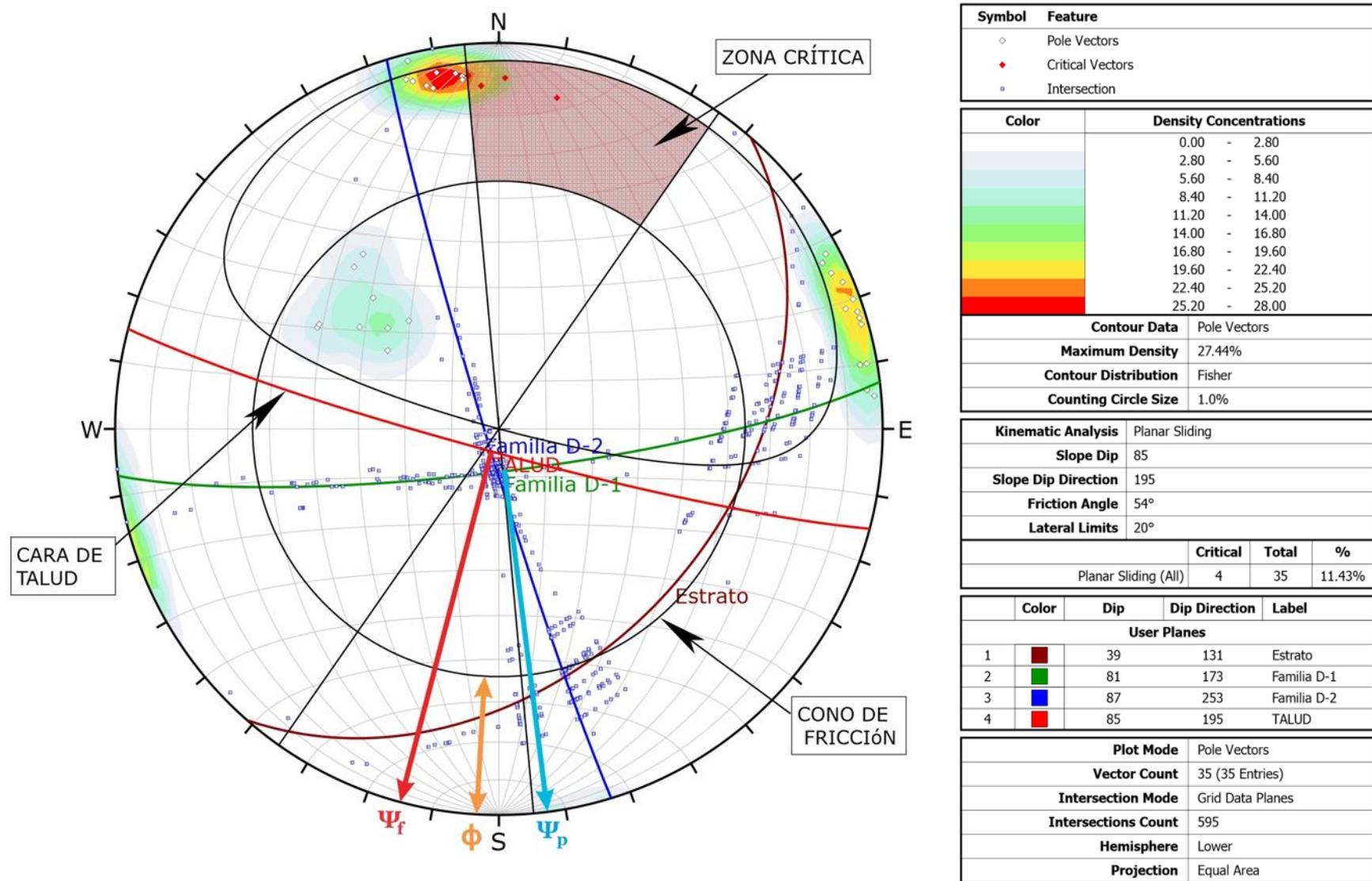


Figura 3.15: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-02, indicando una probabilidad de falla de 11.43 %.

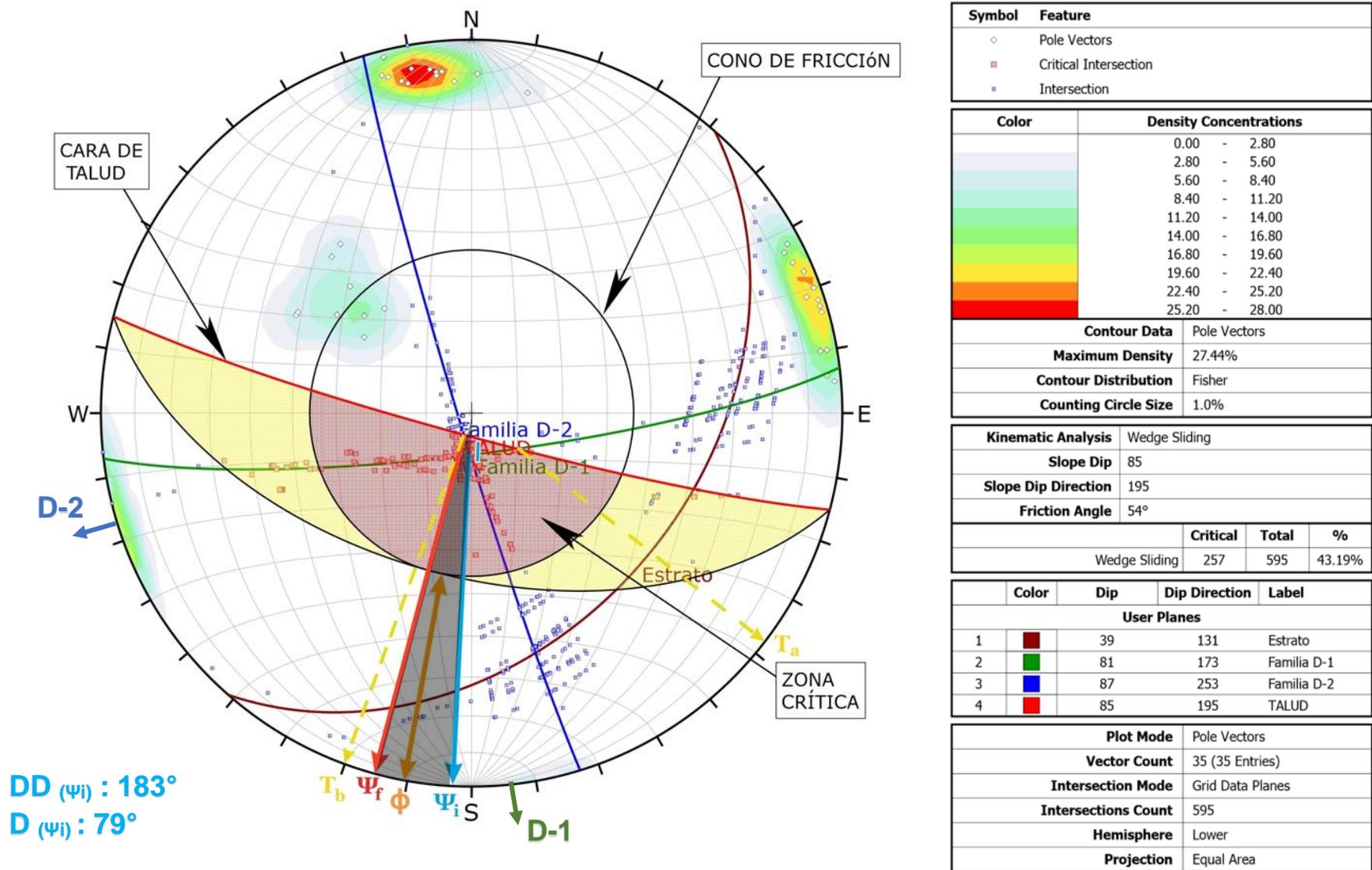


Figura 3.16: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-02, indicando una probabilidad de falla de 43.19 %.

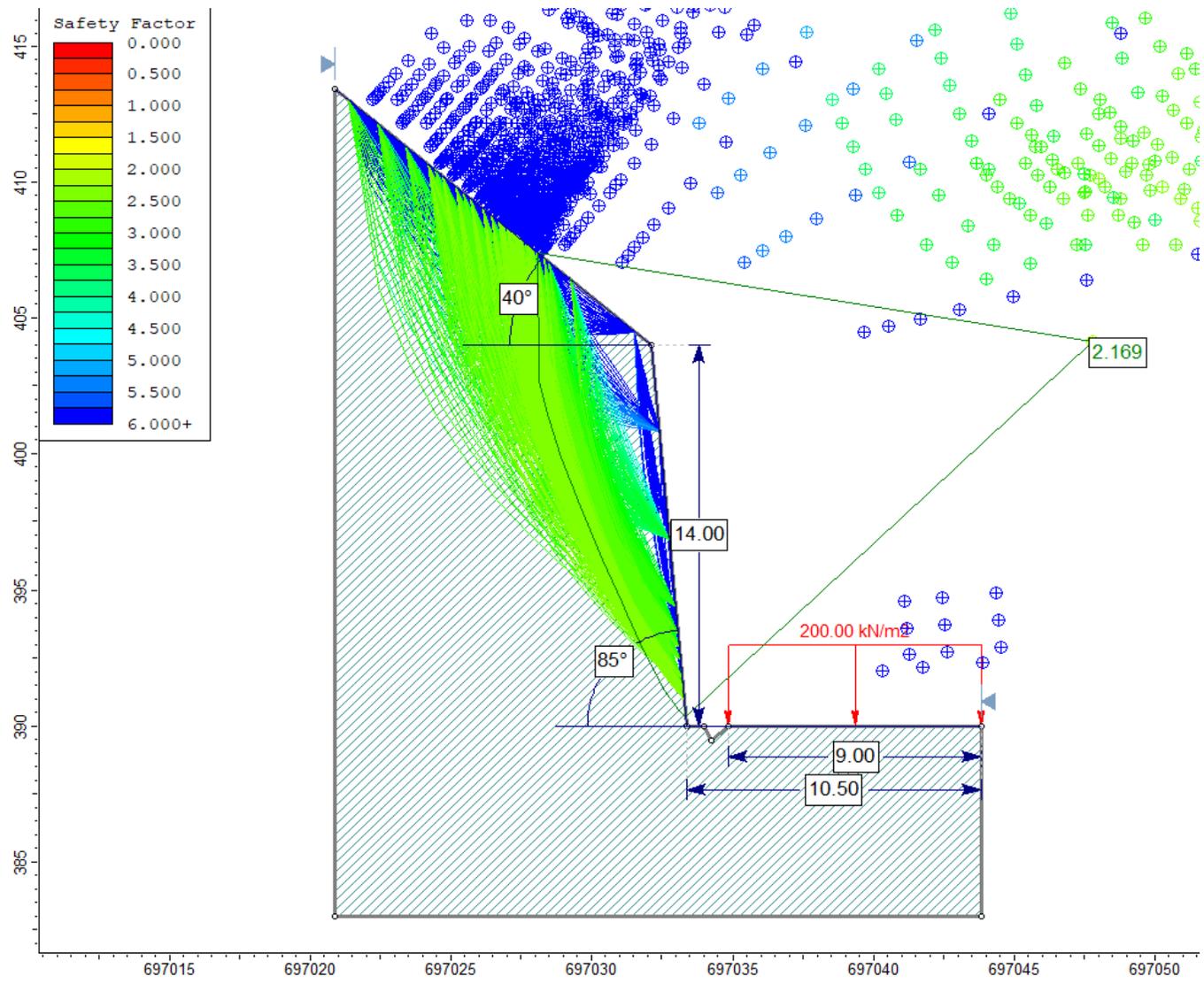


Figura 3.17: Análisis slide del talud PC-02, en Condiciones Normales.

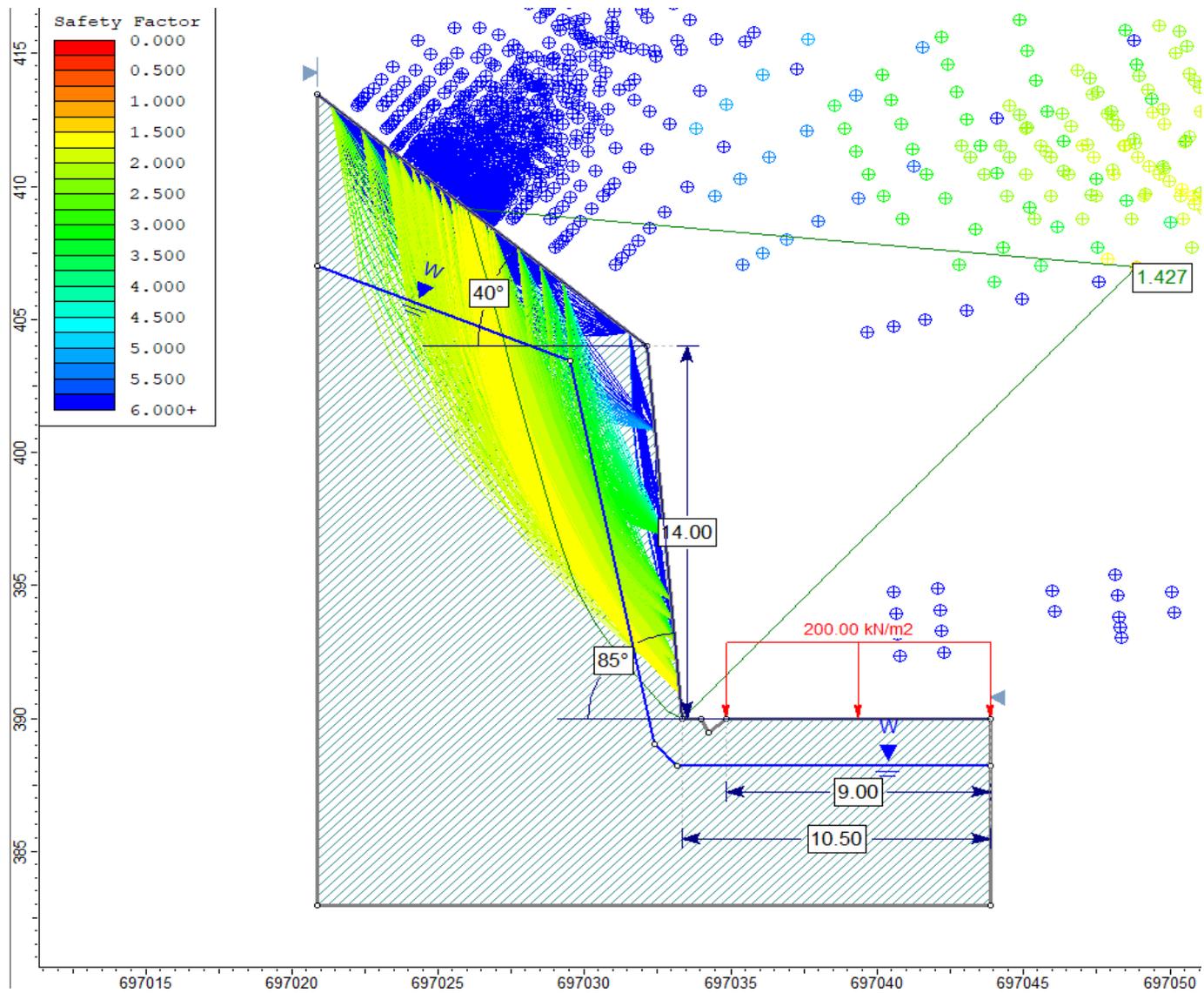


Figura 3.18: Análisis slide del talud PC-02, en condiciones de Saturación Parcial.

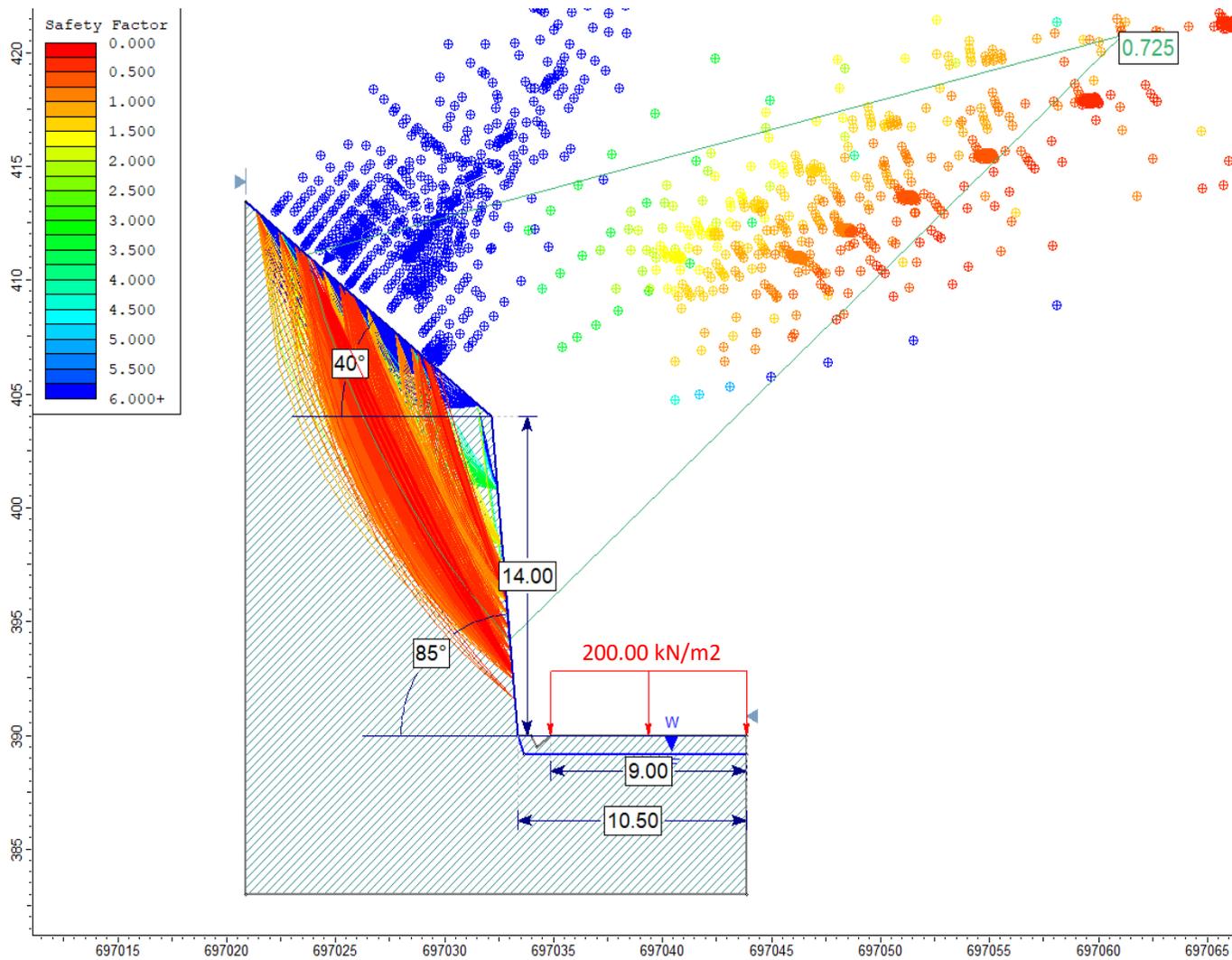


Figura 3.19: Análisis slide del talud PC-02, en condiciones de Saturación Total.

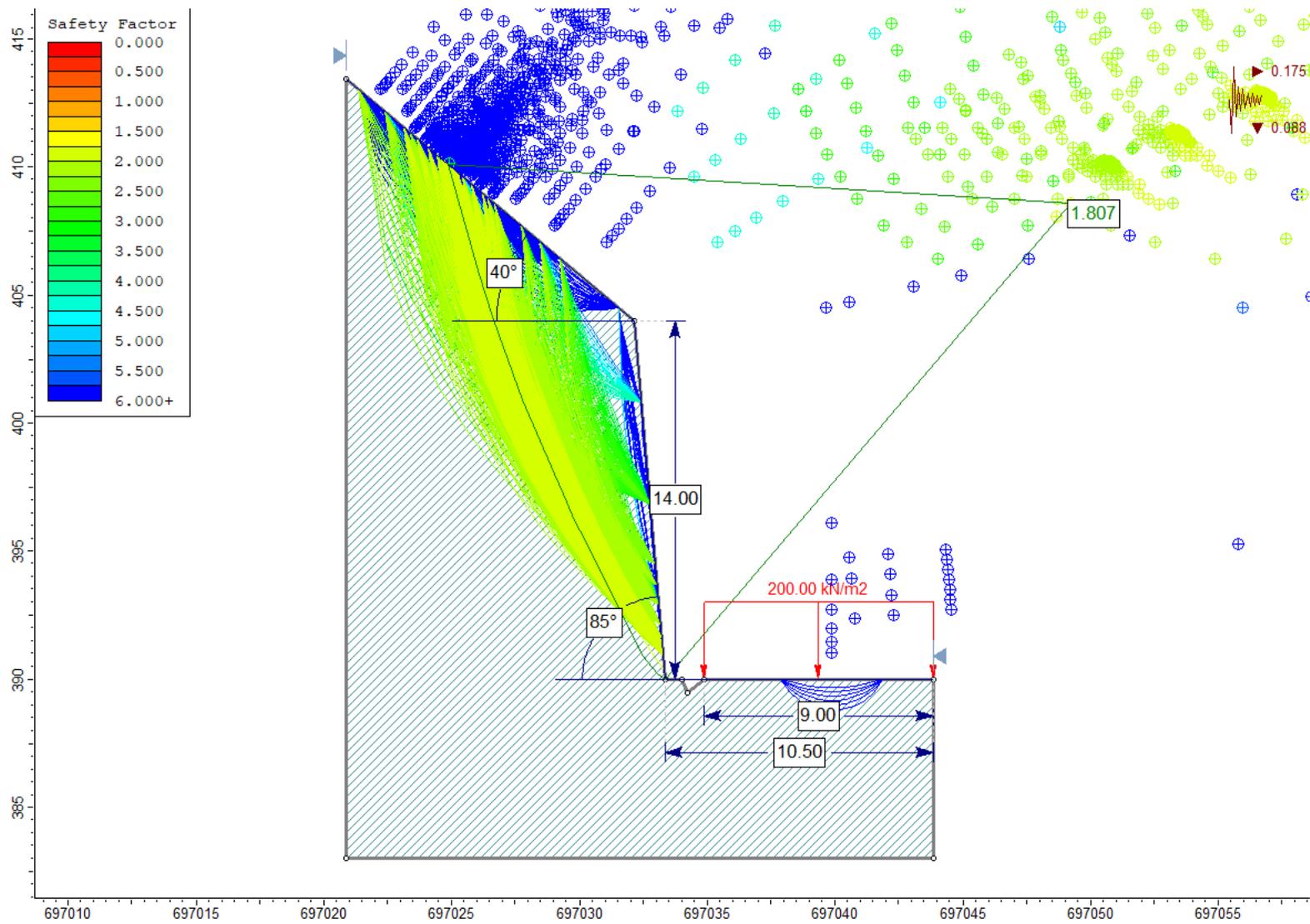


Figura 3.20: Análisis slide del talud PC-02, en condiciones de Sismicidad.

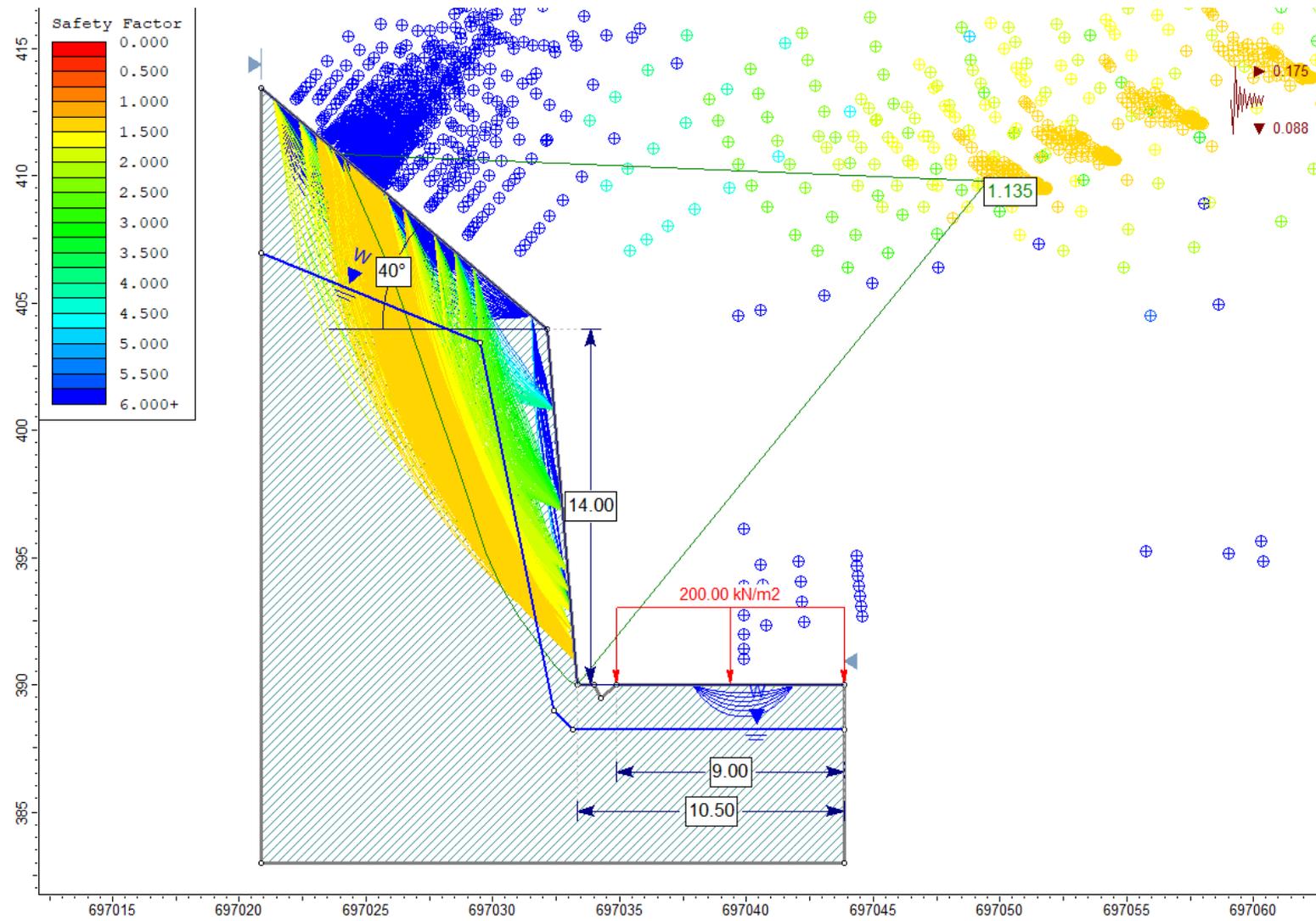


Figura 3.21: Análisis slide del talud PC-02, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.

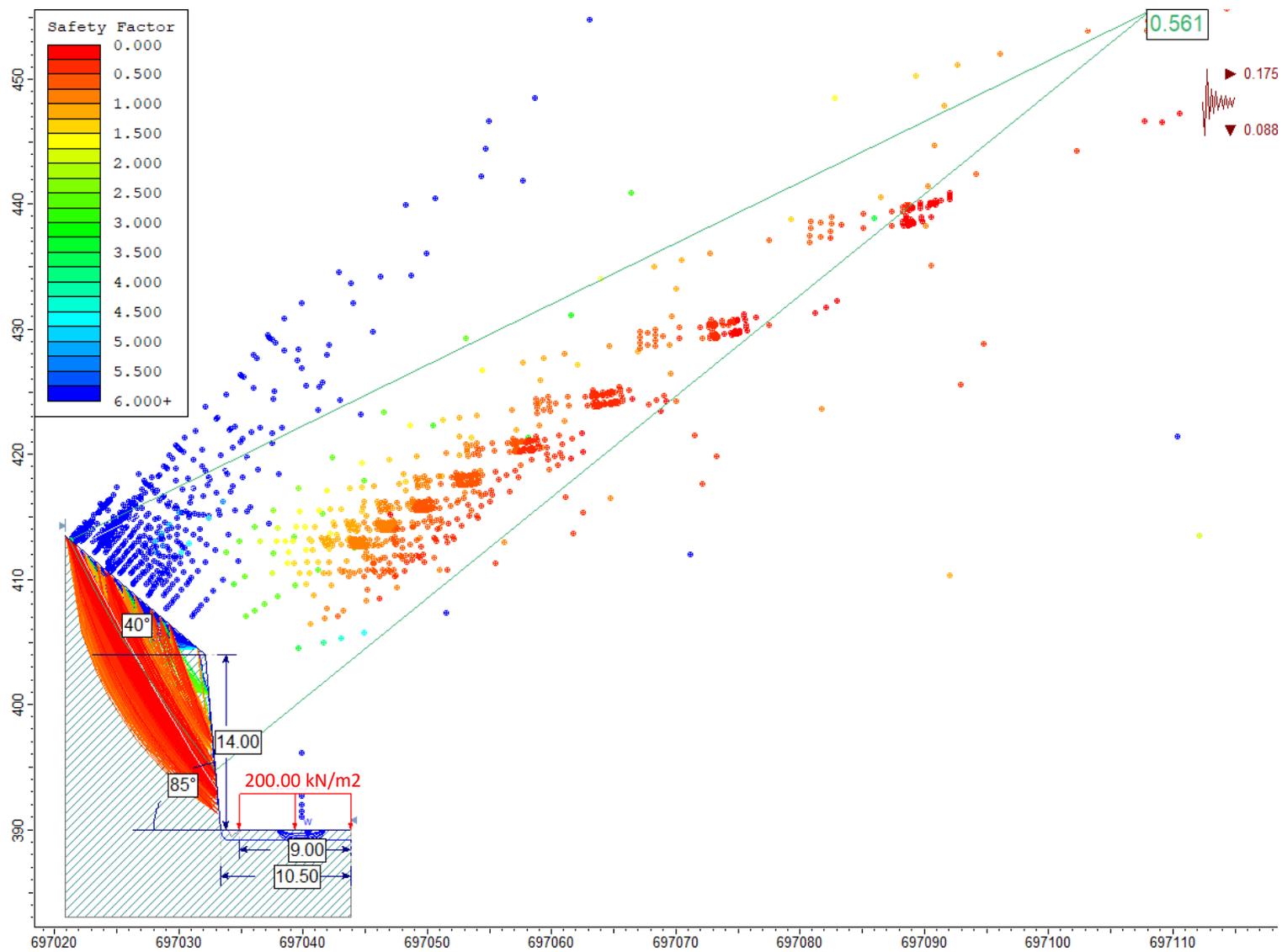


Figura 3.22: Análisis slide del talud PC-02, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.

3.6.4. Punto de control 03 entre progresivas Km. 36+270 al Km. 36+366.

Tabla 3.17: Localización y descripción del talud en el PC-03.

DATA GPS		DESCRIPCIÓN
Datum: WGS 84 Zona: 17S		El talud está conformado por dos tipos de materiales, suelo y roca. El primero, es una capa de depósito coluvio-aluvial, de 1.5m de espesor aproximadamente, caracterizada por presentar cantos, gravas y algunos bloques (todos presentas aristas subangulosas) en matriz de finos con arenas y, se encuentran cubriendo rocas de arenisca calcárea de color rojizo, perteneciente a la Fm. Inca. El macizo rocoso subyacente se caracteriza por presentar un grado alta a completamente meteorizado y fracturamiento alto, otorgándole diversas familias de discontinuidades, cuyas aberturas se encuentran rellenas parcialmente por la matriz del depósito cuaternario. Geométricamente, el talud posee una altura de 15m., una inclinación de 45° y la cabeza tiene una forma circular con un pequeño desnivel, aparentando ser un deslizamiento rotacional de un material homogéneo.
Este (m.)	697415	
Norte (m.)	9200707	
Cota (m.s.n.m.)	429	



Foto 3.29: Depósito coluvio-aluvial cubriendo afloramiento de areniscas calcáreas, entre el Km.36+270 y Km. 36+366 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.
Coordenadas: E 697415; N 9200707; Cota= 429 m.s.n.m.

Tabla 3.18: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-03.

Litología/ Formación	MACIZO ROCOSO			ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES		
	Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	Tipo	Dip	Dip Direction
Areniscas calcáreas (Fm. Inca) y depósito coluvio-aluvial (Cuaternario)	1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-regular	Estrato	-	-
	2=Lev Met	2=Med	2=Bloq-irregular			
	3=Mod	3=Bajo	3=Bloq y capas	GEOMETRÍA DEL TALUD		
	4=Alt		4=Frac-Intenso	Altura (m.)	15	
	5=Comp Met			Pie (m.)	10	
	6=Suelo			Dirección	Talud	Cabeza
				Dip	45°	32°
				Dip Direction	140°	140°
		4-5	1	4 / 26		

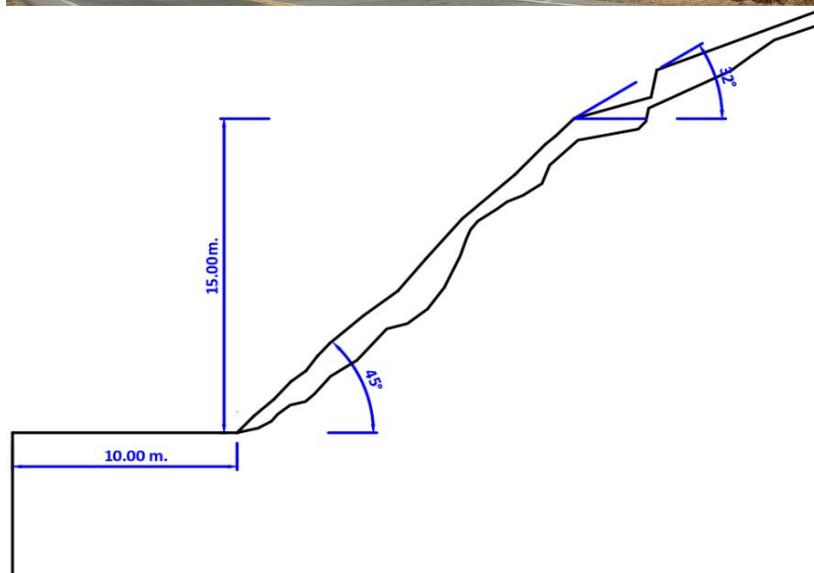
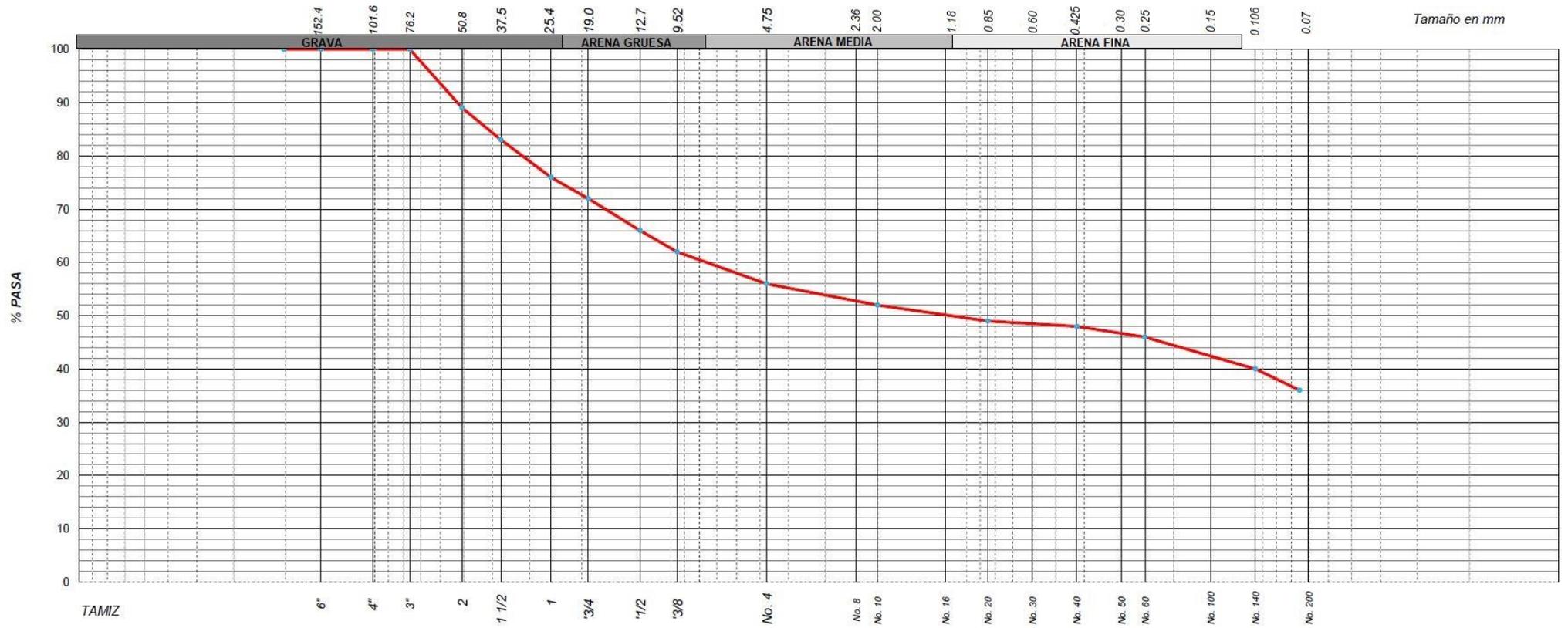


Foto 3.30: Vista perfil del talud PC-03, entre el Km.36+270 y Km. 36+366 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

La tabla 3.19, muestra los valores obtenidos en el ensayo de granulometría, señalando la masa retenida y la que pasa; mientras que, la gráfica 3.2 muestra la curva granulométrica representando de forma esquemática los resultados de dicho ensayo (ver Anexos). De acuerdo a ello, el laboratorio mediante clasificación S.U.C.S., denomina al material como GM-GC (Grava con finos y arena), lo cual corrobora el material granular representativo que constituye al depósito coluvio-aluvial. Cabe señalar que las partículas mayores a 76.2mm, constituyen un 15% de total del material, con un tamaño máximo de 80 cm.

Tabla 3.19: Datos de ensayo granulométrico de trinchera para el talud PC-03.

Peso seco inicial		10044			
Tamaño tamiz	Masa Retenida	Masa Retenida acumulada	% Retenido	% Retenido Acumulada	% Pasa
3 in		0.0			100.00
2 in	1094.3	1094.3	10.8951	10.90	89.10
1 1/2 in	576.1	1670.4	5.7358	16.63	83.37
1 in	742.8	2413.2	7.3955	24.03	75.97
3/4 in	368.3	2781.5	3.6669	27.69	72.31
1/2 in	683.1	3464.6	6.8011	34.49	65.51
3/8 in	313	3777.6	3.1163	37.61	62.39
No. 4	660.40	4438.0	6.5751	44.19	55.81
No. 8		4438.0			55.81
No. 10	398.1	4836.1	3.9636	48.00	51.85
No. 16		4836.1			51.85
No. 20	299.31	5135.4	2.9800	51.00	48.87
No. 30		5135.4			48.87
No. 40	99.45	5234.9	0.9901	52.00	47.88
No. 50		5234.9			47.88
No. 60	199.52	5434.4	1.9865	54.00	45.89
No. 100		5434.4			45.89
No. 140	601.15	6035.5	5.9852	60.00	39.91
No. 200	398.32	6433.9	3.9658	64.00	35.94
Fondo	3610.15	10044.0	35.9433		0
TOTAL	10044		100		



Gráfica 3.2: Curva granulométrica en escala logarítmica de trinchera para el talud PC-03, suelo de depósito coluvio-aluvial.

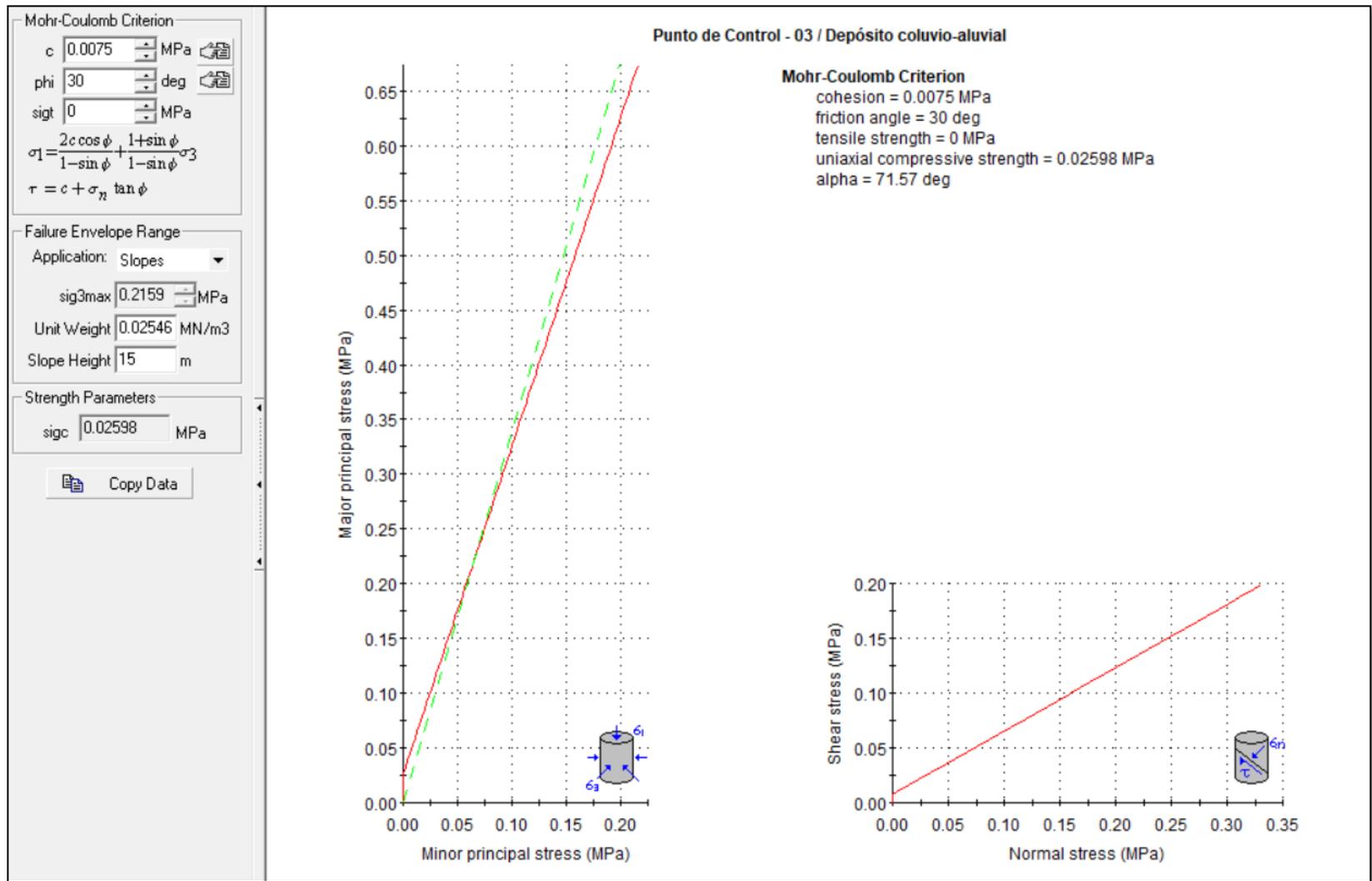


Figura 3.23: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de suelo en depósito coluvio-aluvial, en el talud PC-03.

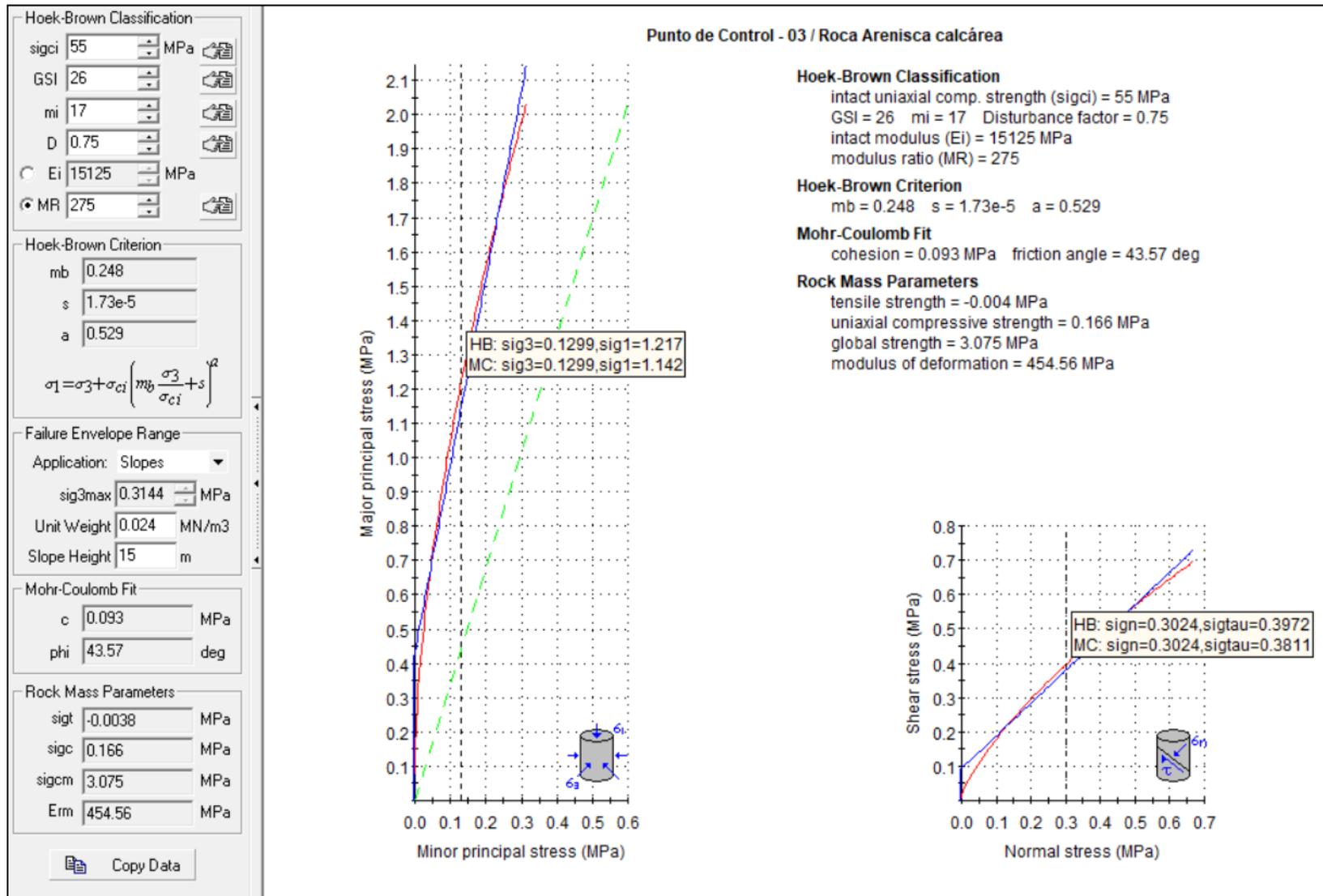


Figura 3.24: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de roca arenisca calcárea de la Fm. Inca, en el talud PC-03.

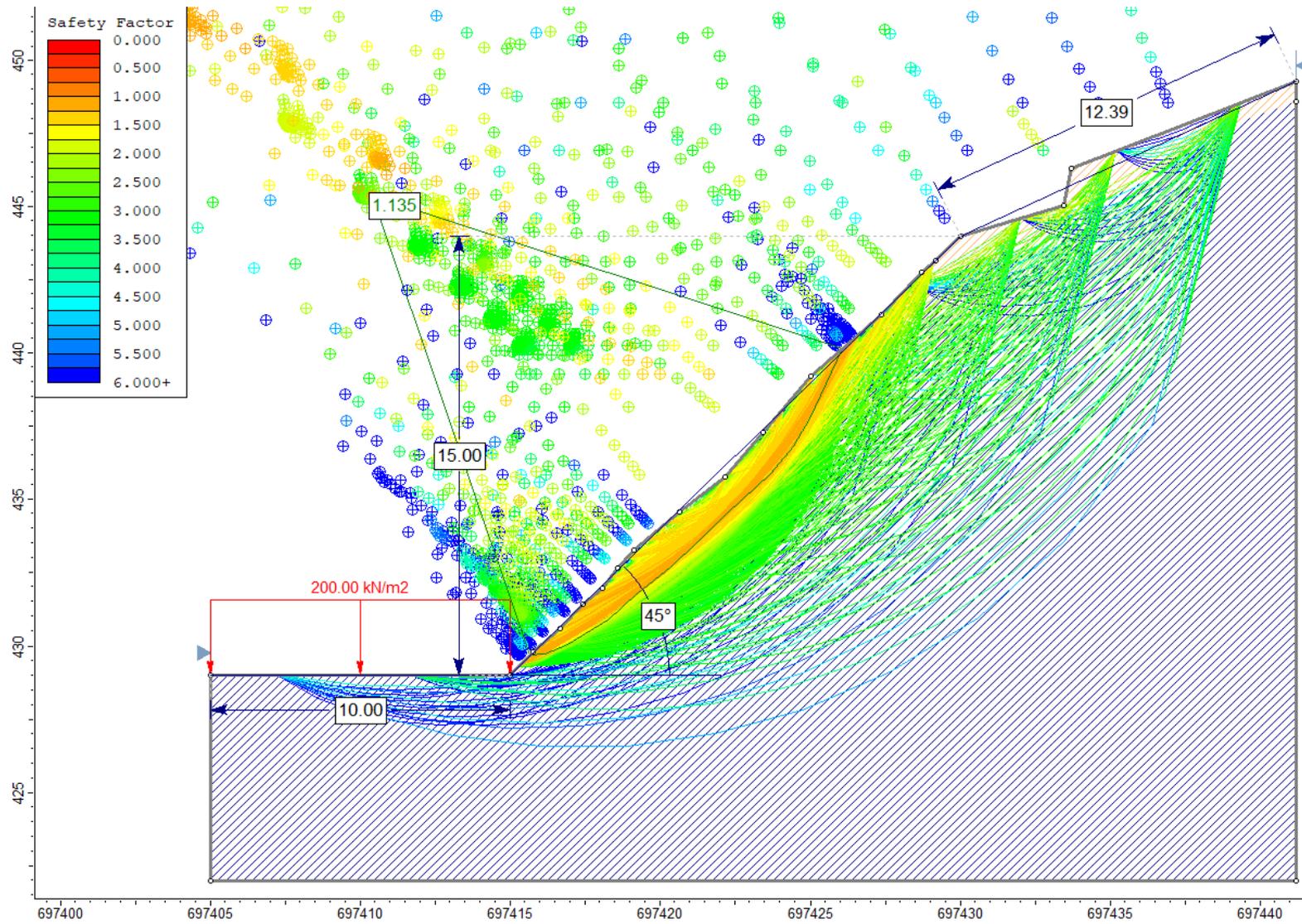


Figura 3.25: Análisis slide del talud PC-03, en Condiciones Normales.

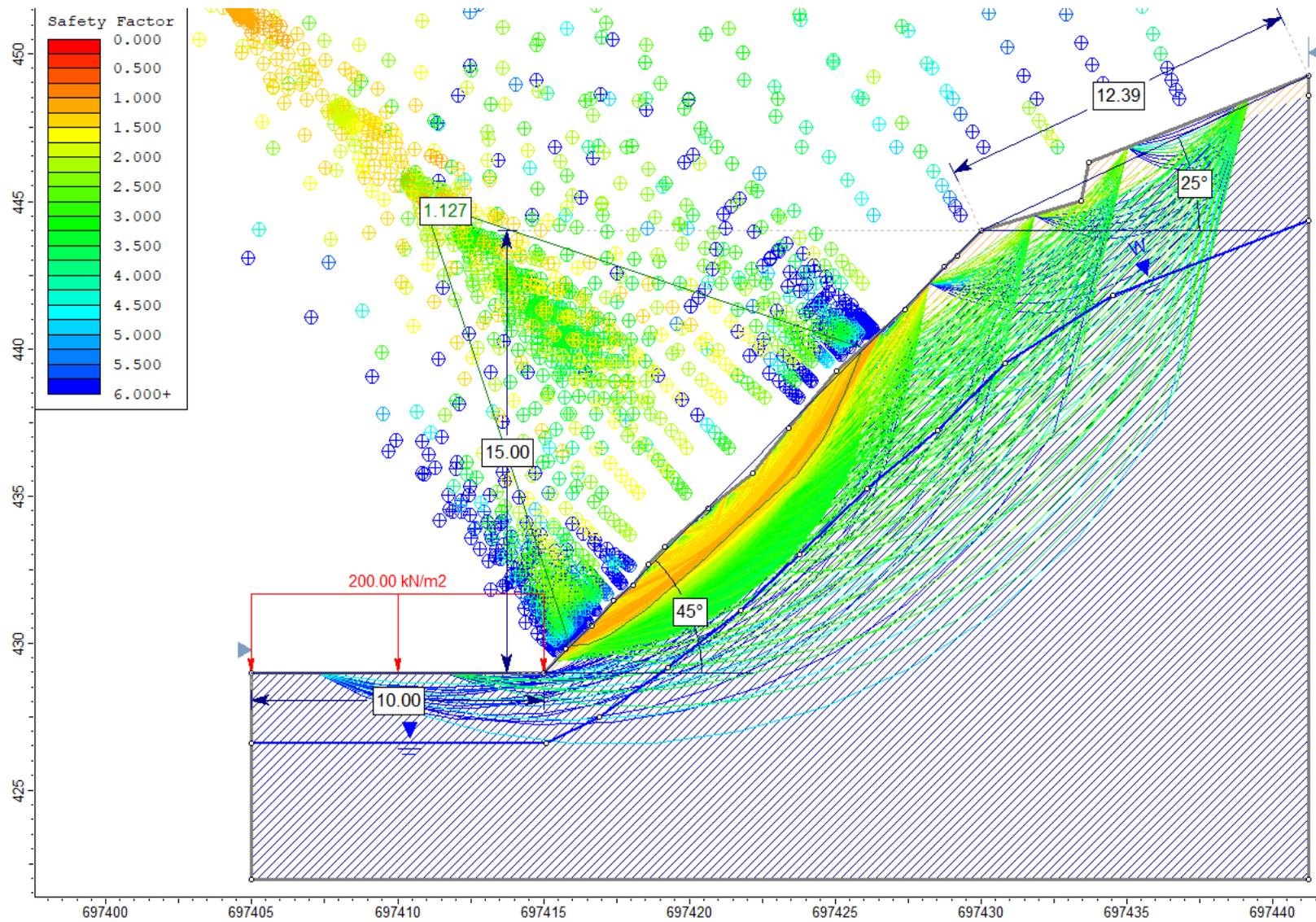


Figura 3.26: Análisis slide del talud PC-03, en condiciones de Saturación Parcial.

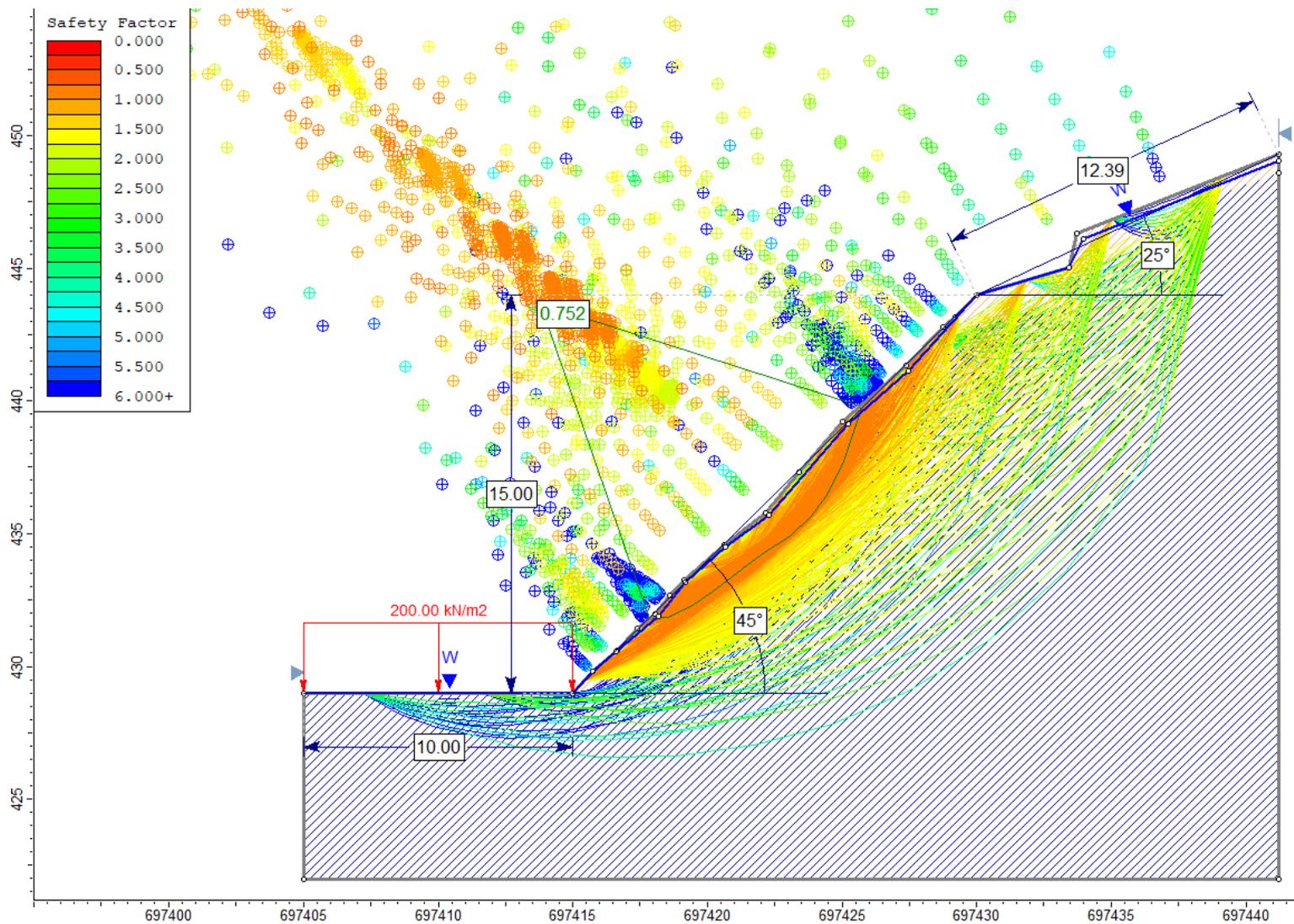


Figura 3.27: Análisis slide del talud PC-03, en condiciones de Saturación Total.

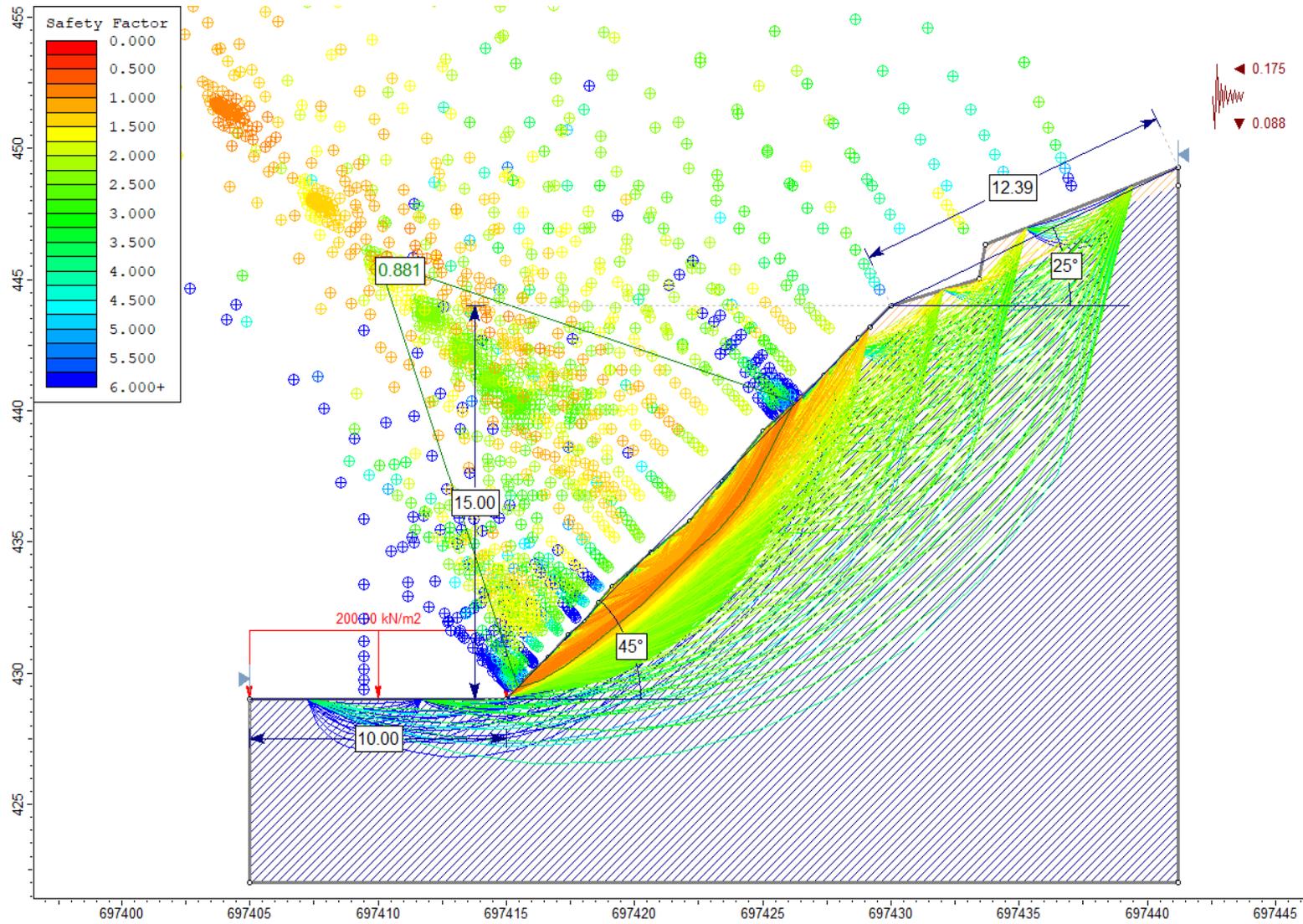


Figura 3.28: Análisis slide del talud PC-03, en condiciones de Sismicidad.

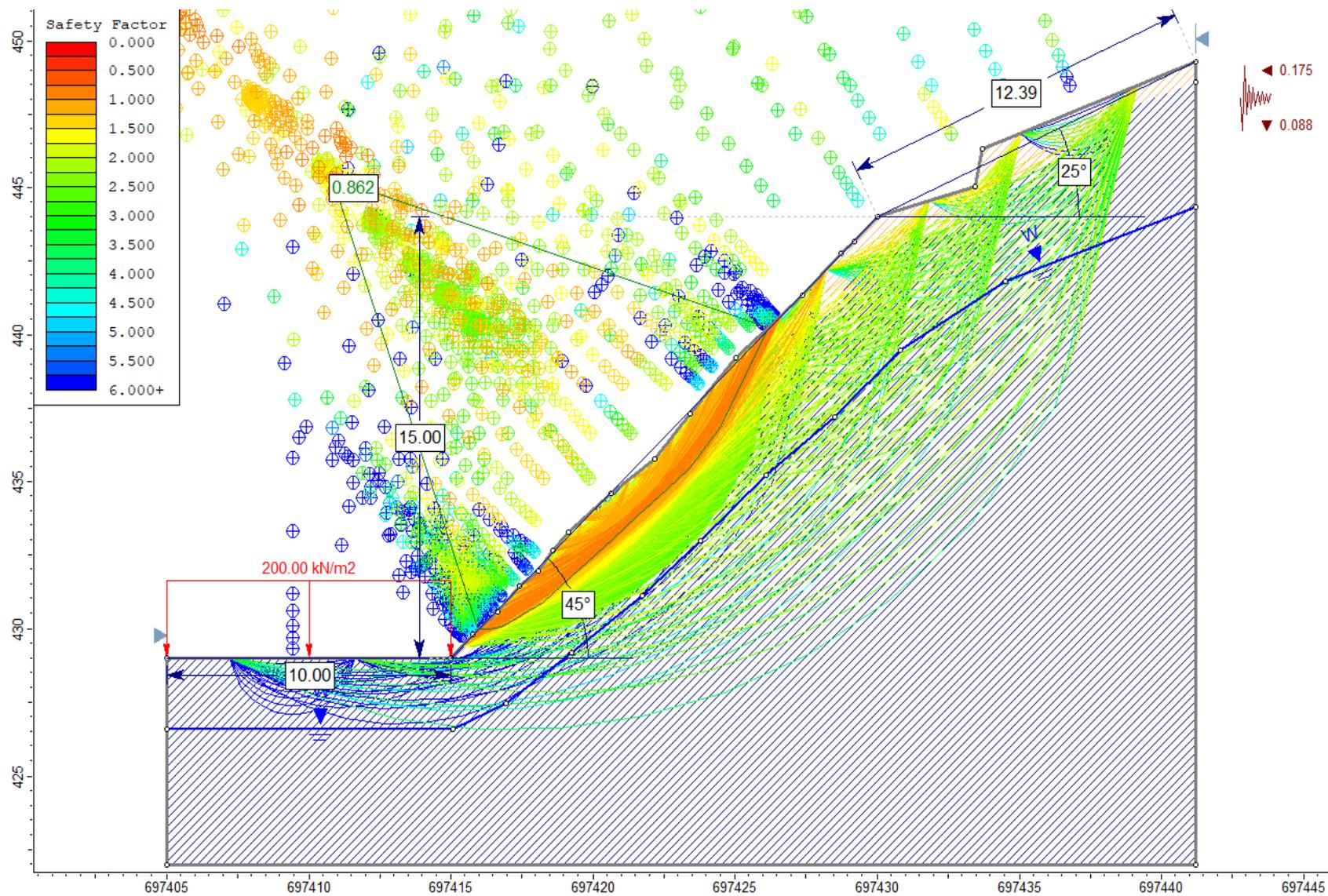


Figura 3.29: Análisis slide del talud PC-03, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.

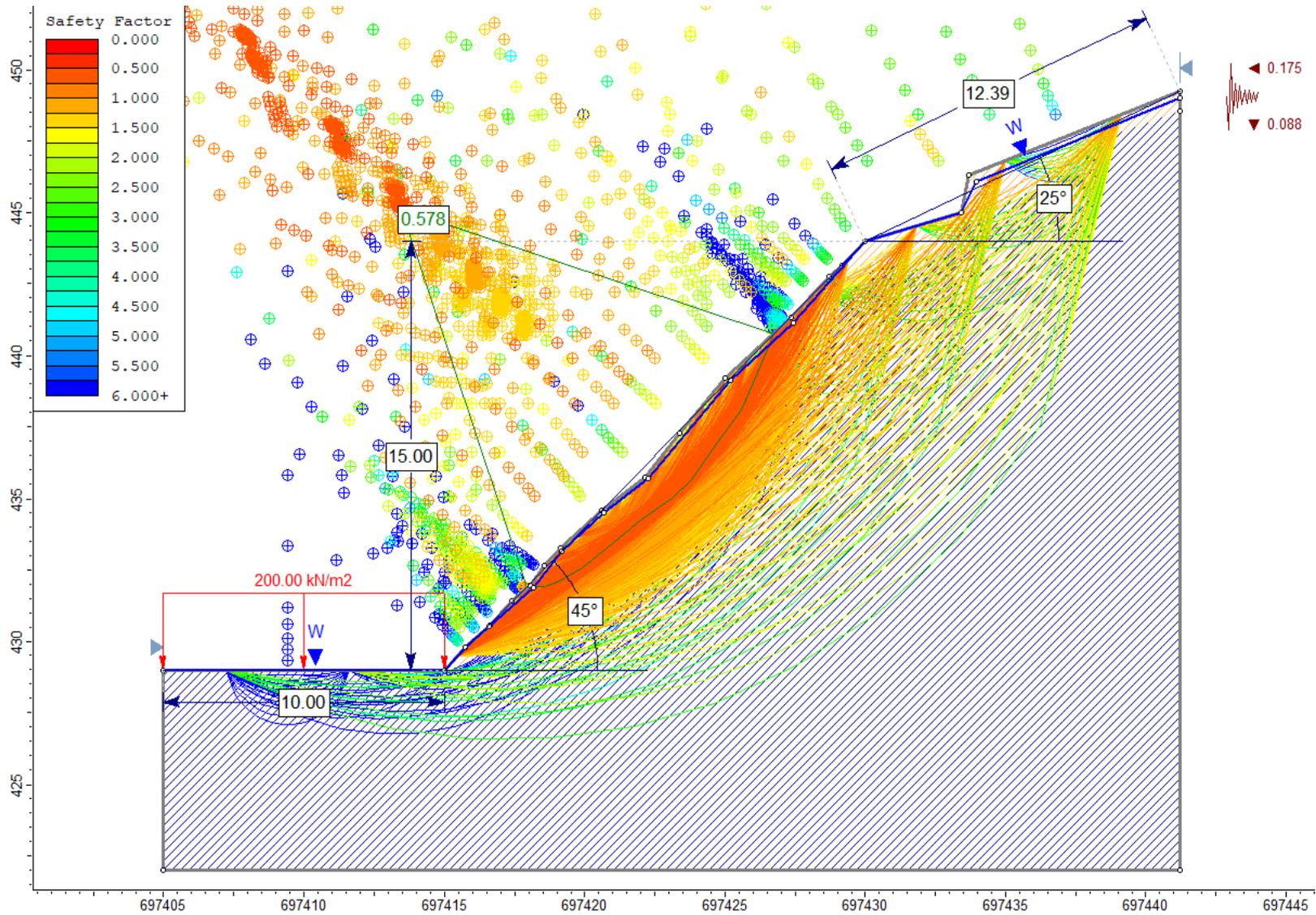


Figura 3.30: Análisis slide del talud PC-03, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.

3.6.5. Punto de control 04 entre progresivas km. 36+366 al km. 36+658.

Tabla 3.20: Localización y descripción del talud en el PC-04.

DATA GPS		DESCRIPCIÓN
Datum: WGS 84 Zona: 17S		El talud se compone litológicamente por rocas de arenisca calcárea, perteneciente a la Fm. Inca. El macizo rocoso se caracteriza por presentar un grado de meteorización alta y fracturamiento alto (se evidencia roca triturada), principalmente, en la parte media y alta del talud. Ligeramente se puede identificar la estratificación cuyo espesor oscila entre 0.20m. y 0.44m., con aberturas entre estratos >5mm. y rellenos de roca triturada. Geométricamente, el talud posee una altura de 12m., una inclinación de 80° y la cabeza continua a la geoforma natural del terreno. Dadas las condiciones señaladas del talud, la estabilidad del mismo puede ser detonada por movimientos sísmicos y/o lluvias que saturan el material.
Este (m.)	697577	
Norte (m.)	9200763	
Cota (m.s.n.m.)	429	



Foto 3.31: Afloramiento de areniscas calcáreas, entre el Km.36+366 y Km. 36+658 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.
Coordenadas: E 697577; N 9200763; Cota= 429 m.s.n.m.

Tabla 3.21: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-04.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES		
Litología/ Formación	Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	Tipo	Dip	Dip Direction
Areniscas calcáreas / Fm. Inca	1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-regular	Estrato	62°	162°
	2=Lev Met	2=Med	2=Bloq-irregular			
	3=Mod	3=Bajo	3=Bloq y capas	GEOMETRÍA DEL TALUD		
	4=Alt		4=Frac-Intenso	Altura (m.)	12	
	5=Comp Met			Pie (m.)	10	
	6=Suelo			Dirección	Talud	Cabeza
			Dip	80°	35°	
	4	1	4 / 27	Dip Direction	140°	140°

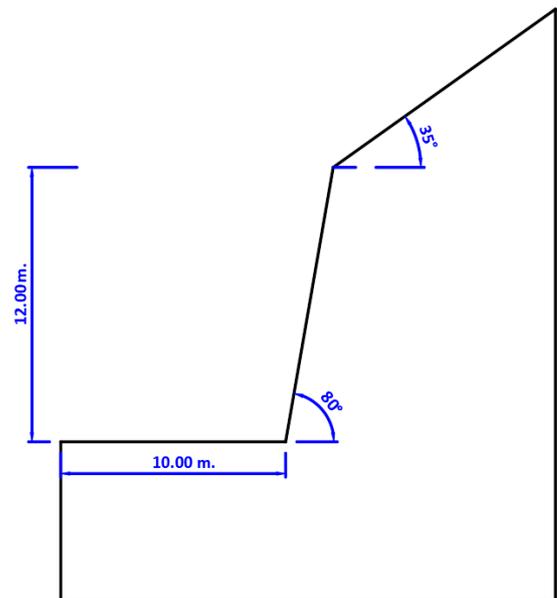


Foto 3.32: Vista perfil del talud PC-04, entre el Km.36+366 y Km. 36+658 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

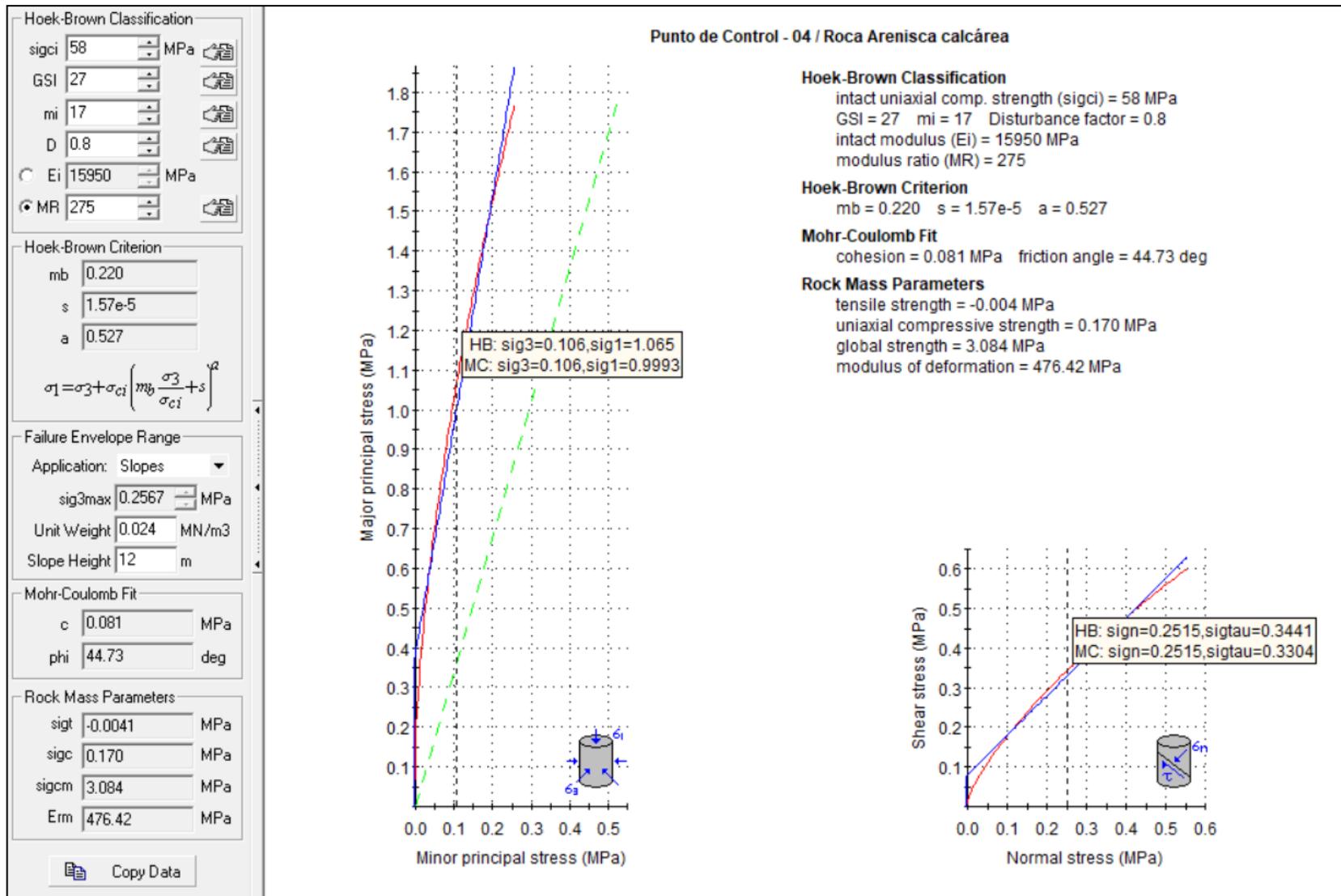


Figura 3.31: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de roca arenisca calcárea de la Fm. Inca, en el talud PC-04.

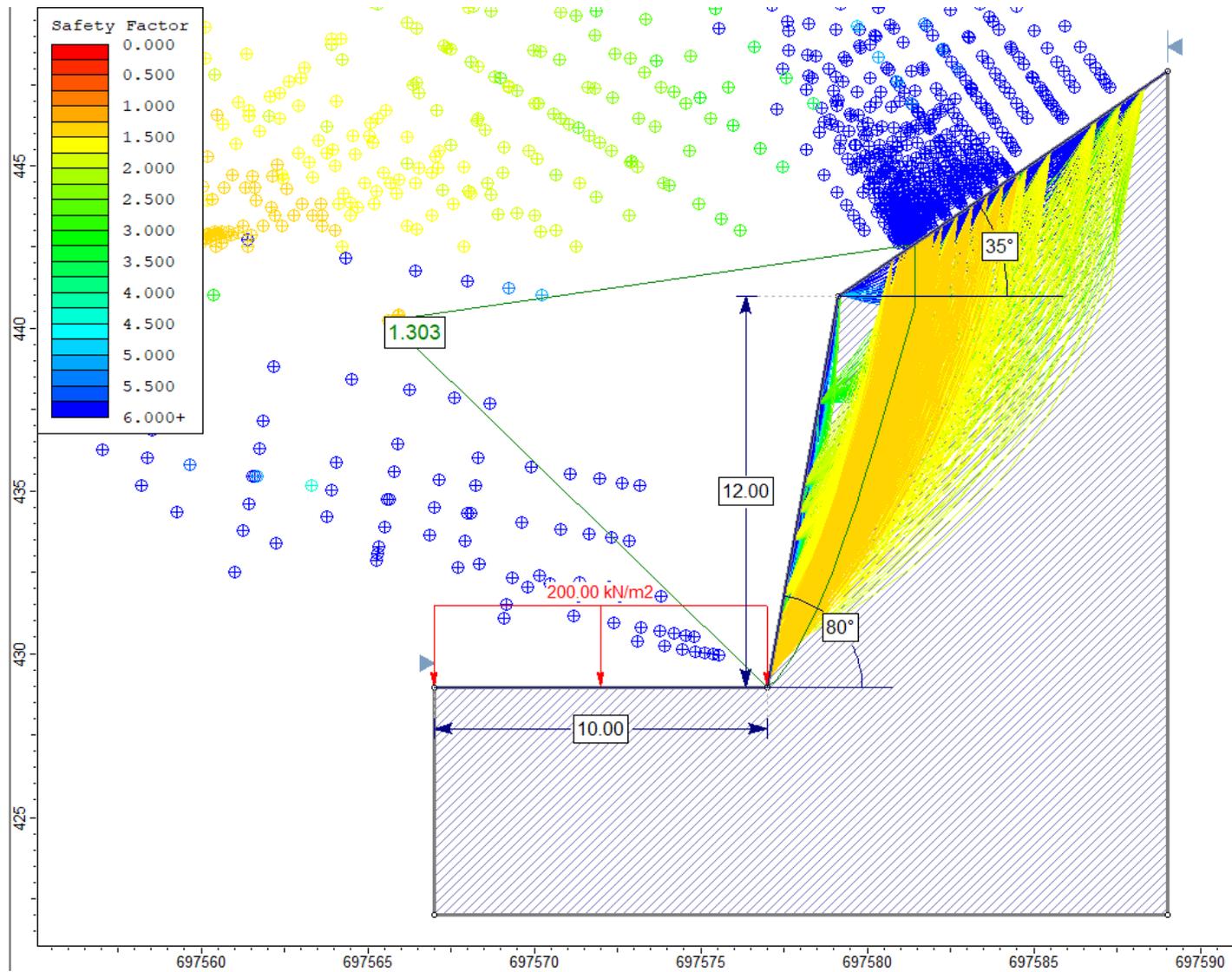


Figura 3.32: Análisis slide del talud PC-04, en Condiciones Normales.

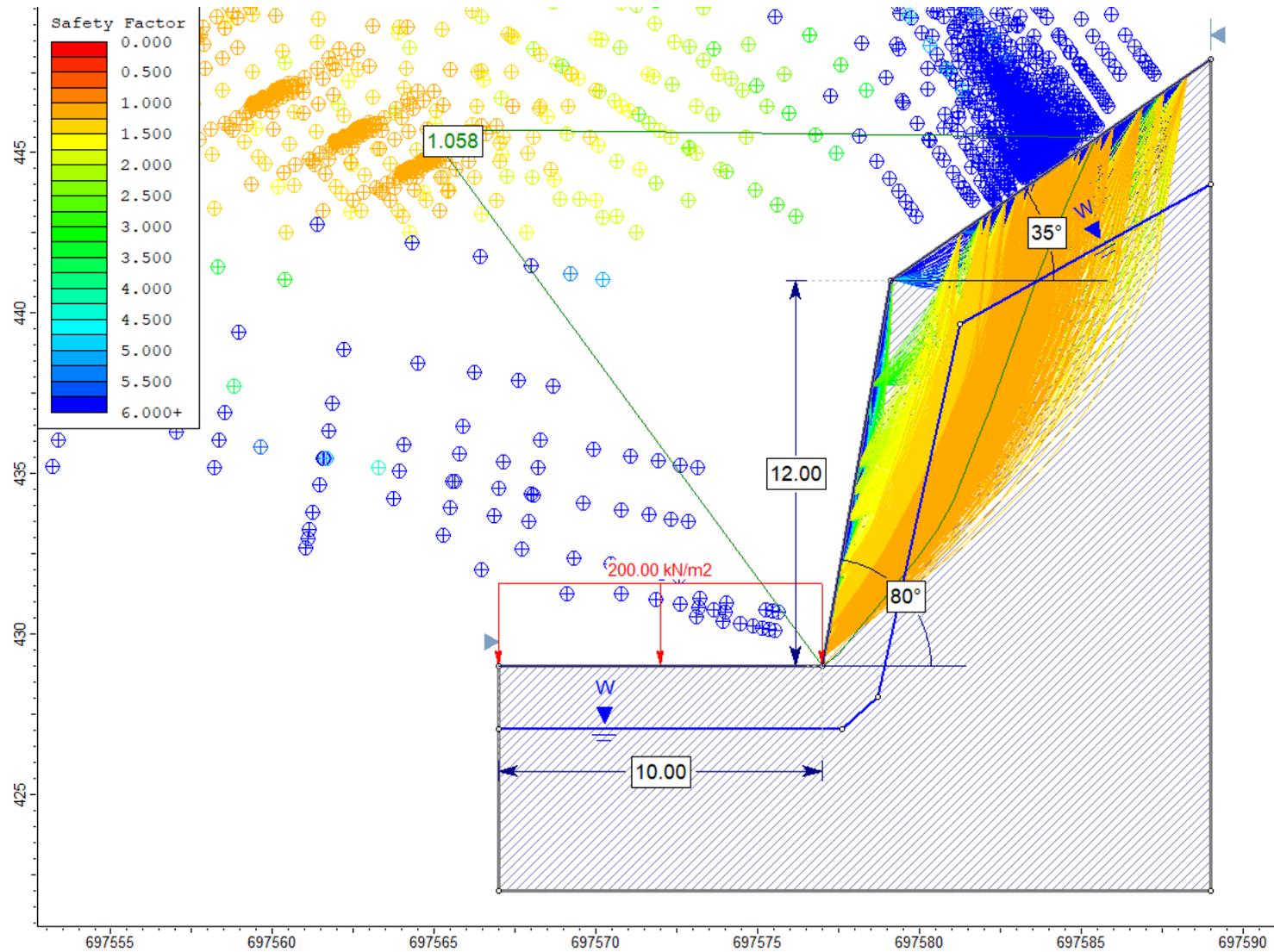


Figura 3.33: Análisis slide del talud PC-04, en condiciones de Saturación Parcial.

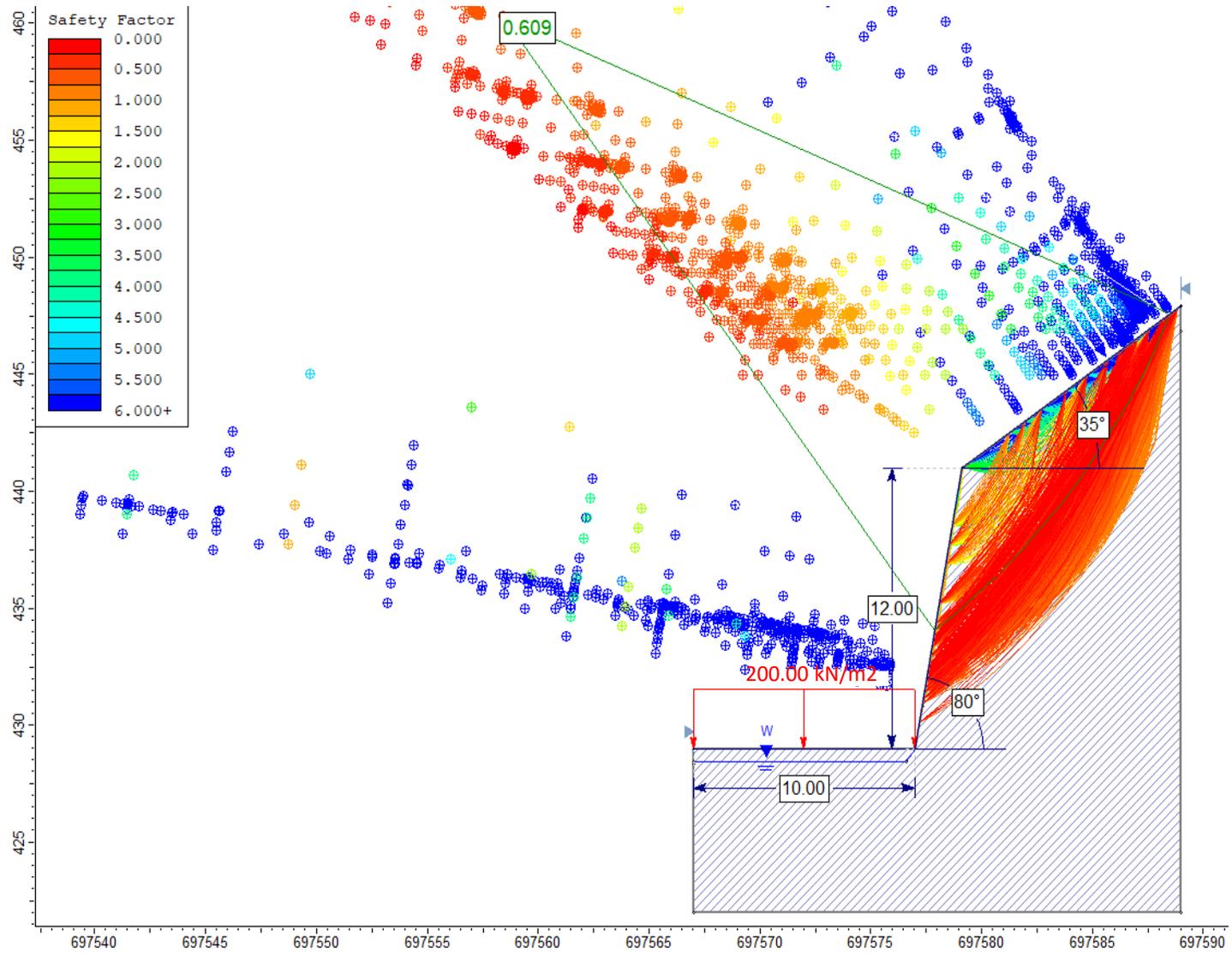


Figura 3.34: Análisis slide del talud PC-04, en condiciones de Saturación Total.

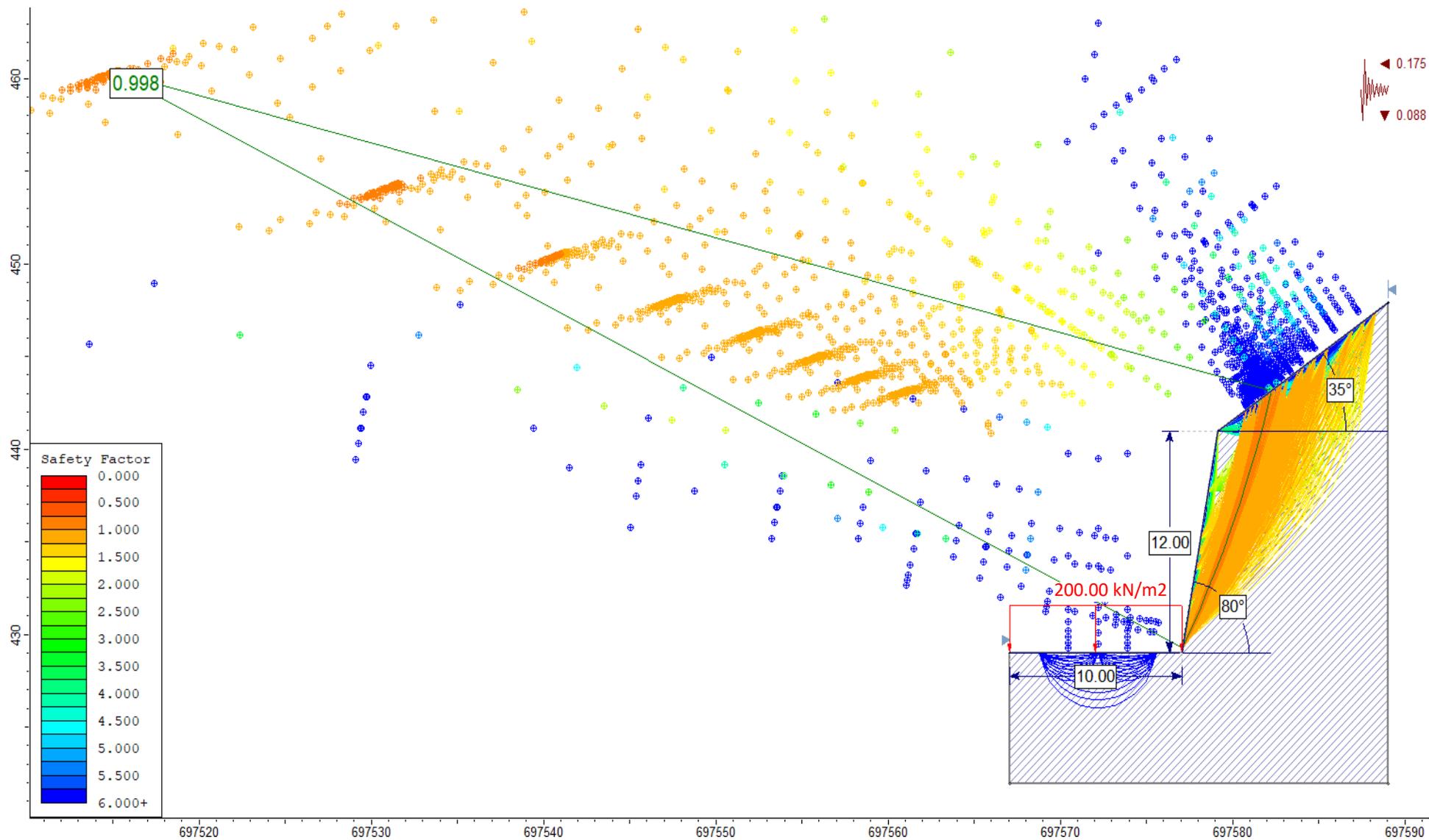


Figura 3.35: Análisis slide del talud PC-04, en condiciones de Sismicidad.

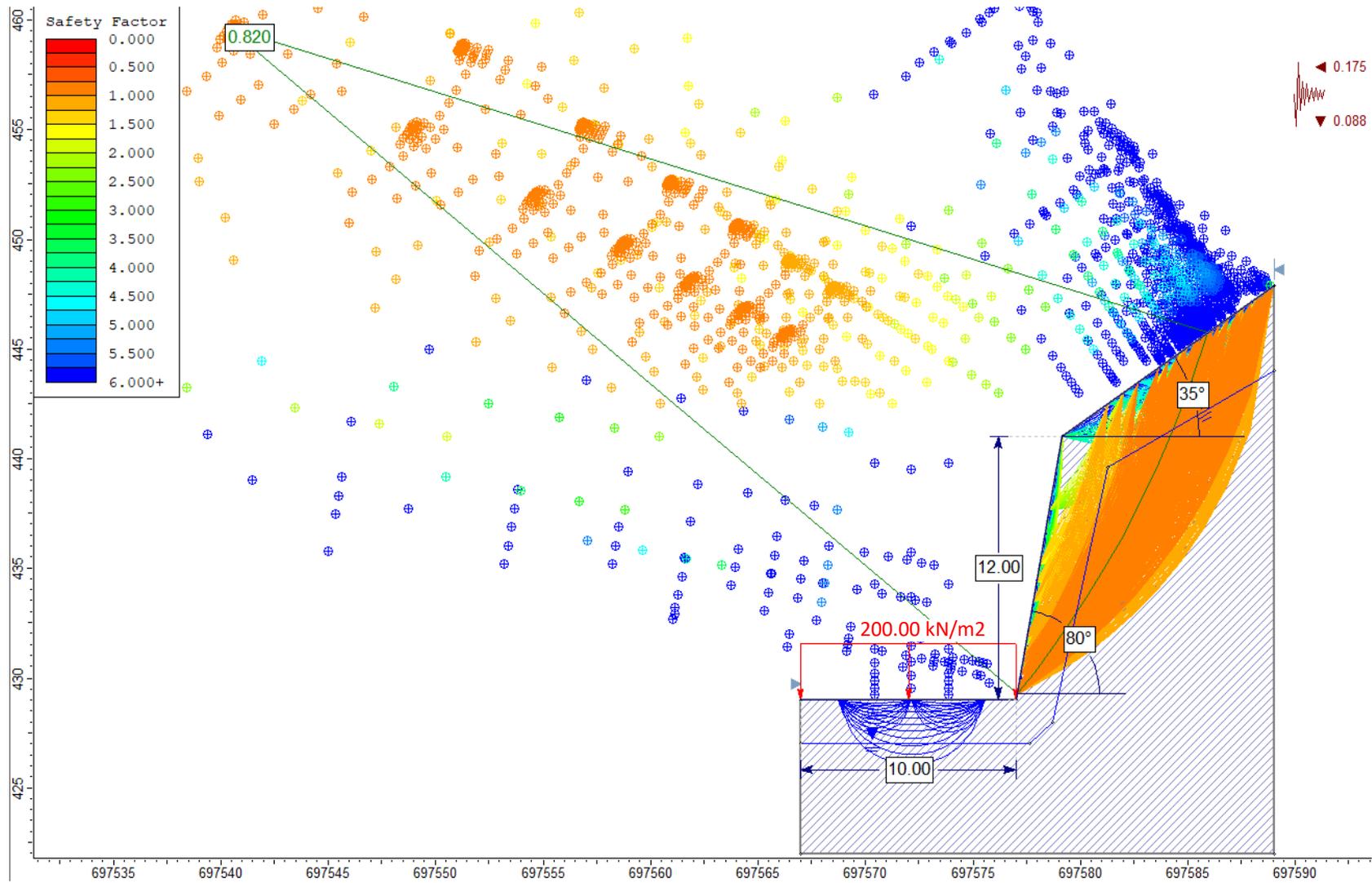


Figura 3.36: Análisis slide del talud PC-04, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.

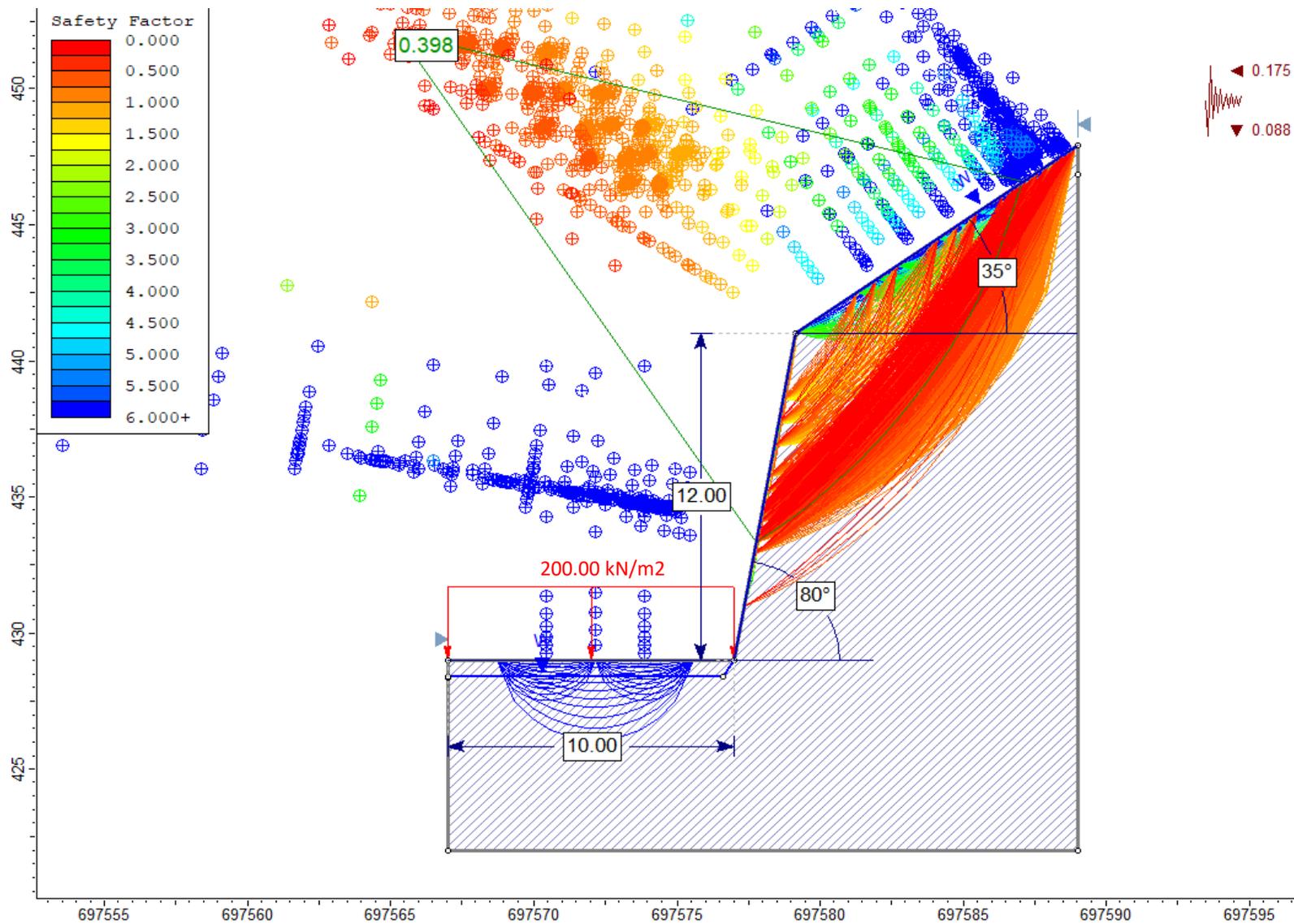


Figura 3.37: Análisis slide del talud PC-04, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.

3.6.6. Punto de control 05 entre progresivas Km. 38+383 al Km. 38+471.

Tabla 3.22: Localización y descripción del talud en el PC-05.

DATA GPS		DESCRIPCIÓN
Datum: WGS 84 Zona: 17S		El talud está conformado por rocas de limolita ferruginosa, perteneciente a la Fm. Inca. El macizo rocoso se caracteriza por presentar una meteorización moderada a alta (resaltando la presencia de pátinas de óxidos en la superficie de las discontinuidades) y grado de fracturamiento alto. Geométricamente, el talud posee una altura de 10m., una inclinación de 85° y la cabeza continua a la geoforma natural del terreno. Se identifica la estratificación con su naturaleza fisible y adherente entre sus muy delgadas capas buzando subhorizontalmente; sin embargo, las otras diaclasas generadas por el fracturamiento, seccionan esas delgadas capas y buzan hacia el talud pudiendo deslizarse entre sus superficies pulidas. Estas discontinuidades alcanzan hasta 11 mm. de abertura, facilitando la acción desestabilizante del talud ante movimientos sísmicos y/o de saturación por precipitación pluvial.
Este (m.)	698988	
Norte (m.)	9201298	
Cota (m.s.n.m.)	428	



Foto 3.33: Afloramiento limolita ferruginosas, entre el Km.38+383 y Km. 38+471 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca. Coordenadas: E 698988; N 9201298; Cota= 428 m.s.n.m.

Tabla 3.23: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-05.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES		
Litología/ Formación	Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	Tipo	Dip	Dip Direction
Limolitas ferruginosas / Fm. Inca	1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-regular	Estrato	45°	182°
	2=Lev Met	2=Med	2=Bloq-irregular			
	3=Mod	3=Bajo	3=Bloq y capas	GEOMETRÍA DEL TALUD		
	4=Alt		4=Frac-Intenso	Altura (m.)	10	
	5=Comp Met			Pie (m.)	10	
	6=Suelo			Dirección	Talud	Cabeza
			Dip	85°	45°	
	4	1	3 / 32	Dip Direction	235°	235°

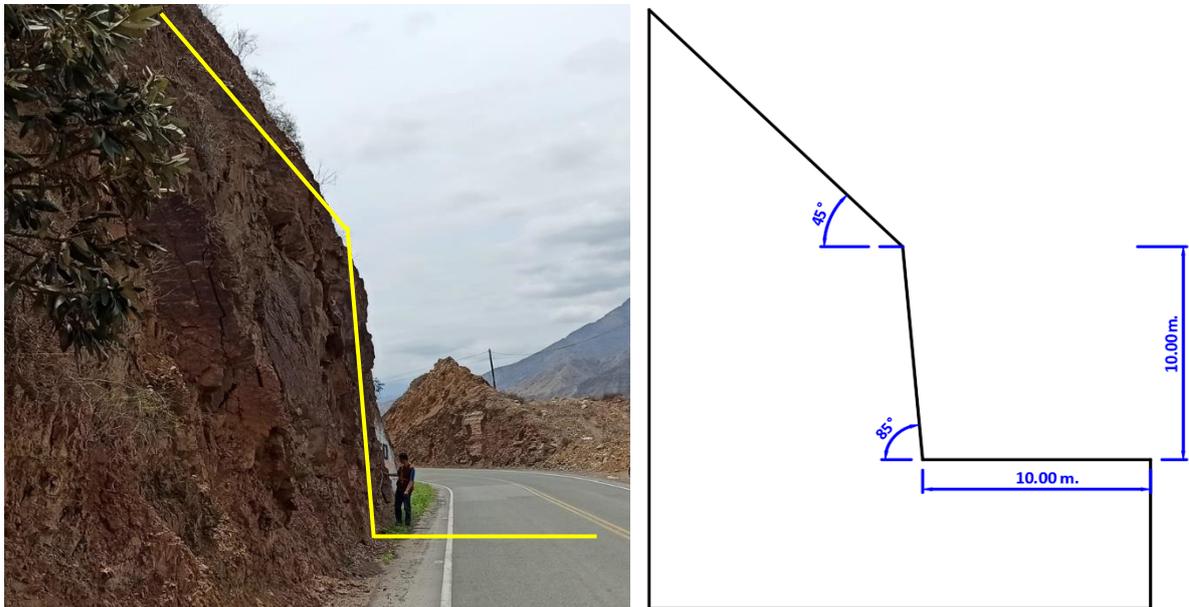


Foto 3.34: Vista perfil del talud PC-05, entre el Km.38+383 y Km. 38+471 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

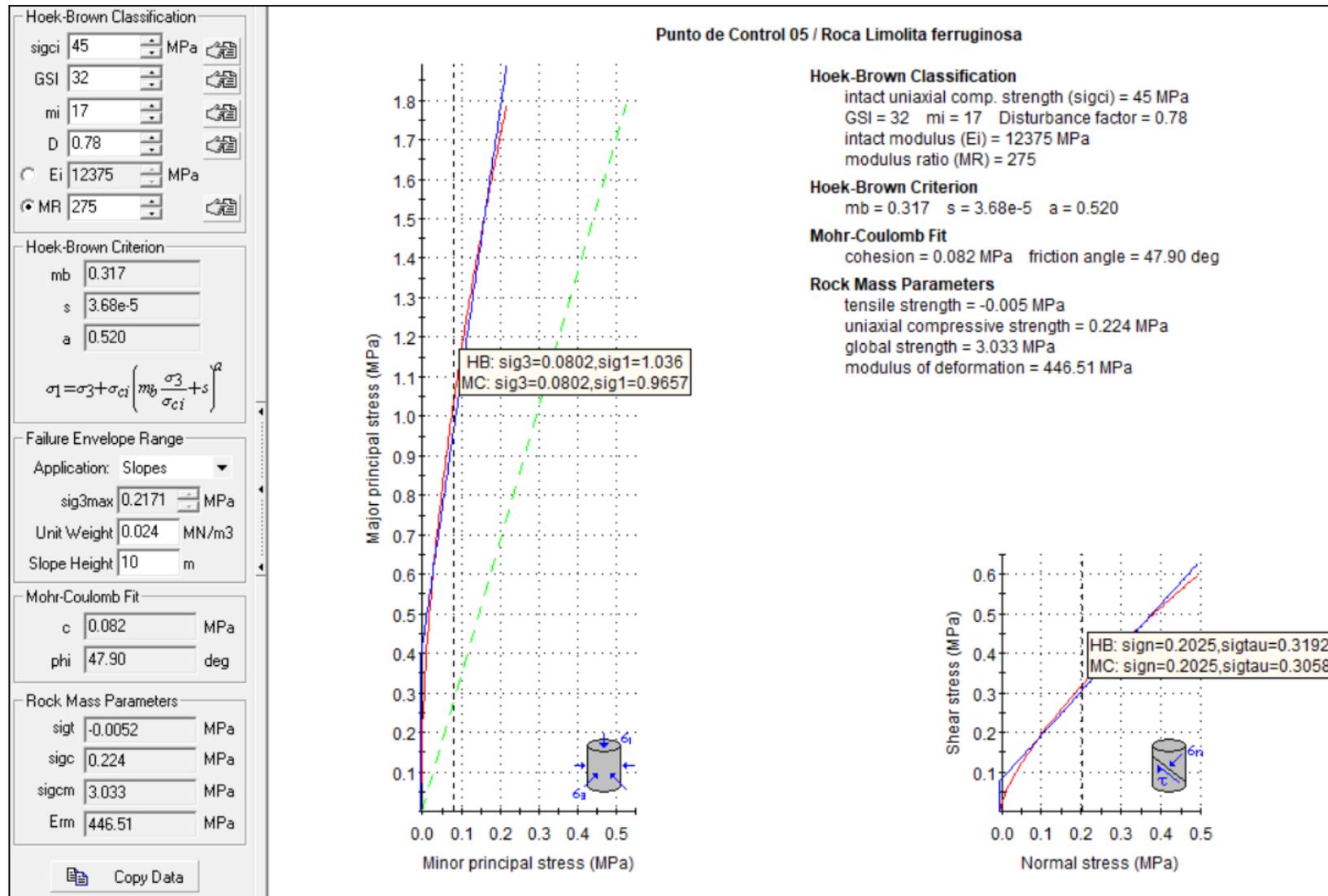


Figura 3.38: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de limolita ferruginosa de la Fm. Inca, en el talud PC-05.

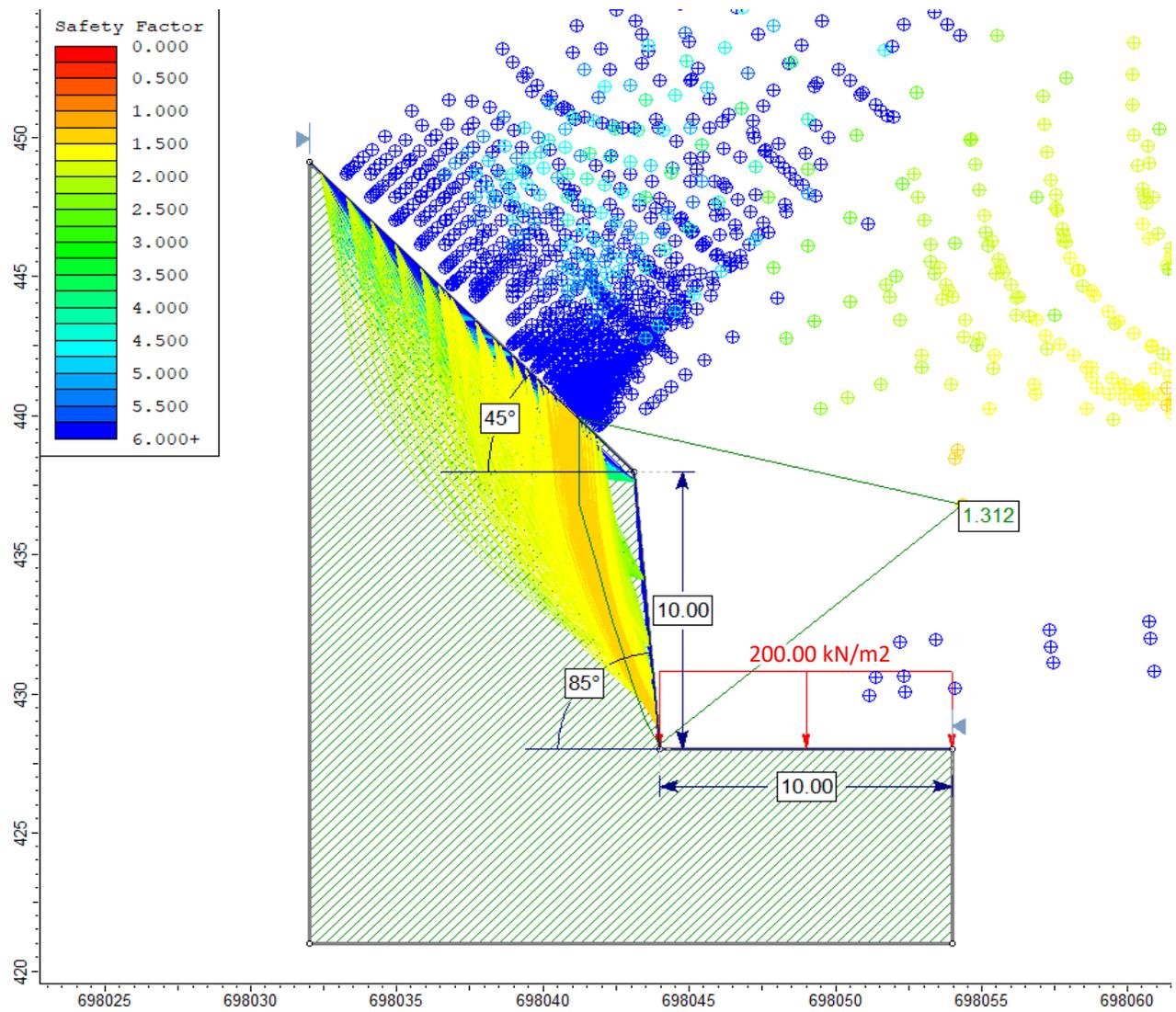


Figura 3.39: Análisis slide del talud PC-05, en Condiciones Normales.

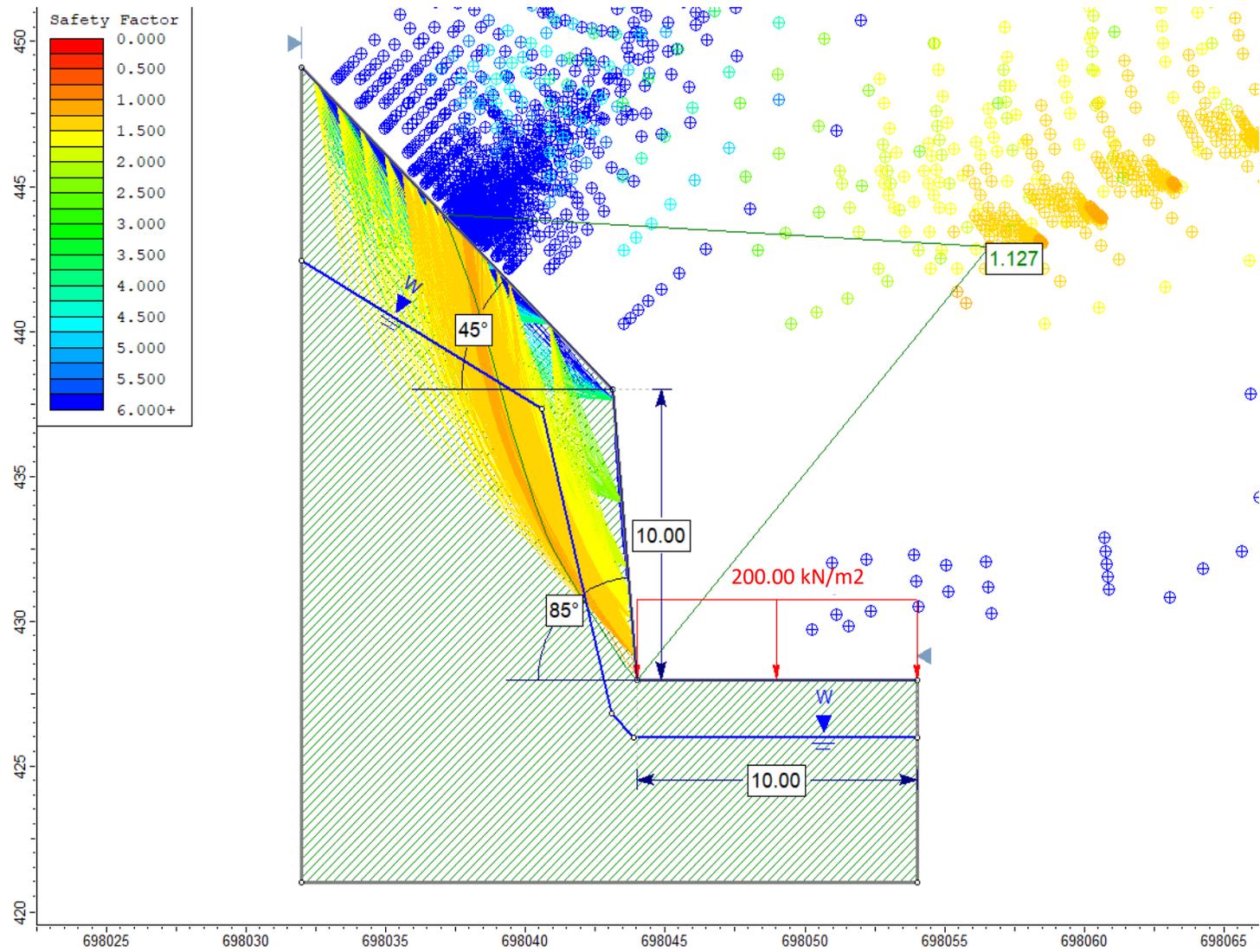


Figura 3.40: Análisis slide del talud PC-05, en condiciones de Saturación Parcial.

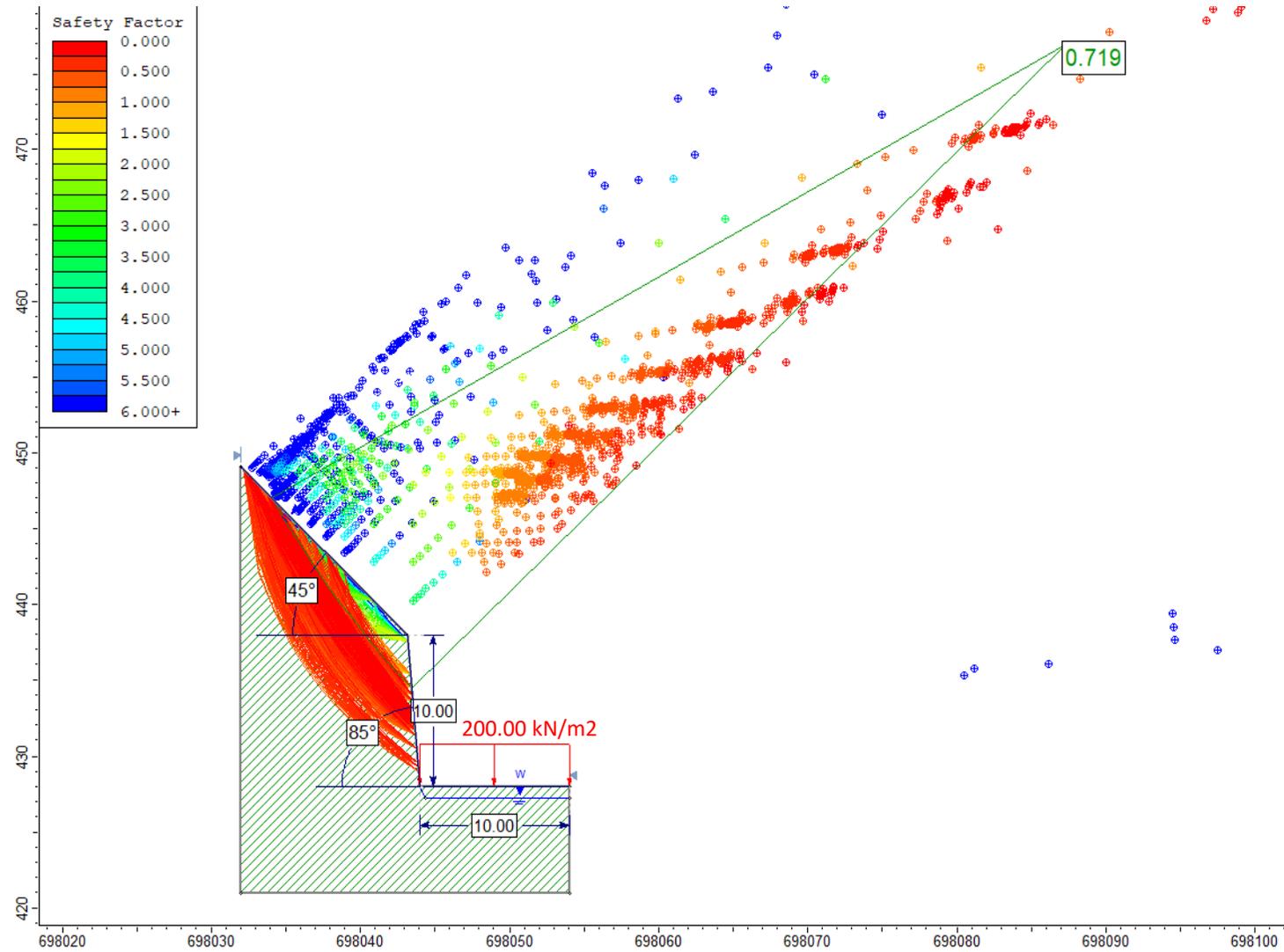


Figura 3.41: Análisis slide del talud PC-05, en condiciones de Saturación Total.

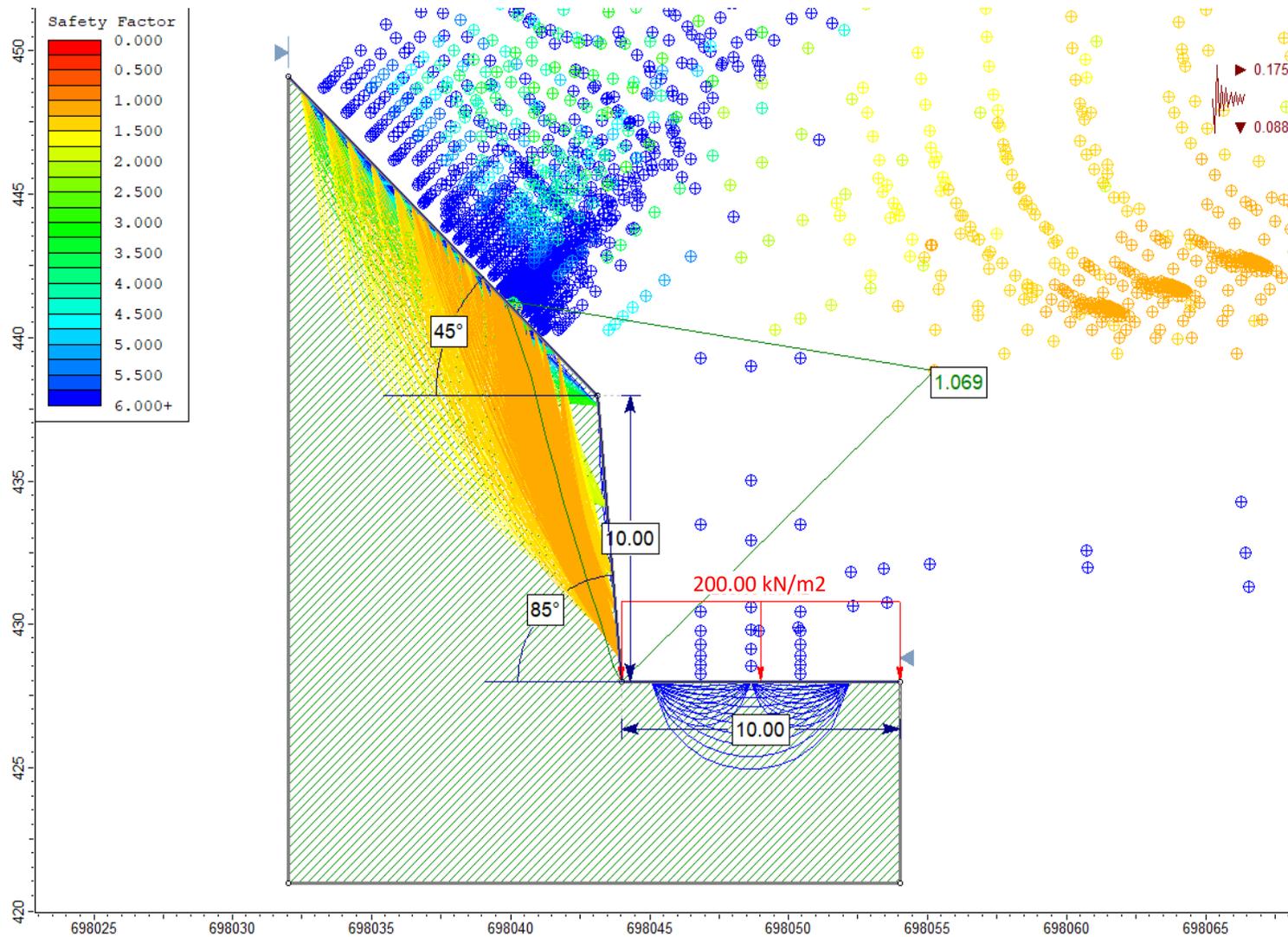


Figura 3.42: Análisis slide del talud PC-05, en condiciones de Sismicidad.

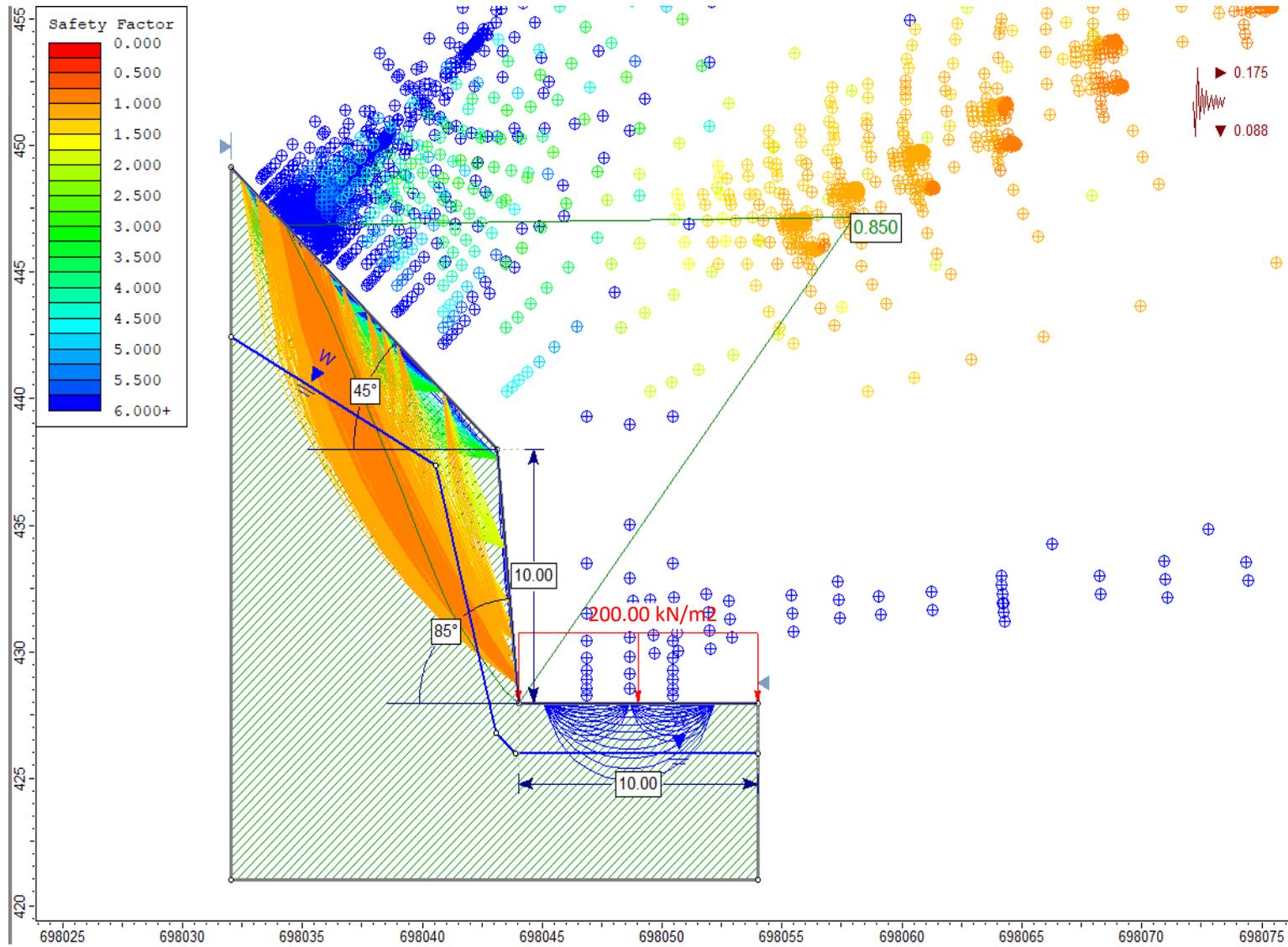


Figura 3.43: Análisis slide del talud PC-05, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.

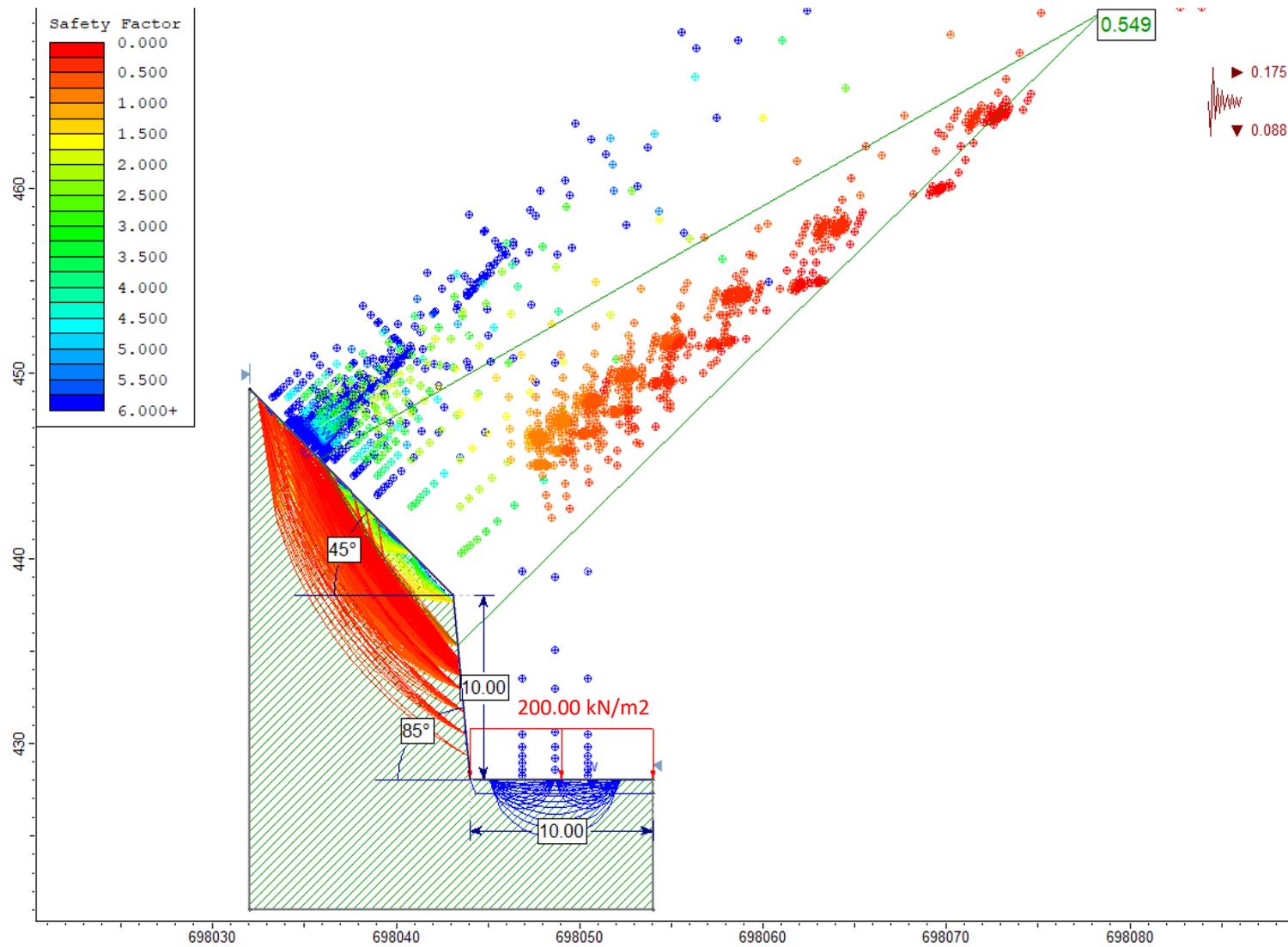


Figura 3.44: Análisis slide del talud PC-05, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.

3.6.7. Punto de control 06 entre progresivas km. 38+775 al km. 38+887.

Tabla 3.24: Localización y descripción del talud en el PC-06.

DATA GPS		DESCRIPCIÓN
Datum: WGS 84 Zona: 17S		La litología que conforma al talud, corresponde a rocas calizas nodulares (alcanzan un espesor de hasta 0.60m, perteneciente a la Fm. Chúlec. Geométricamente, posee una altura de 13m., una inclinación de 75° y la cabeza del talud continua a la geoforma natural del terreno. El macizo rocoso se caracteriza por presentar un grado de meteorización ligero a moderado (meteorización química por disolución) y fracturamiento bajo, mostrando bloques regulares cúbicos y de tamaños grandes. Se identifican 3 familias de discontinuidades, de las cuales, la estratificación se encuentra buzando a favor del talud. La abertura máxima entre las diaclasas es de 12mm. y su relleno consta de arcilla, roca triturada y calcita. Se considera evaluar el talud para determinar la probable inestabilidad ante pseudoestáticas y/o saturadas.
Este (m.)	699413	
Norte (m.)	9201319	
Cota (m.s.n.m.)	425	



Foto 3.35: Afloramiento de calizas, entre el Km.38+775 y Km. 38+887 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.
Coordenadas: E 699413; N 9201319; Cota= 425 m.s.n.m.

Tabla 3.25: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-06.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES		
Litología/ Formación	Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	Tipo	Dip	Dip Direction
Calizas nodulares / Fm. Chúlec	1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-regular	Estrato	51°	180°
	2=Lev Met	2=Med	2=Bloq-irregular	Familia D-1	84°	61°
	3=Mod	3=Bajo	3=Bloq y capas	Familia D-2	33°	338°
	4=Alt		4=Frac-Intenso			
	5=Comp Met					
	6=Suelo					
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
				Altura	13	
				Pie	10	
				Dirección	Talud	Cabeza
				Dip	75°	40°
				Dip Direction	165°	165°
2-3		3	2 / 50			

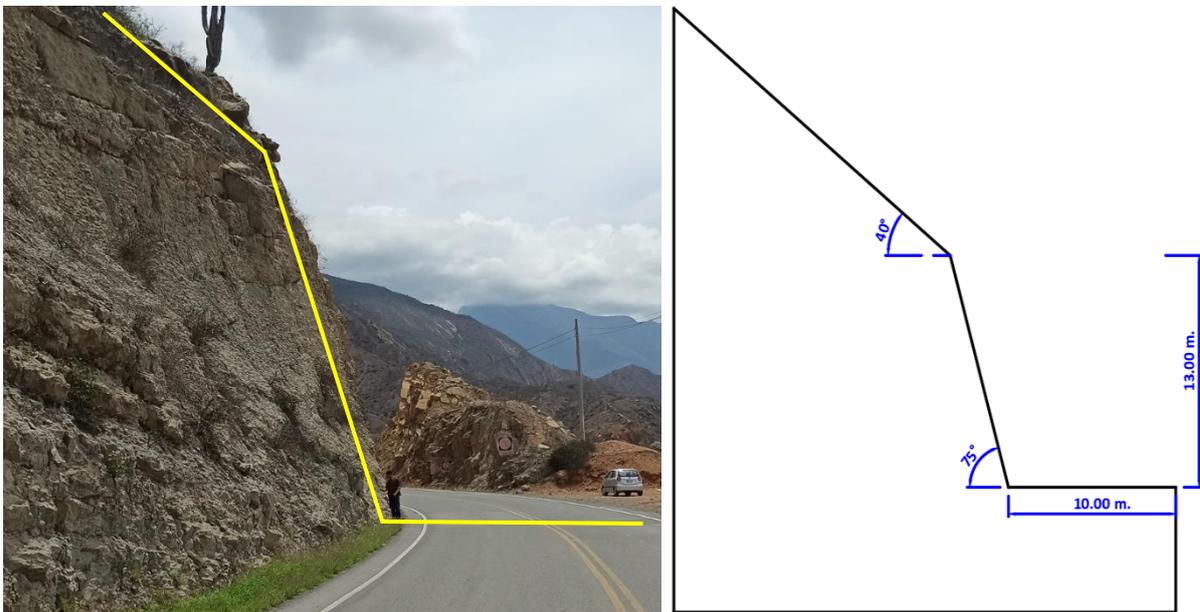


Foto 3.36: Vista perfil del talud PC-06, entre el Km.38+775 y Km. 38+887 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

Tabla 3.26: Cálculo de RQD del Talud PC-06.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1)$	ND	L(m.)	λ	RQD (%)
	41	4.5	9.11	76.84

Tabla 3.27: Valoración RMR del Talud PC-06.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
Parámetro	Rango de valores y valoraciones					Valor	
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	25-5 (2) 5-1 (1) <1 (0)	7	
RQD (%)	90%-100% (20)	75%-90% (17)	50%-75% (13)	25%-50% (6)	< 25% (3)	17	
Espaciamiento de la discontinuidad (m.)	> 2m. (20)	0,6m.-2m. (15)	0,2m.- 0,6m. (10)	0,06m.-0,2m. (8)	< 0,06m. (5)	10	
Persistencia de la discontinuidad	< 1 m. (6)	1-3 m. (4)	3-10 m. (2)	10-20 m. (1)	> 20 m. (0)	2	
Estado de las discontinuidades	Abertura	Nada (6)	< 0,1 mm. (5)	0,1-1,0 mm. (3)	1-5 mm. (1)	> 5 mm. (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Ligeramente Rugosa (3)	Ondulada (1)	Suave (0)	3
	Relleno	Ninguno (6)	Relleno duro < 5 mm. (4)	Relleno duro > 5 mm. (2)	Relleno blando < 5 mm. (2)	Relleno blando > 5 mm. (0)	2
	Alteración	Inalterada (6)	Ligeramente alterada (5)	Moderadamente alterada (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
Agua subterránea	Seco (15)	Ligeramente húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)	10	
Valor total RMR						54	

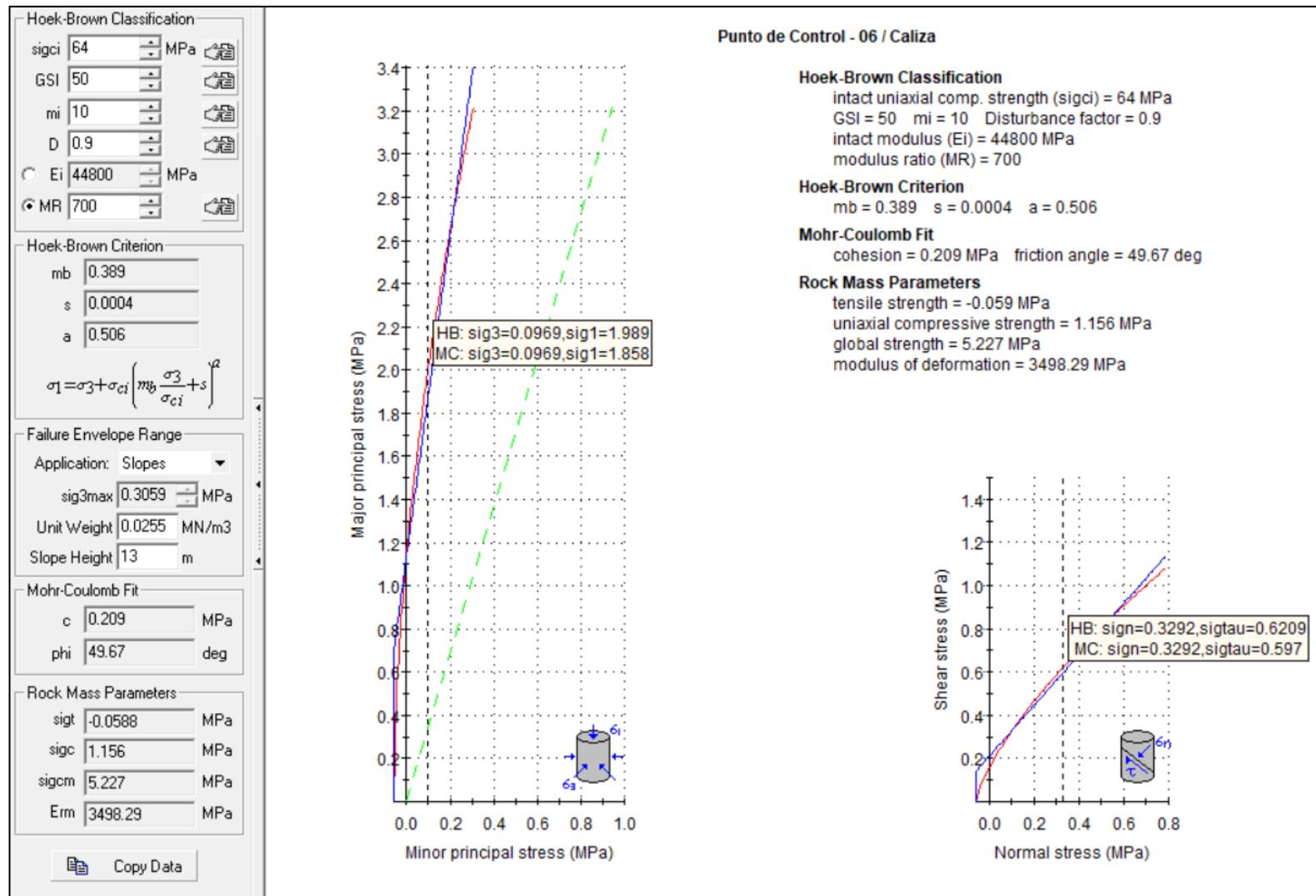


Figura 3.45: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de calizas Fm. Chúlec, en el talud PC-06.

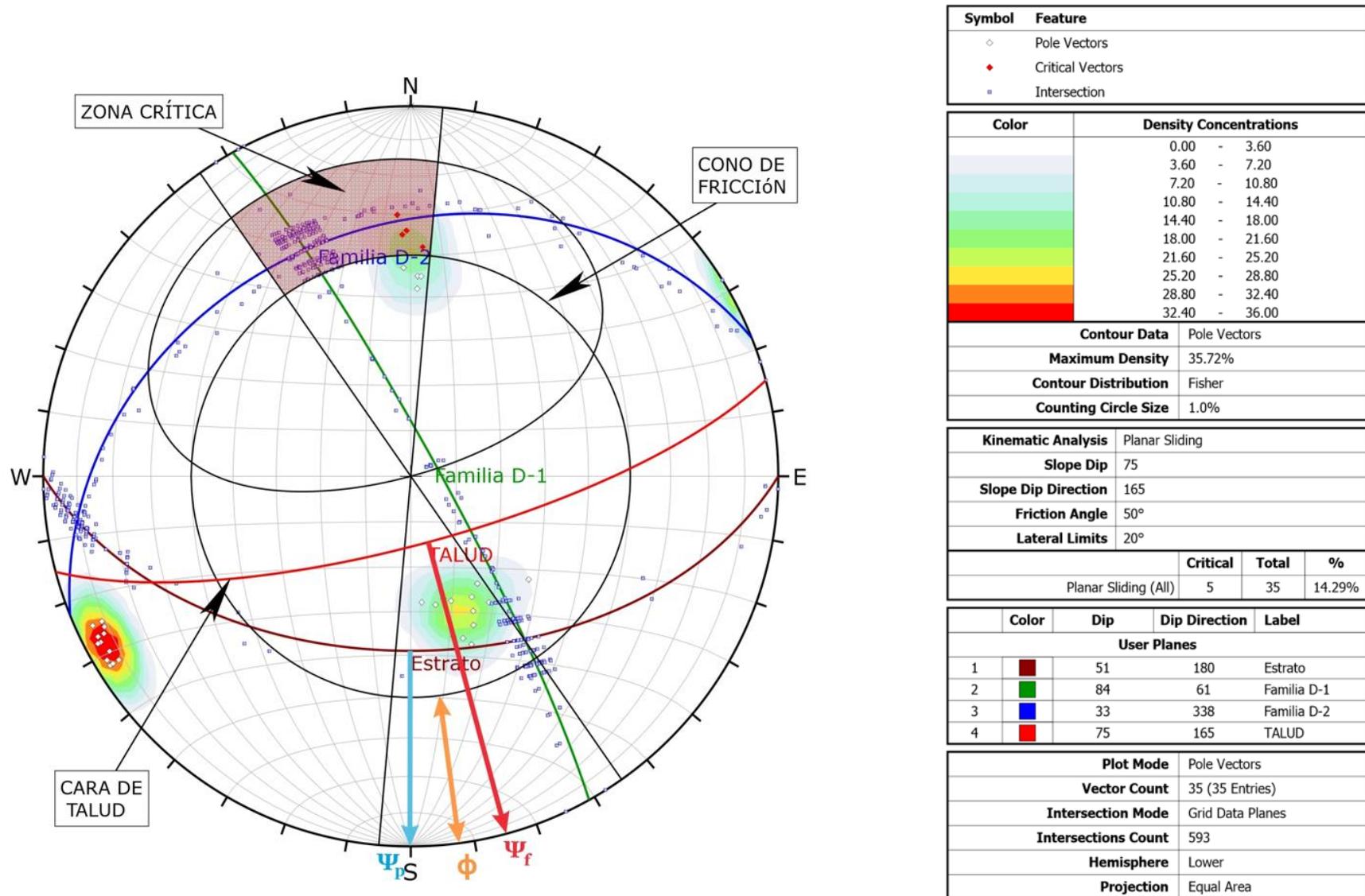


Figura 3.46: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-06, indicando una probabilidad de falla de 14.29 %.

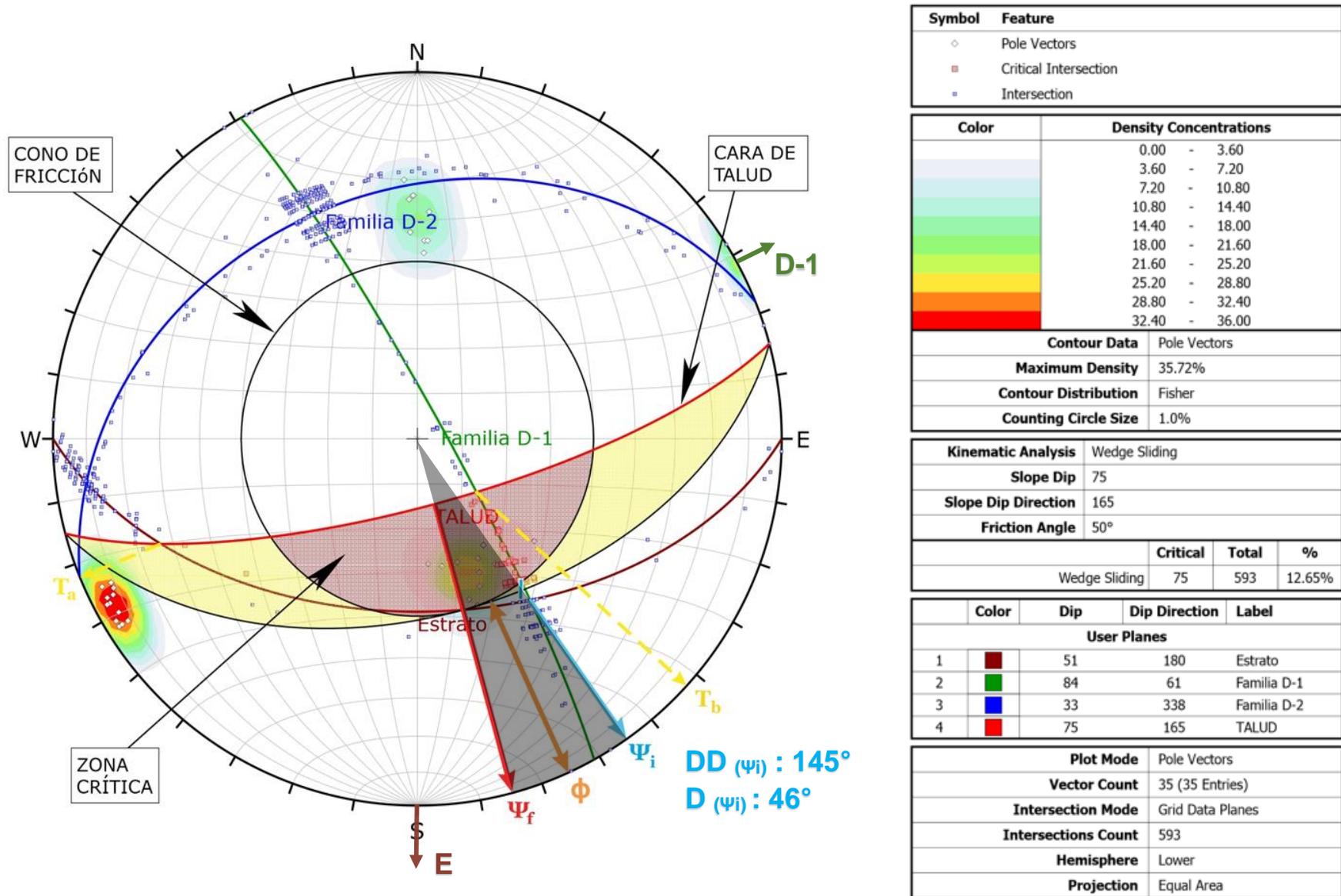


Figura 3.47: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-06, indicando una probabilidad de falla de 12.65 %.

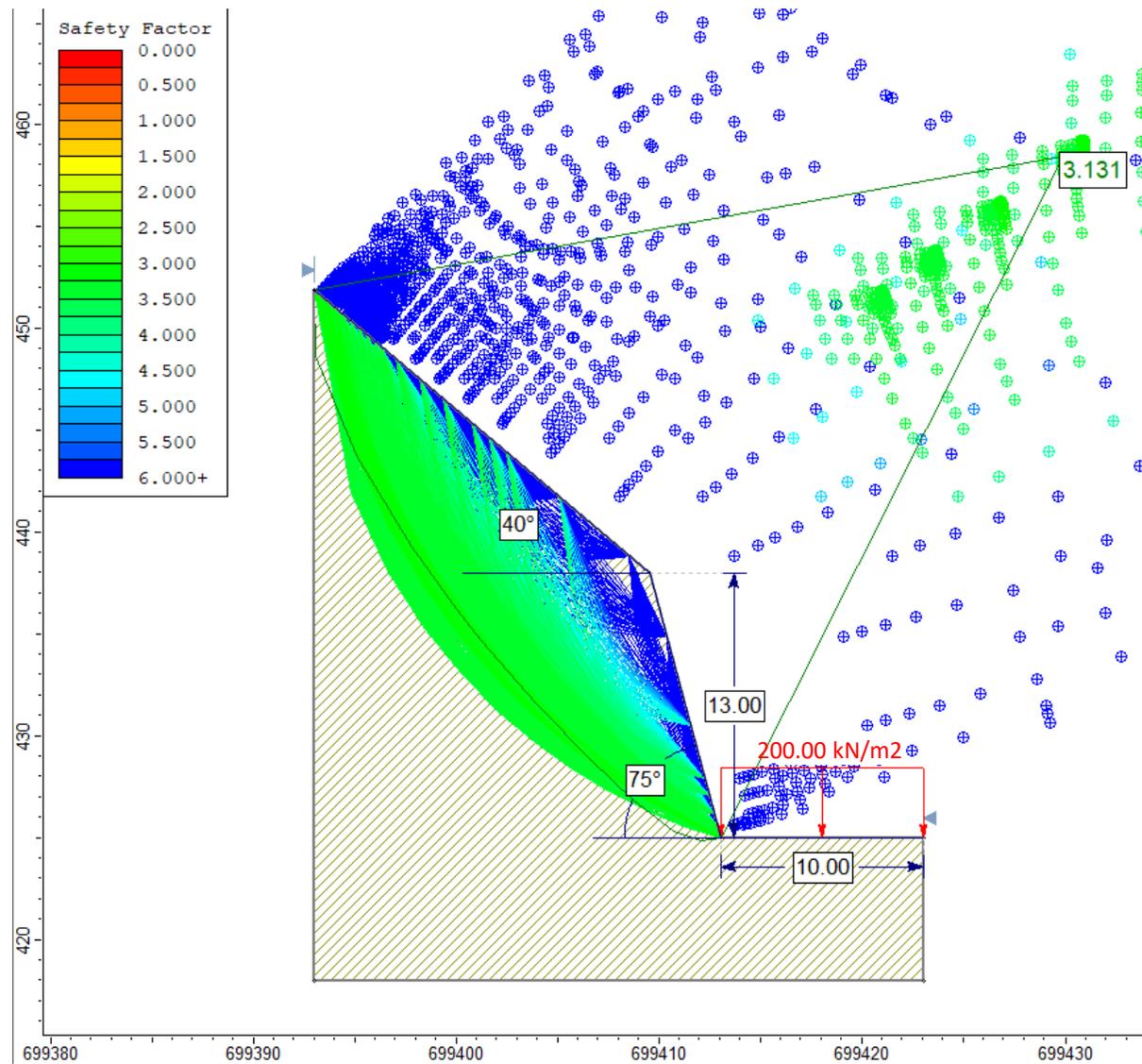


Figura 3.48: Análisis slide del talud PC-06, en Condiciones Normales.

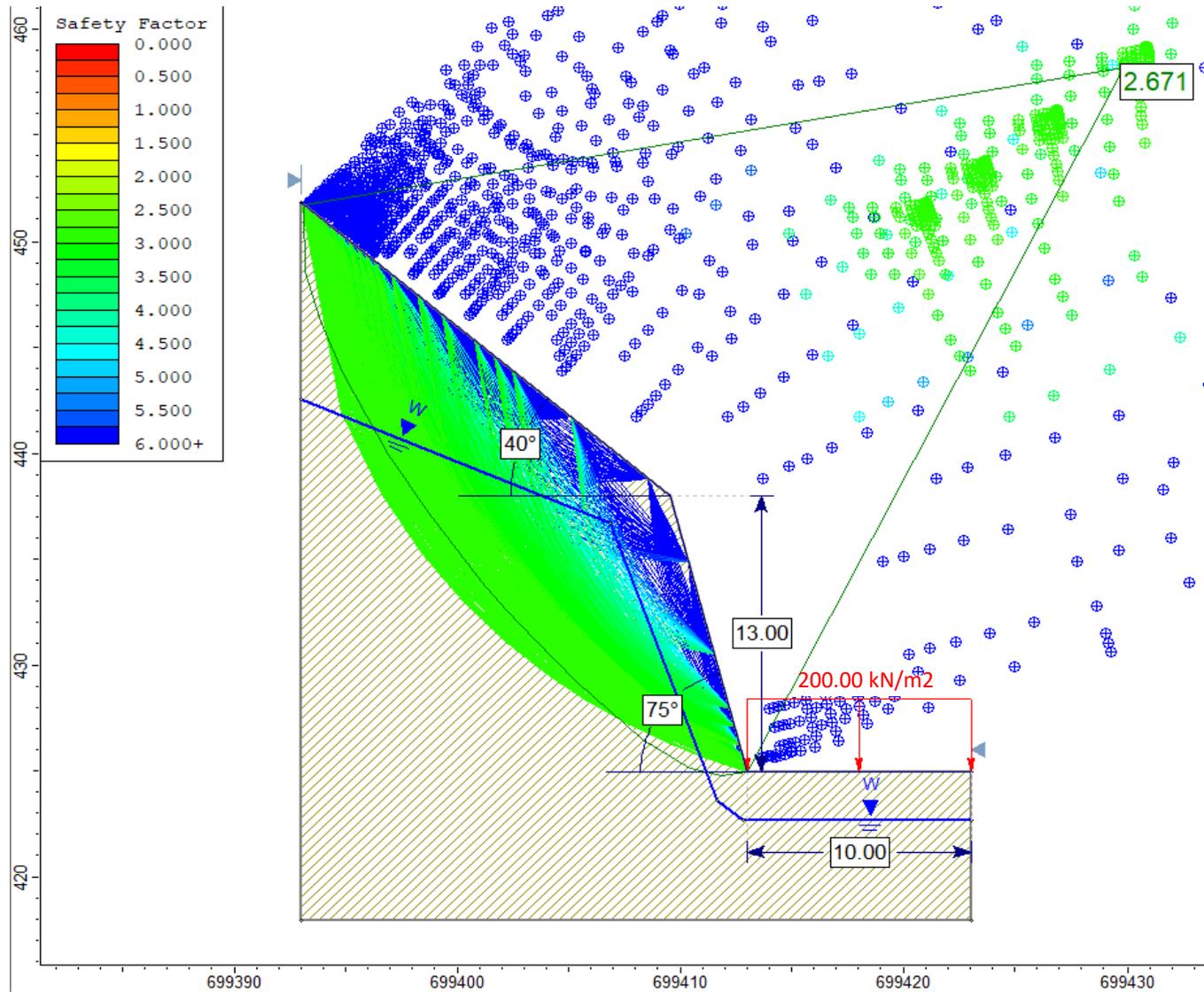


Figura 3.49: Análisis slide del talud PC-06, en condiciones de Saturación Parcial.

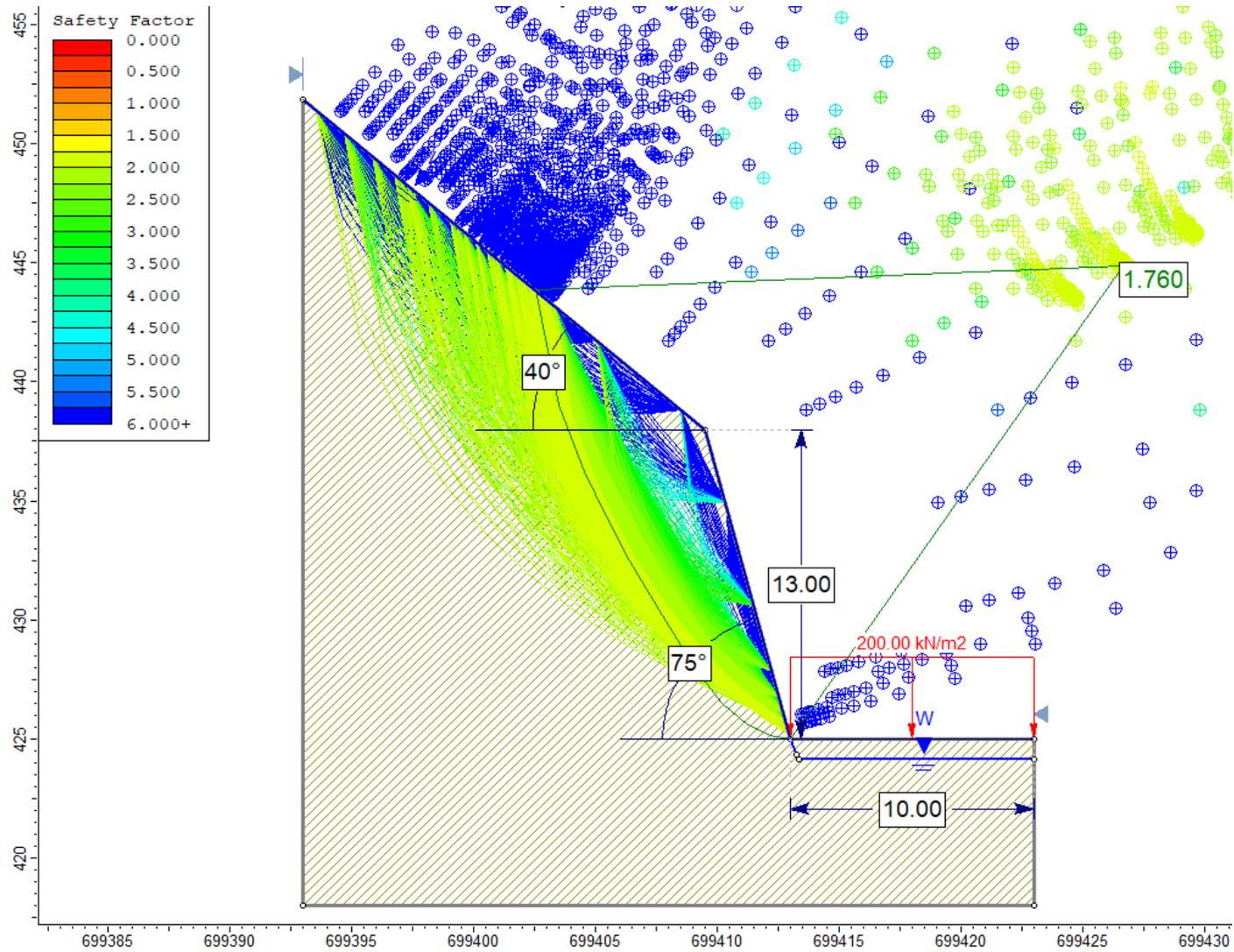


Figura 3.50: Análisis slide del talud PC-06, en condiciones de Saturación Total.

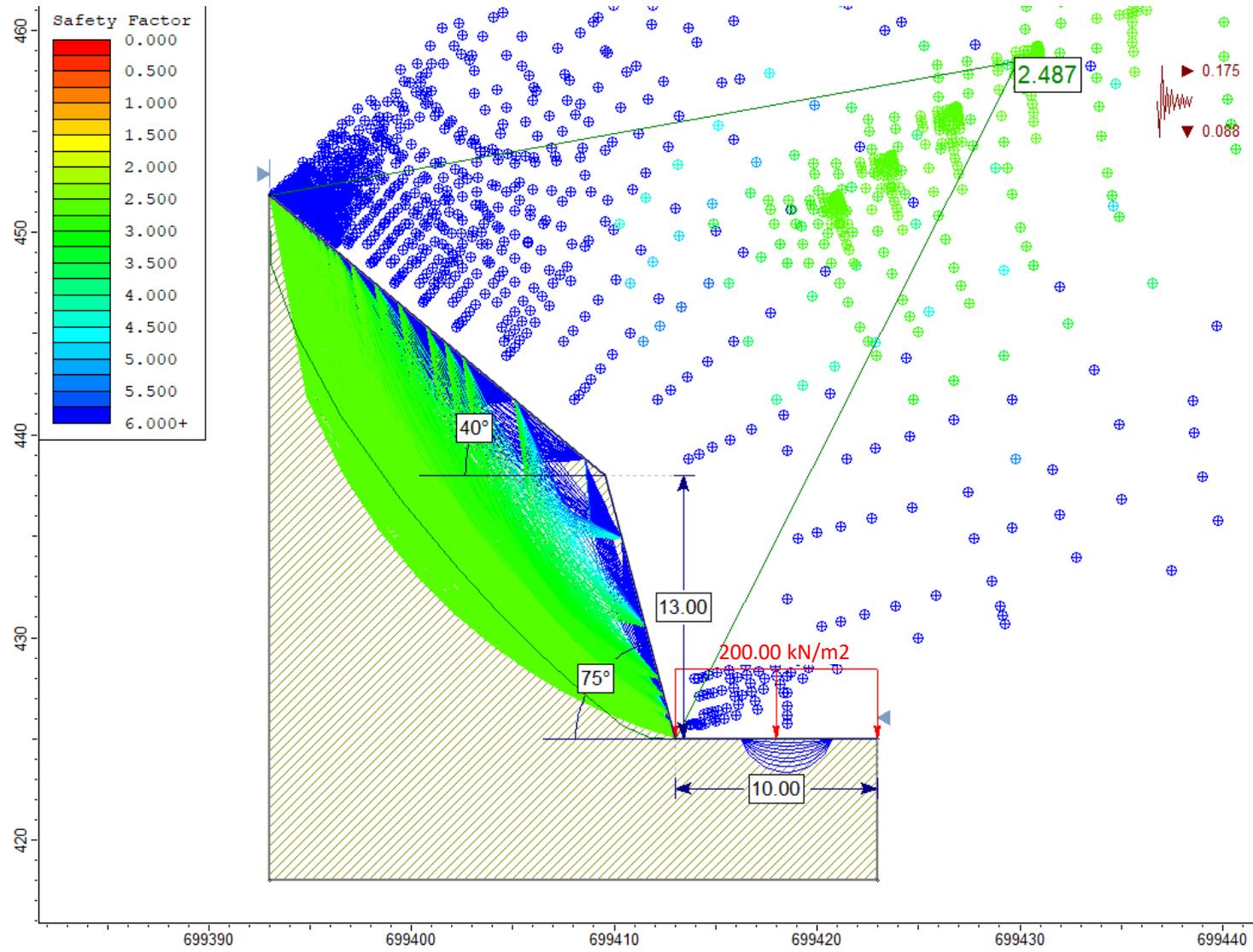


Figura 3.51: Análisis slide del talud PC-06, en condiciones de Sismicidad.

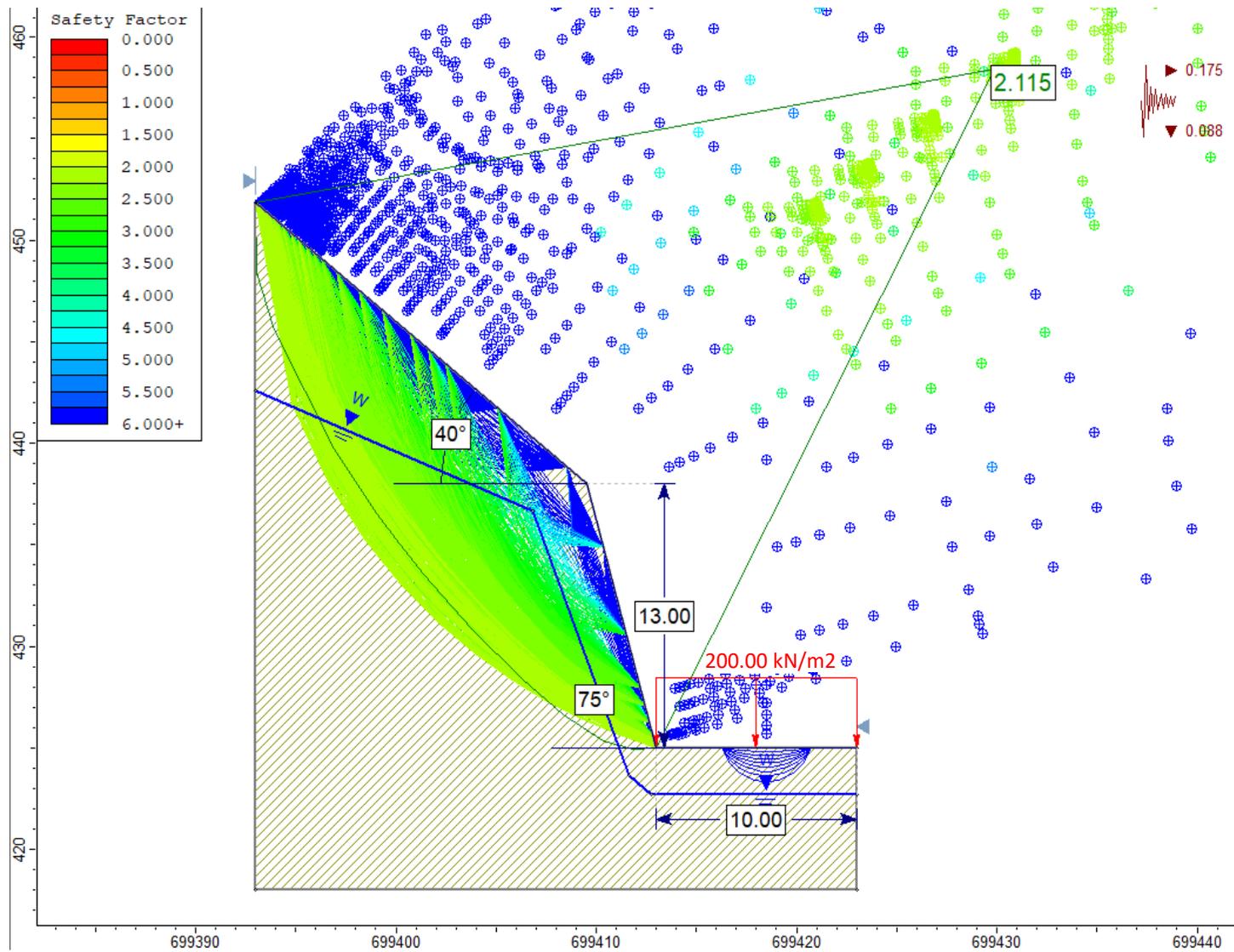


Figura 3.52: Análisis slide del talud PC-06, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.

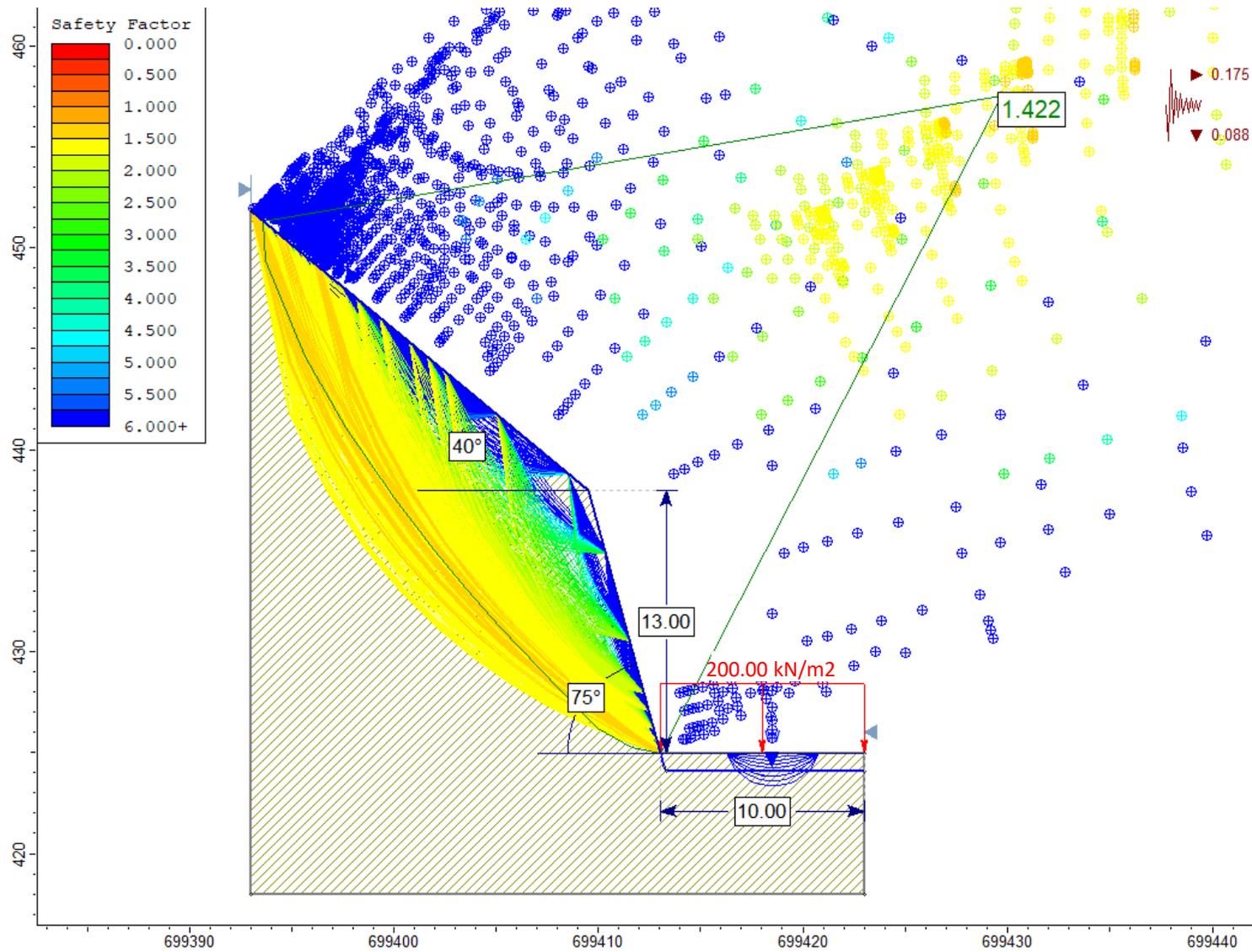


Figura 3.53: Análisis slide del talud PC-06, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.

3.6.8. Punto de control 07 entre progresivas km. 39+678 al km. 39+801.

Tabla 3.28: Localización y descripción del talud en el PC-07.

DATA GPS		DESCRIPCIÓN
Datum: WGS 84 Zona: 17S		El talud, está conformado por rocas de areniscas (espesor oscila entre 0.15m y 0.35m.), perteneciente a la Fm. Carhuaz. Geométricamente, el talud posee una altura de 16m., inclinación de 84° y la cabeza del talud continua a la geoforma natural del terreno. El macizo rocoso se caracteriza por presentar un grado de meteorización moderado tendiendo a alto y de fracturamiento alto a medio, formando bloques pequeños cuasicúbicos dada su irregular, donde se identifican 4 familias de discontinuidades (incluyendo estratificación). La abertura entre sus diaclasas llegan hasta los 6.2mm. y su relleno consta principalmente de óxidos.
Este (m.)	699768	
Norte (m.)	9202081	
Cota (m.s.n.m.)	433	



Foto 3.37: Afloramiento de areniscas, entre el Km.39+678 y Km. 39+801 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.
Coordenadas: E 699768; N 9202081; Cota= 433 m.s.n.m.

Tabla 3.29: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-07.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES		
Litología/ Formación	Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	Tipo	Dip	Dip Direction
Areniscas / Fm. Carhuaz	1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-regular	Estrato	16°	174°
	2=Lev Met	2=Med	2=Bloq-irregular	Familia D-1	81°	20°
	3=Mod	3=Bajo	3=Bloq y capas	Familia D-2	78°	109°
	4=Alt		4=Frac-Intenso	Familia D-3	72°	82°
	5=Comp Met					
	6=Suelo					
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
				Altura	16	
				Pie	10	
				Dirección	Talud	Cabeza
				Dip	84°	30°
3	1	2 / 45	Dip Direction	78°	78°	

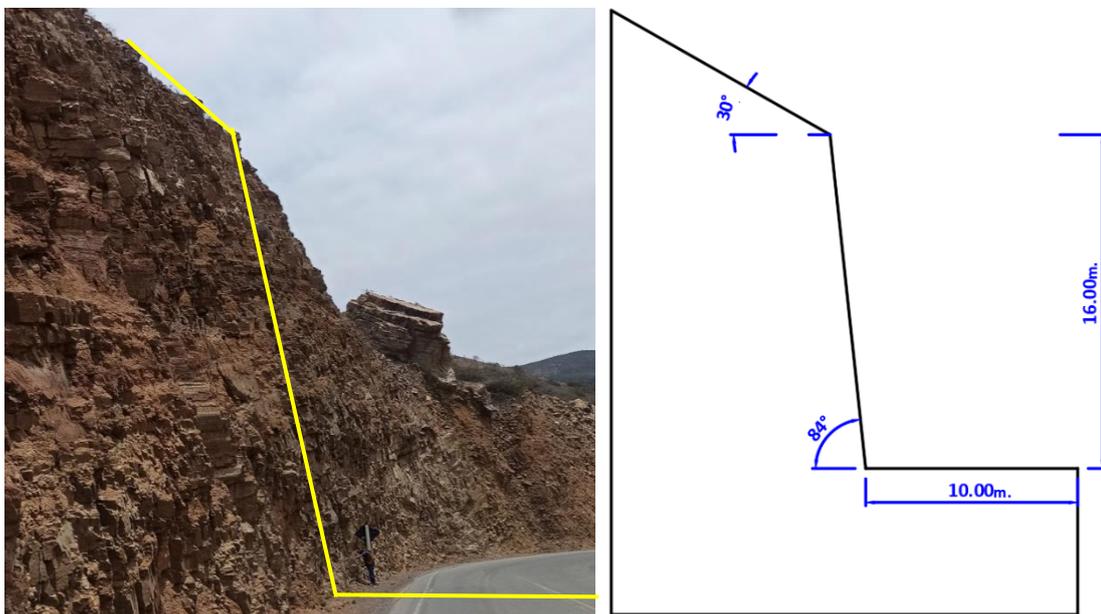


Foto 3.38: Vista perfil del talud PC-07, entre el Km.39+678 y Km. 39+801 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

Tabla 3.30: Cálculo de RQD del Talud PC-07.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1)$	ND	L(m.)	λ	RQD (%)
	69	4.5	15.33	54.67

Tabla 3.31: Valoración RMR del Talud PC-07.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)						
Parámetro	Rango de valores y valoraciones					Valor
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	25-5 (2) 5-1 (1) <1 (0)	4
RQD (%)	90%-100% (20)	75%-90% (17)	50%-75% (13)	25%-50% (6)	< 25% (3)	13
Espaciamiento de la discontinuidad (m.)	> 2m. (20)	0,6m.-2m. (15)	0,2m.- 0,6m. (10)	0,06m.-0,2m. (8)	< 0,06m. (5)	8
Persistencia de la discontinuidad	< 1 m. (6)	1-3 m. (4)	3-10 m. (2)	10-20 m. (1)	> 20 m. (0)	4
Abertura	Nada (6)	< 0,1 mm. (5)	0,1-1,0 mm. (3)	1-5 mm. (1)	> 5 mm. (0)	0
Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Ligeramente Rugosa (3)	Ondulada (1)	Suave (0)	3
Relleno	Ninguno (6)	Relleno duro < 5 mm. (4)	Relleno duro > 5 mm. (2)	Relleno blando < 5 mm. (2)	Relleno blando > 5 mm. (0)	2
Alteración	Inalterada (6)	Ligeramente alterada (5)	Moderadamente alterada (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
Agua subterránea	Seco (15)	Ligeramente húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)	10
Valor total RMR						47

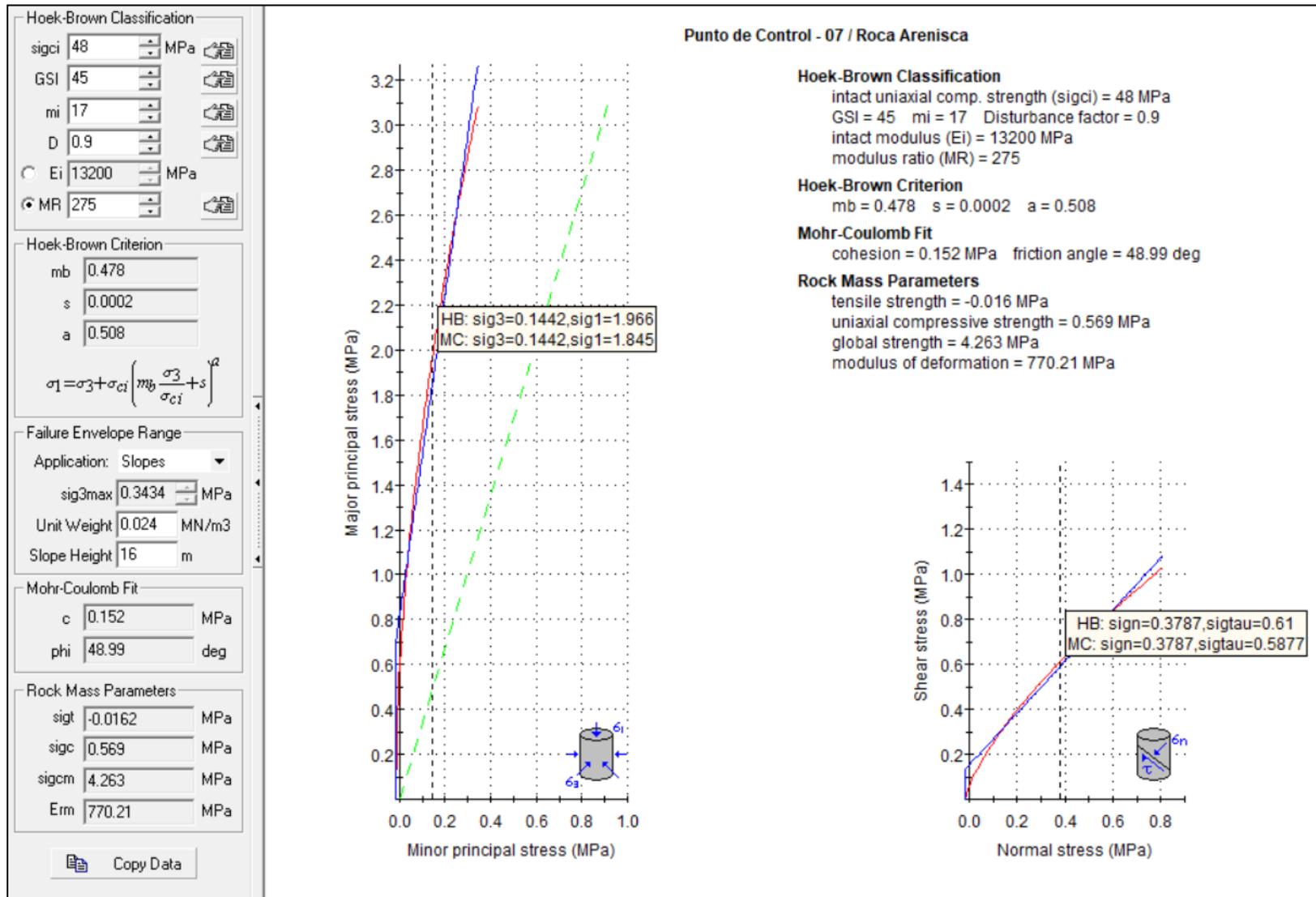


Figura 3.54: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de roca arenisca de la Fm. Carhuaz, en el talud PC-07.

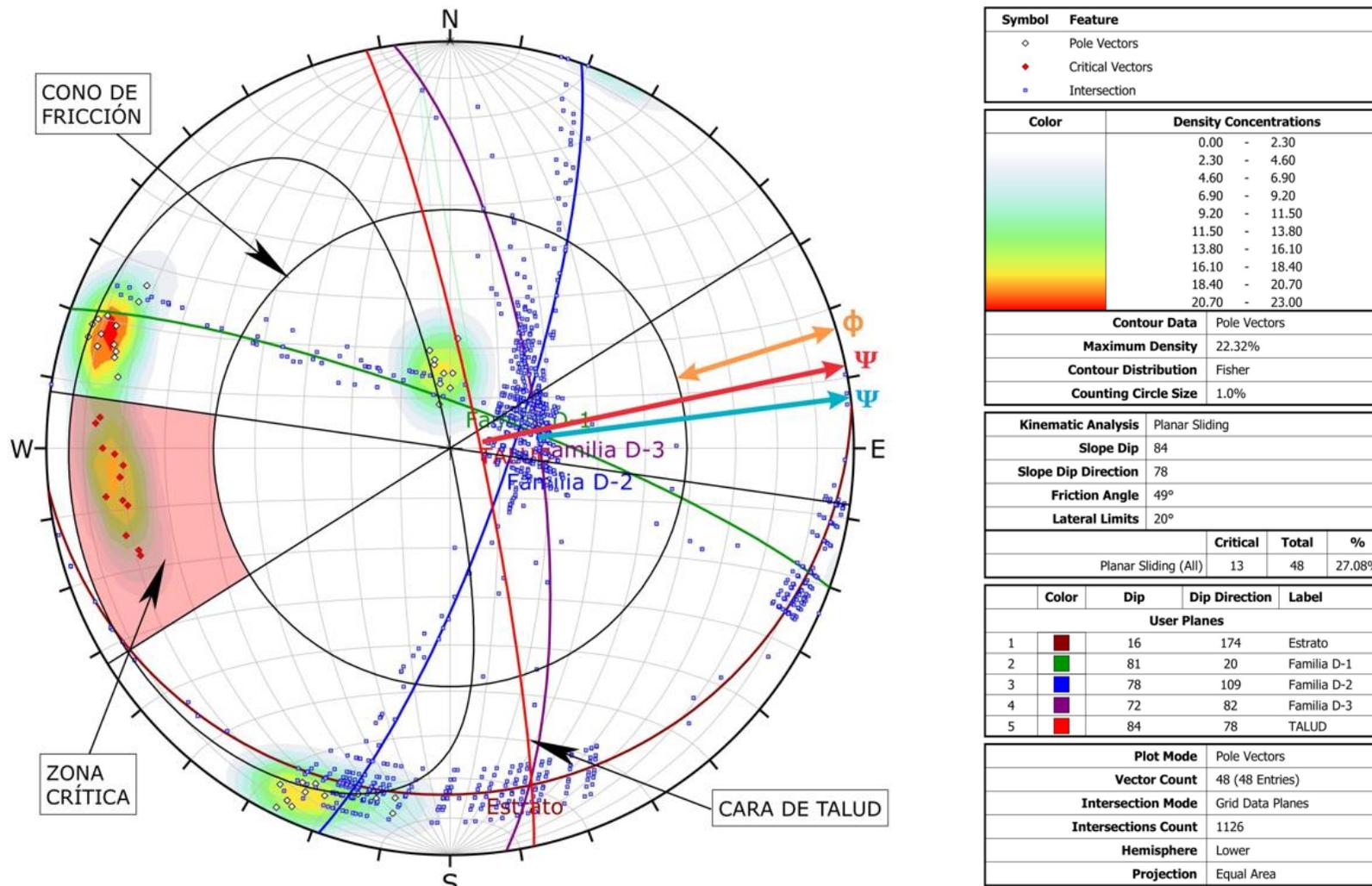
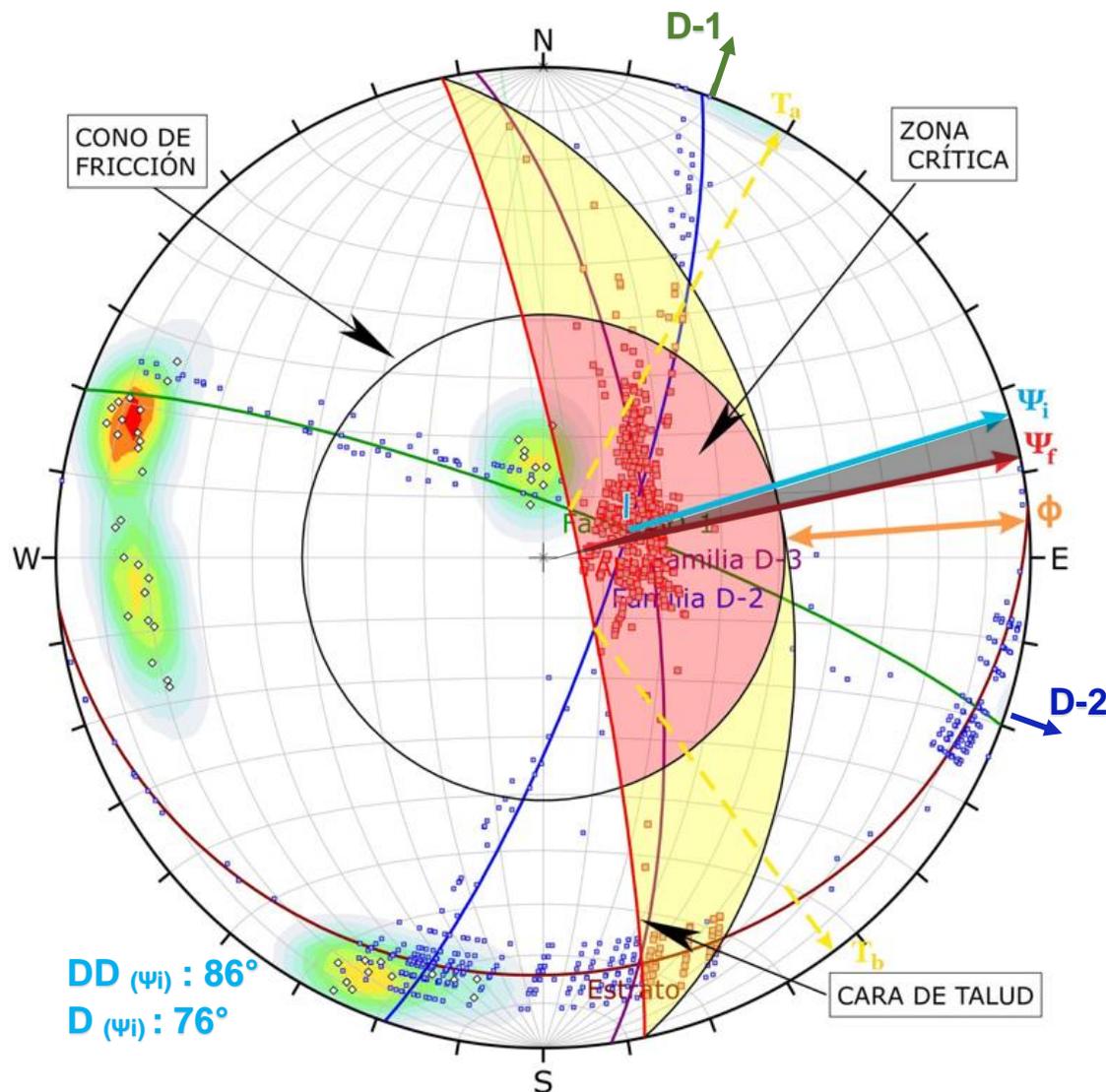


Figura 3.55: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-07, indicando una probabilidad de falla de 27.08 %.



Symbol	Feature
○	Pole Vectors
■	Critical Intersection
□	Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.30
	2.30 - 4.60
	4.60 - 6.90
	6.90 - 9.20
	9.20 - 11.50
	11.50 - 13.80
	13.80 - 16.10
	16.10 - 18.40
	18.40 - 20.70
	20.70 - 23.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	22.32%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	84
Slope Dip Direction	78
Friction Angle	49°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	653	1126	57.99%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	16	174	Estrato
2	81	20	Familia D-1
3	78	109	Familia D-2
4	72	82	Familia D-3
5	84	78	TALUD

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	48 (48 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	1126
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.56: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-07, indicando una probabilidad de falla de 57.99 %.

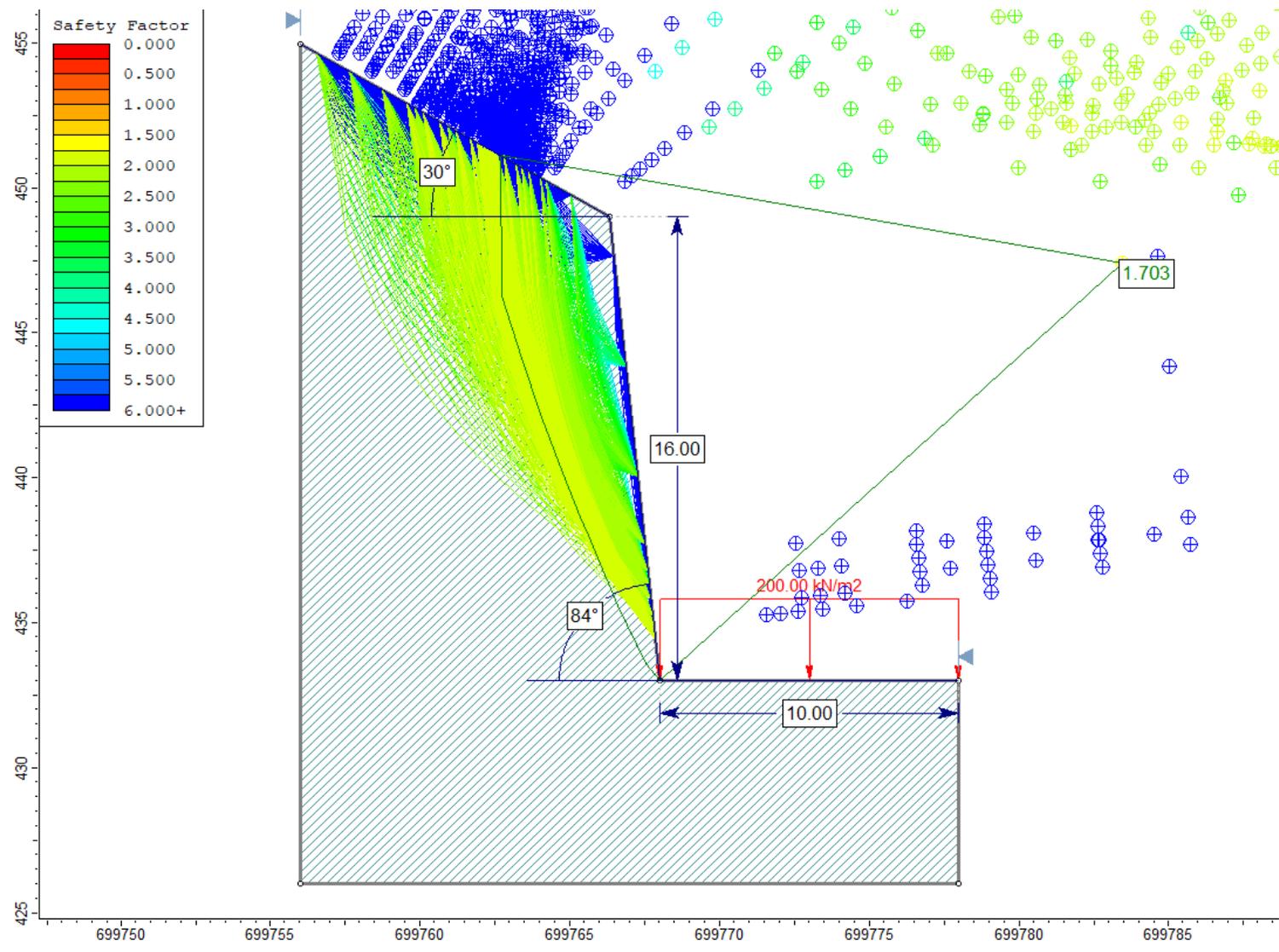


Figura 3.57: Análisis slide del talud PC-07, en Condiciones Normales.

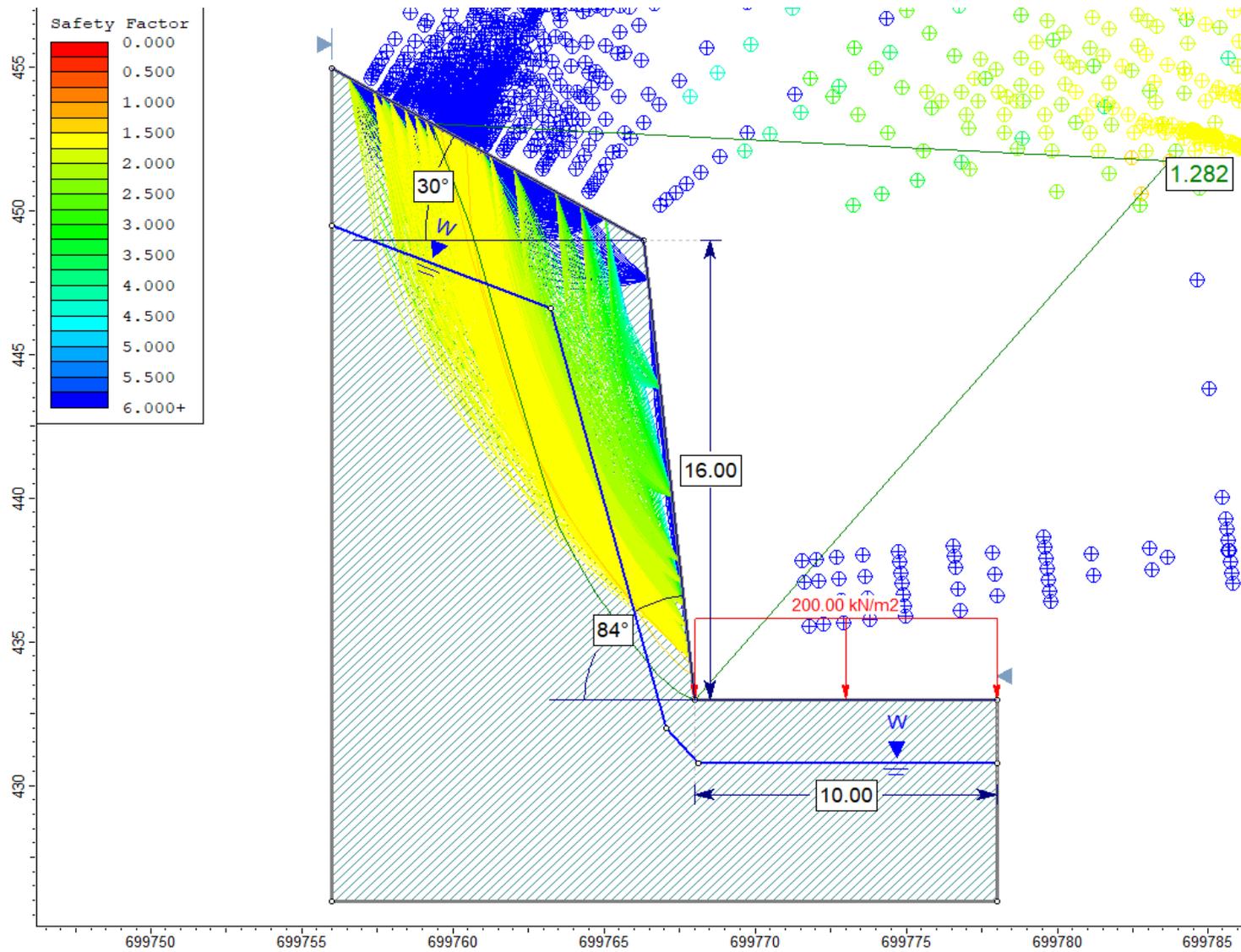


Figura 3.58: Análisis slide del talud PC-07, en condiciones de Saturación Parcial.

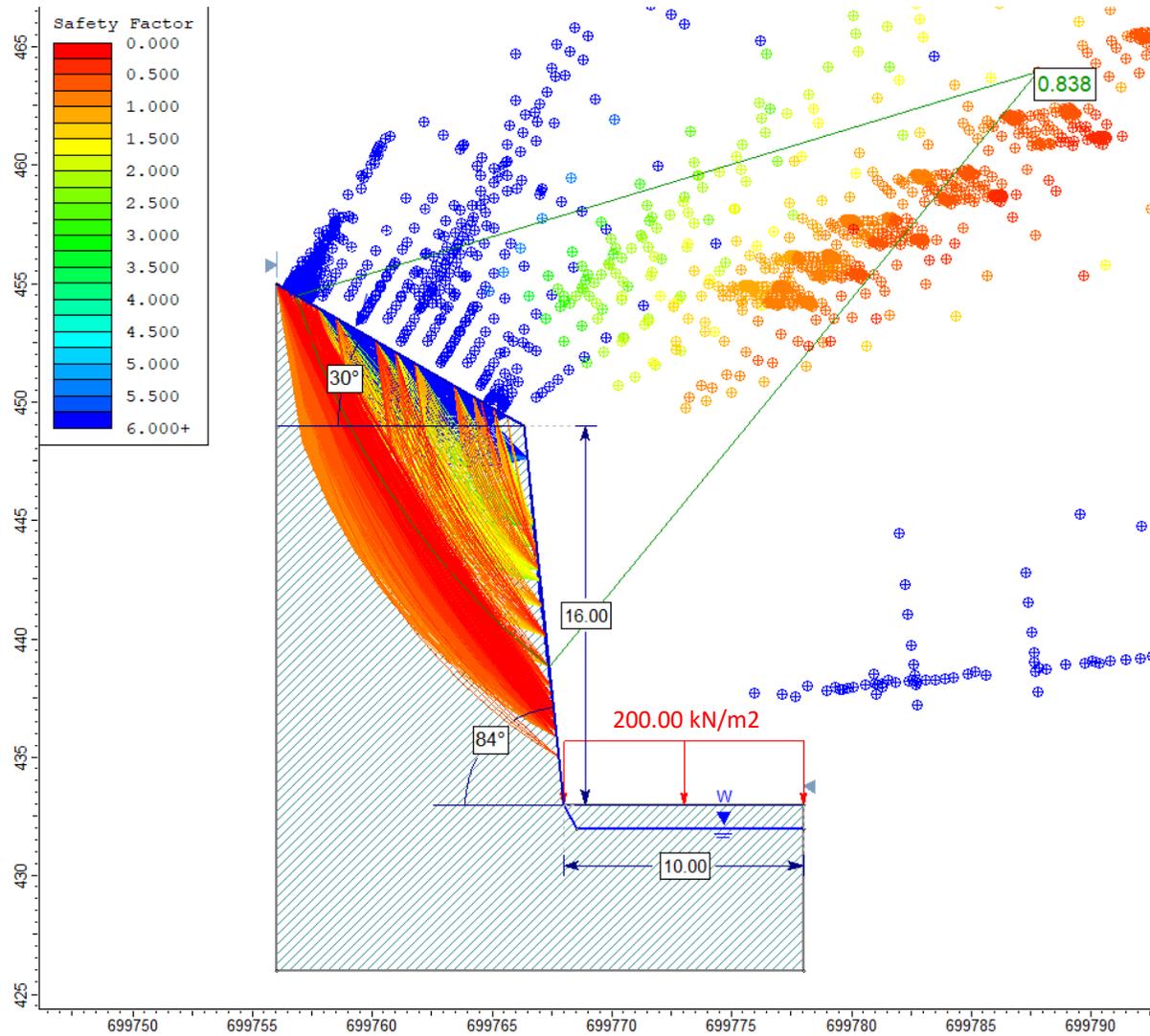


Figura 3.59: Análisis slide del talud PC-07, en condiciones de Saturación Total.

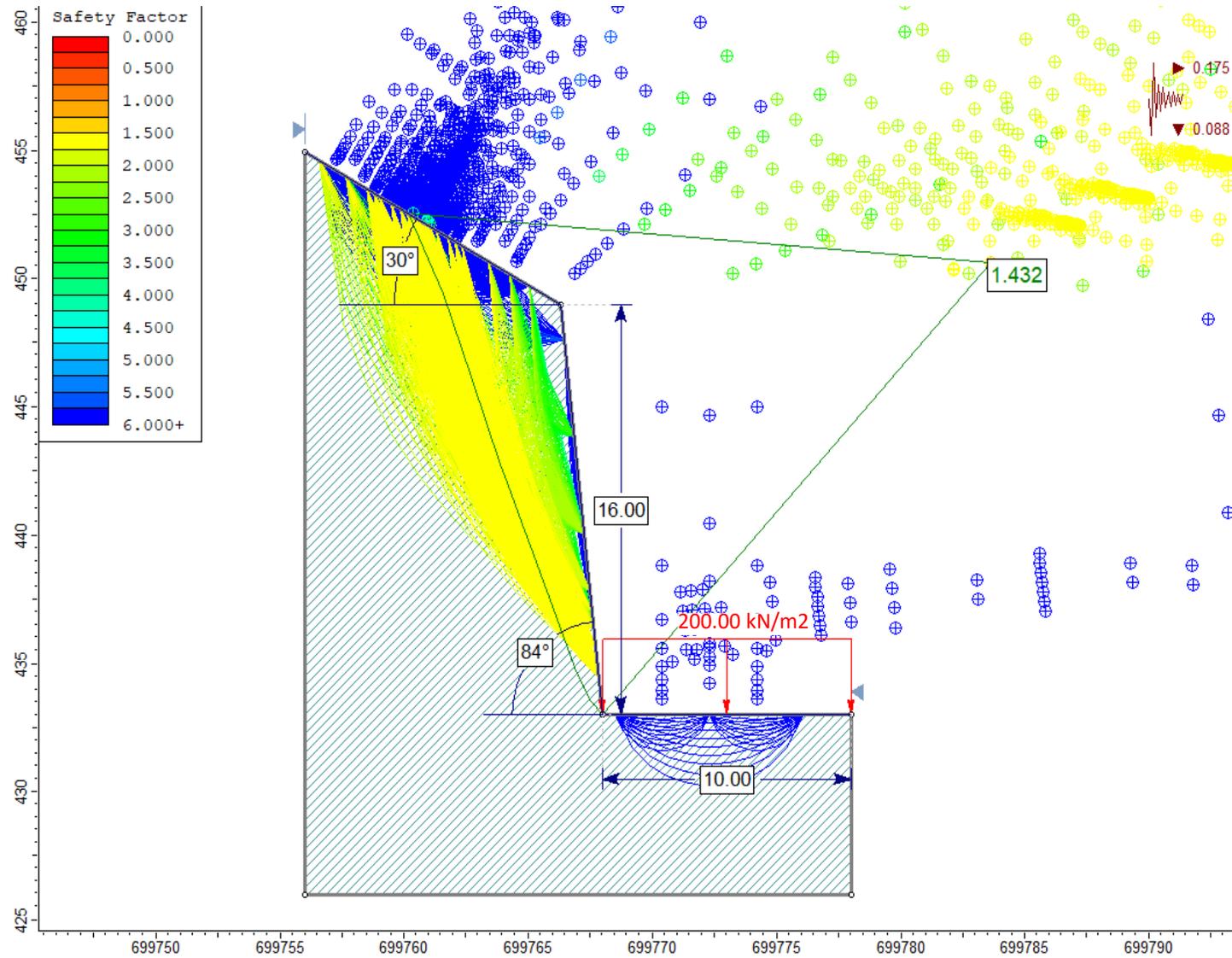


Figura 3.60: Análisis slide del talud PC-07, en condiciones de Sismicidad.

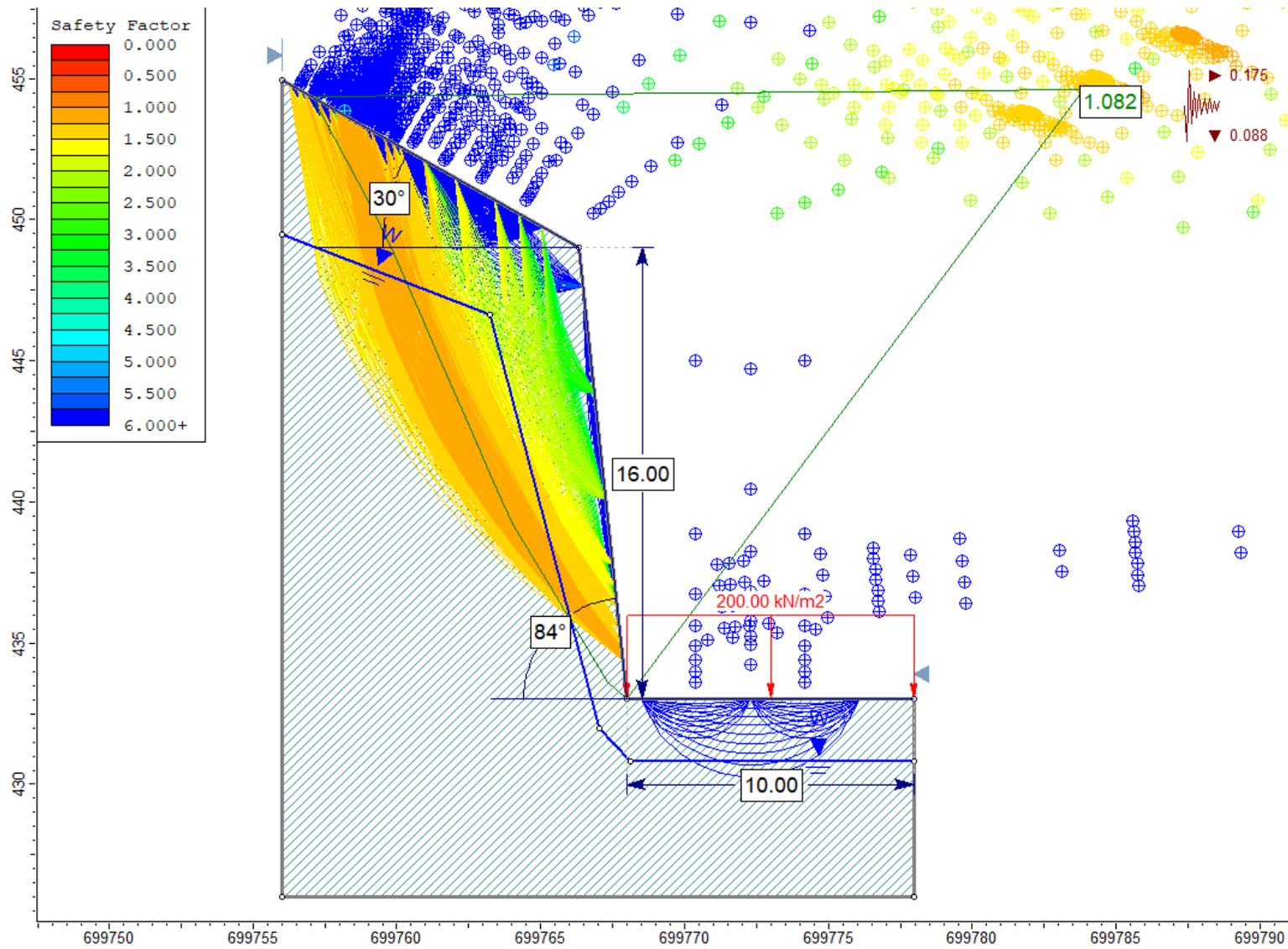


Figura 3.61: Análisis slide del talud PC-07, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.

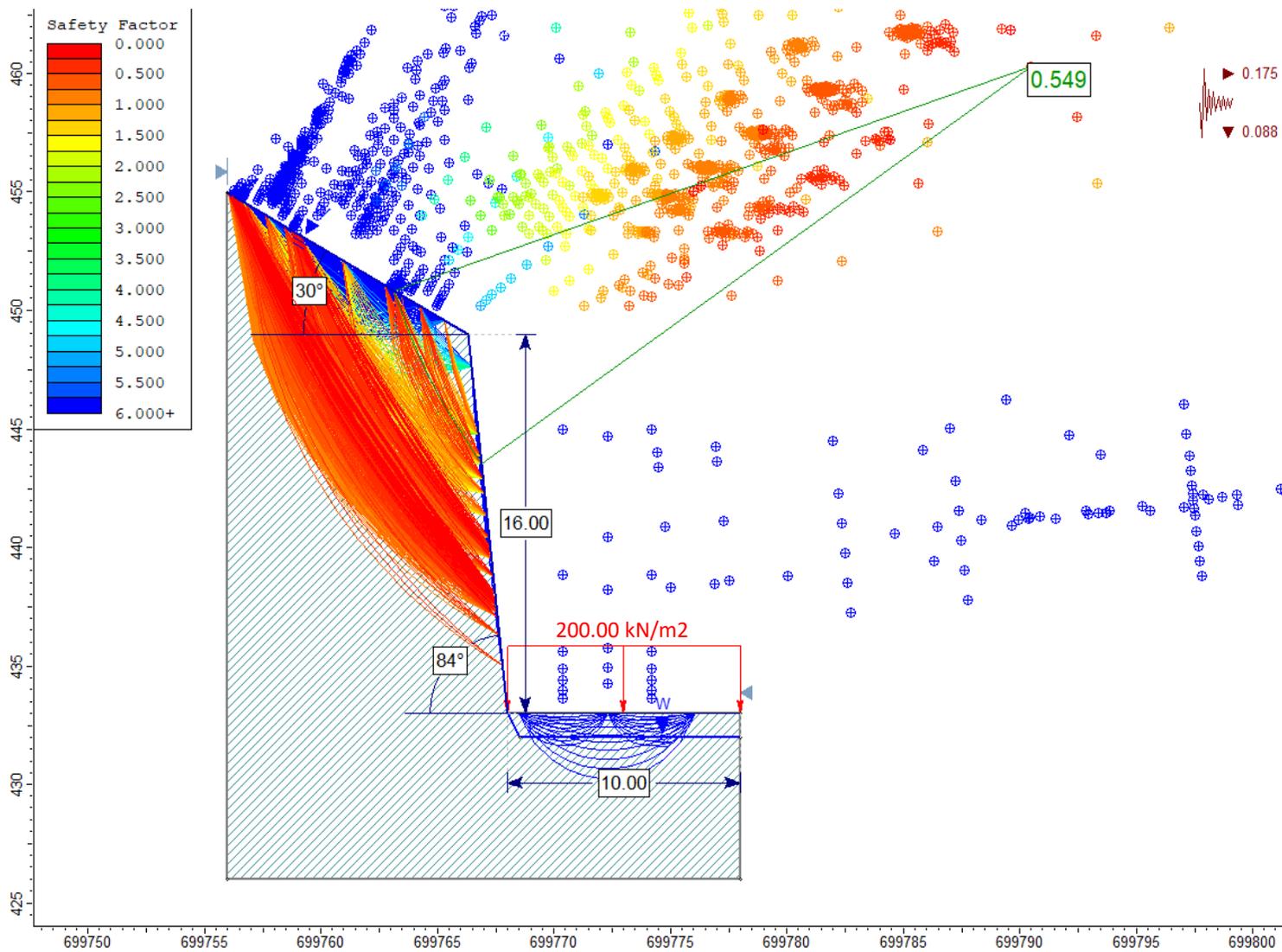


Figura 3.62: Análisis slide del talud PC-07, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.

3.6.9. Punto de control 08 entre progresivas km. 40+000 al km. 40+094.

Tabla 3.32: Localización y descripción del talud en el PC-08.

DATA GPS		DESCRIPCIÓN
Datum: WGS 84 Zona: 17S		La litología que conforma al talud, está dado por rocas de arenisca (espesor de estratos oscila entre 0.15m y 0.35m.), perteneciente a la Fm. Carhuaz.
Este (m.)	699949	El macizo rocoso se caracteriza por presentar un grado de meteorización moderado y de fracturamiento medio, formando bloques regulares a irregulares cuasicúbicos de tamaño medio. Geométricamente, el talud posee una altura de 12m., una inclinación de 85° y la cabeza del talud continua a la geoforma natural del terreno. Se identifican 3 familias de discontinuidades; entre ellas, la estratificación que se encuentra buzando hacia el lado lateral derecho del talud, mientras que, las otras dos diaclasas están formando cuñas. La abertura máxima en sus discontinuidades es de 25mm. y su relleno consta de óxidos (en pátinas), algo de roca triturada o nada.
Norte (m.)	9202164	
Cota (m.s.n.m.)	434	La evidencia de las condiciones señaladas puede causar inestabilidad en el talud, más aún, ante factores detonantes como la sismicidad y/o la precipitación pluvial por la saturación del material.



Foto 3.39: Afloramiento de areniscas, entre el Km.40+000 y Km. 40+094 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.
Coordenadas: E 699949; N 9202164; Cota= 434 m.s.n.m.

Tabla 3.33: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-08.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES		
Litología/ Formación	Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	Tipo	Dip	Dip Direction
Areniscas / Fm. Carhuaz	1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-regular	Estrato	41°	149°
	2=Lev Met	2=Med	2=Bloq-irregular	Familia D-1	79°	7°
	3=Mod	3=Bajo	3=Bloq y capas	Familia D-2	68°	285°
	4=Alt		4=Frac-Intenso			
	5=Comp Met					
	6=Suelo					
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
				Altura	12	
				Pie	10	
				Dirección	Talud	Cabeza
				Dip	85°	30°
3	2	2 / 45	Dip Direction	245°	245°	

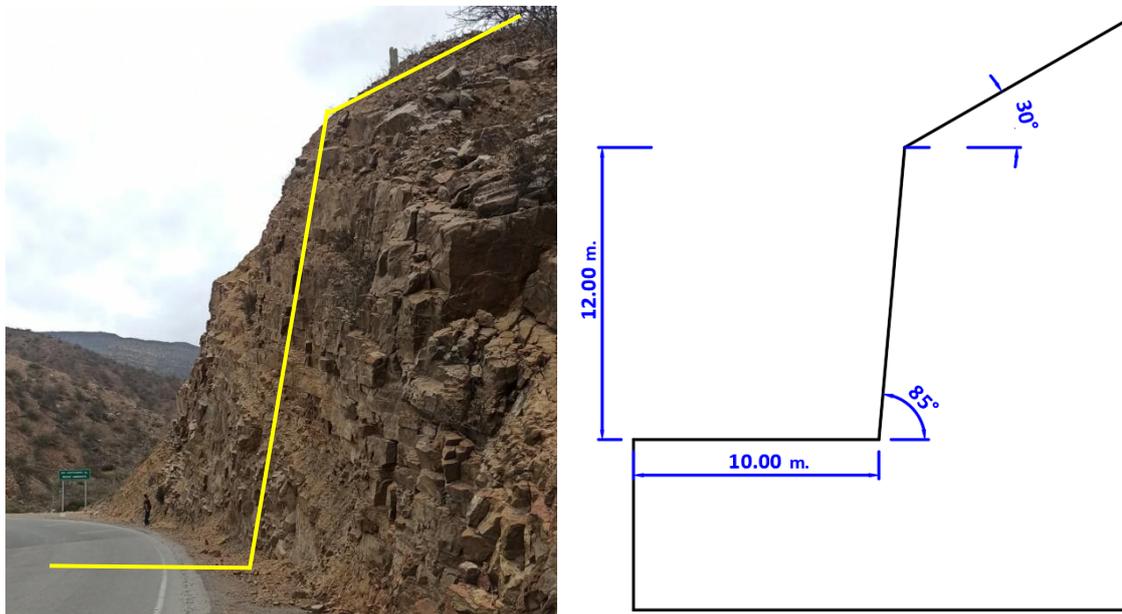


Foto 3.40: Vista perfil del talud PC-08, entre el Km.40+000 y Km. 40+094 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

Tabla 3.34: Cálculo de RQD del talud PC-08.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1)$	ND	L(m.)	λ	RQD (%)
	55	4.5	12.22	65.46

Tabla 3.35: Valoración RMR del talud PC-08.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
Parámetro	Rango de valores y valoraciones					Valor	
Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)	>250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	25-5 (2) 5-1 (1) <1 (0)	7	
RQD (%)	90%-100% (20)	75%-90% (17)	50%-75% (13)	25%-50% (6)	< 25% (3)	13	
Espaciamiento de la discontinuidad (m.)	> 2m. (20)	0,6m.-2m. (15)	0,2m.- 0,6m. (10)	0,06m.-0,2m. (8)	< 0,06m. (5)	10	
Persistencia de la discontinuidad	< 1 m. (6)	1-3 m. (4)	3-10 m. (2)	10-20 m. (1)	> 20 m. (0)	2	
Estado de las discontinuidades	Abertura	Nada (6)	< 0,1 mm. (5)	0,1-1,0 mm. (3)	1-5 mm. (1)	> 5 mm. (0)	0
	Rugosidad	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Ligeramente Rugosa (3)	Ondulada (1)	Suave (0)	3
	Relleno	Ninguno (6)	Relleno duro < 5 mm. (4)	Relleno duro > 5 mm. (2)	Relleno blando < 5 mm. (2)	Relleno blando > 5 mm. (0)	2
	Alteración	Inalterada (6)	Ligeramente alterada (5)	Moderadamente alterada (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
Agua subterránea	Seco (15)	Ligeramente húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)	10	
Valor total RMR						50	

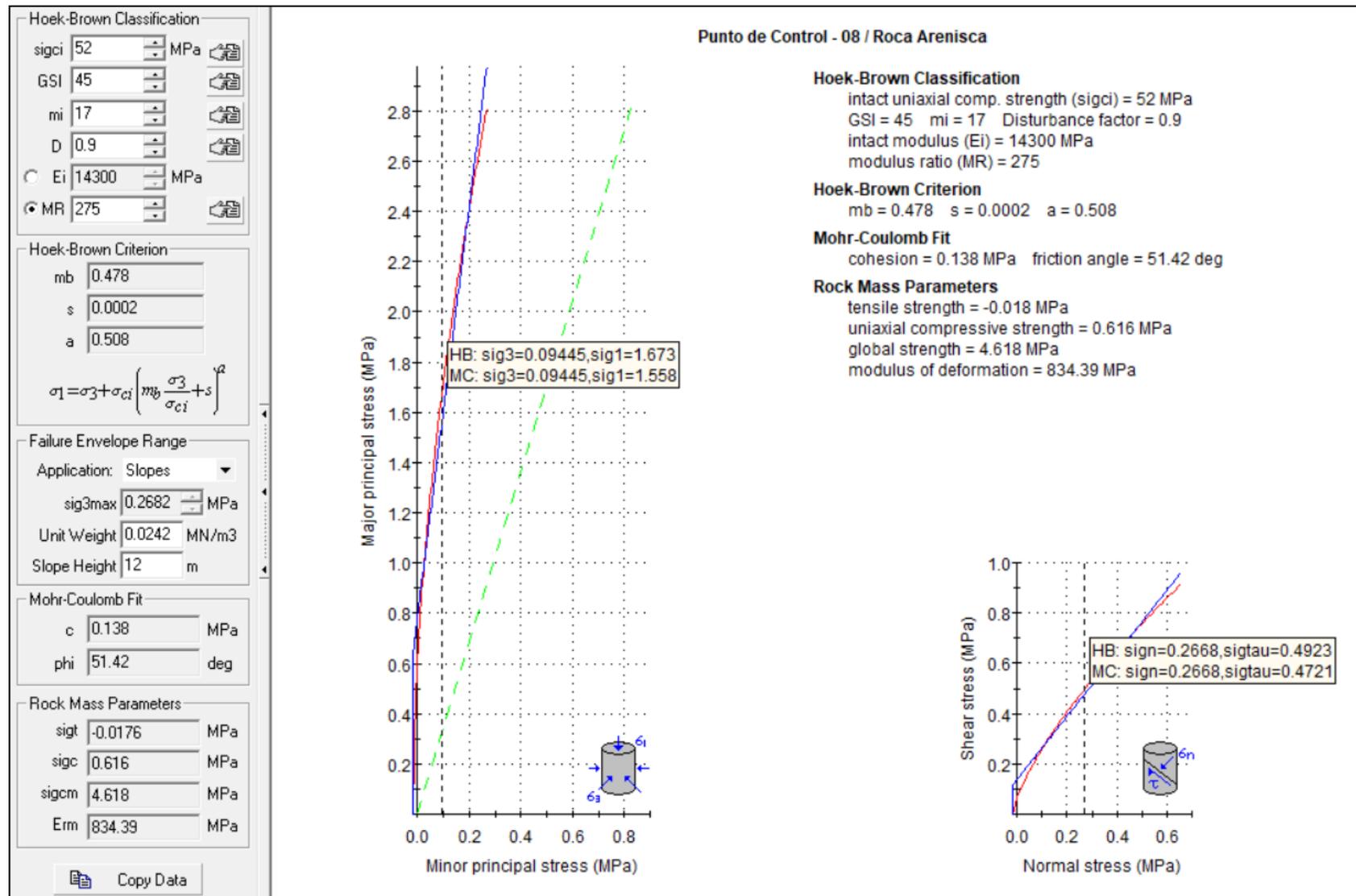


Figura 3.63: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de roca arenisca de la Fm. Carhuaz, en el talud PC-08.

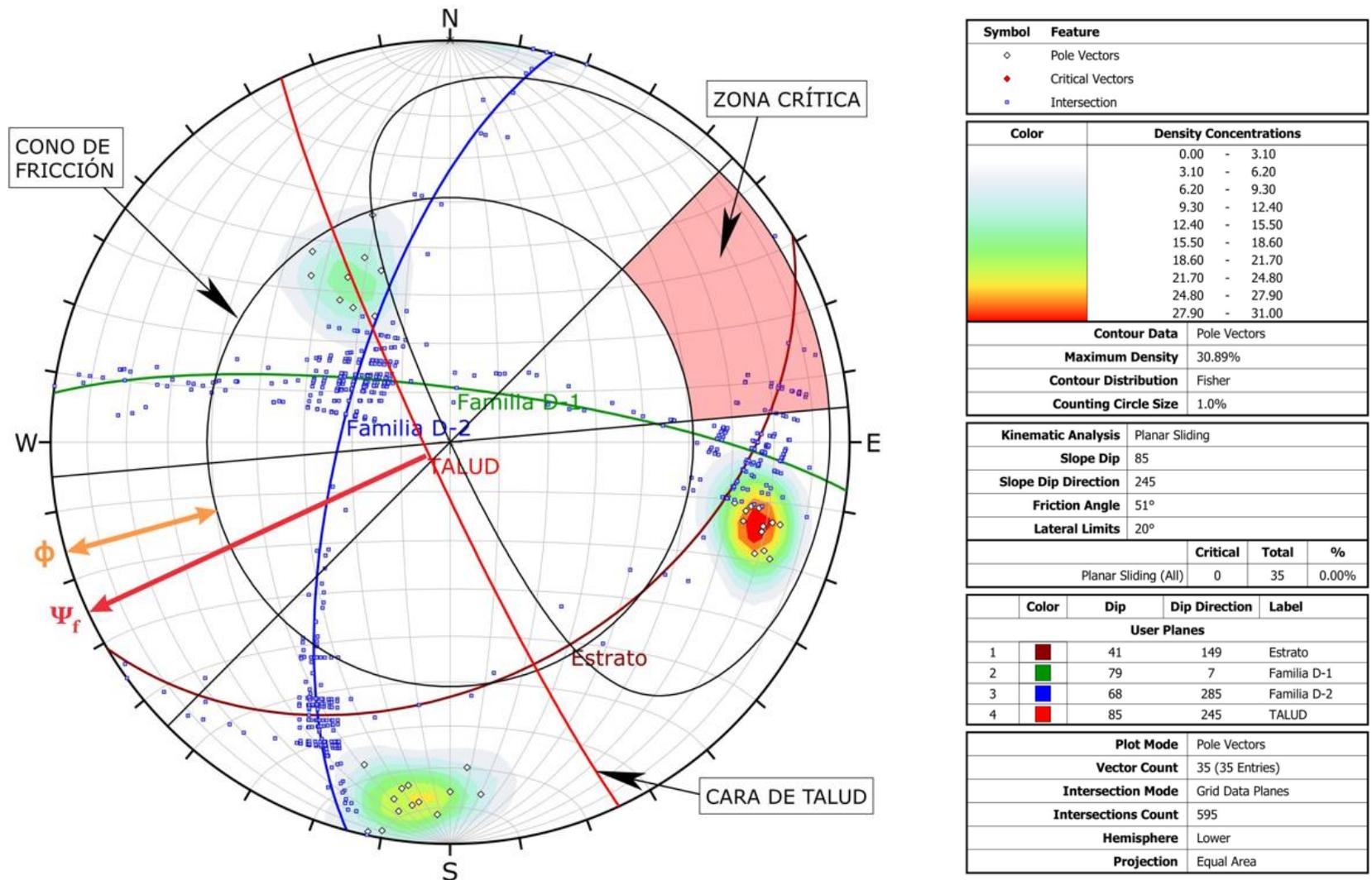


Figura 3.64: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-08, indicando una probabilidad de falla de 0.00 %.

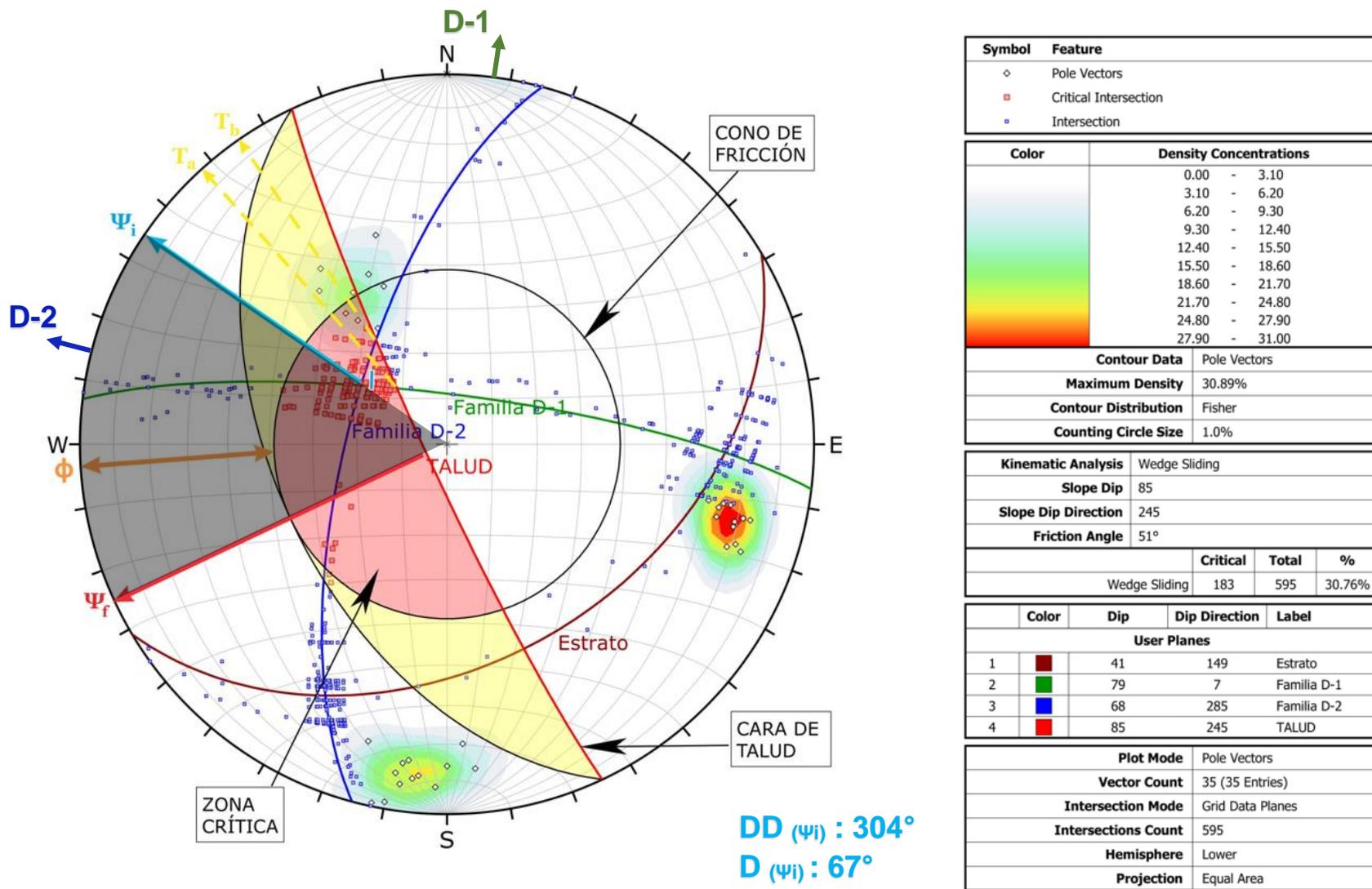


Figura 3.65: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-08, indicando una probabilidad de falla de 30.76 %.

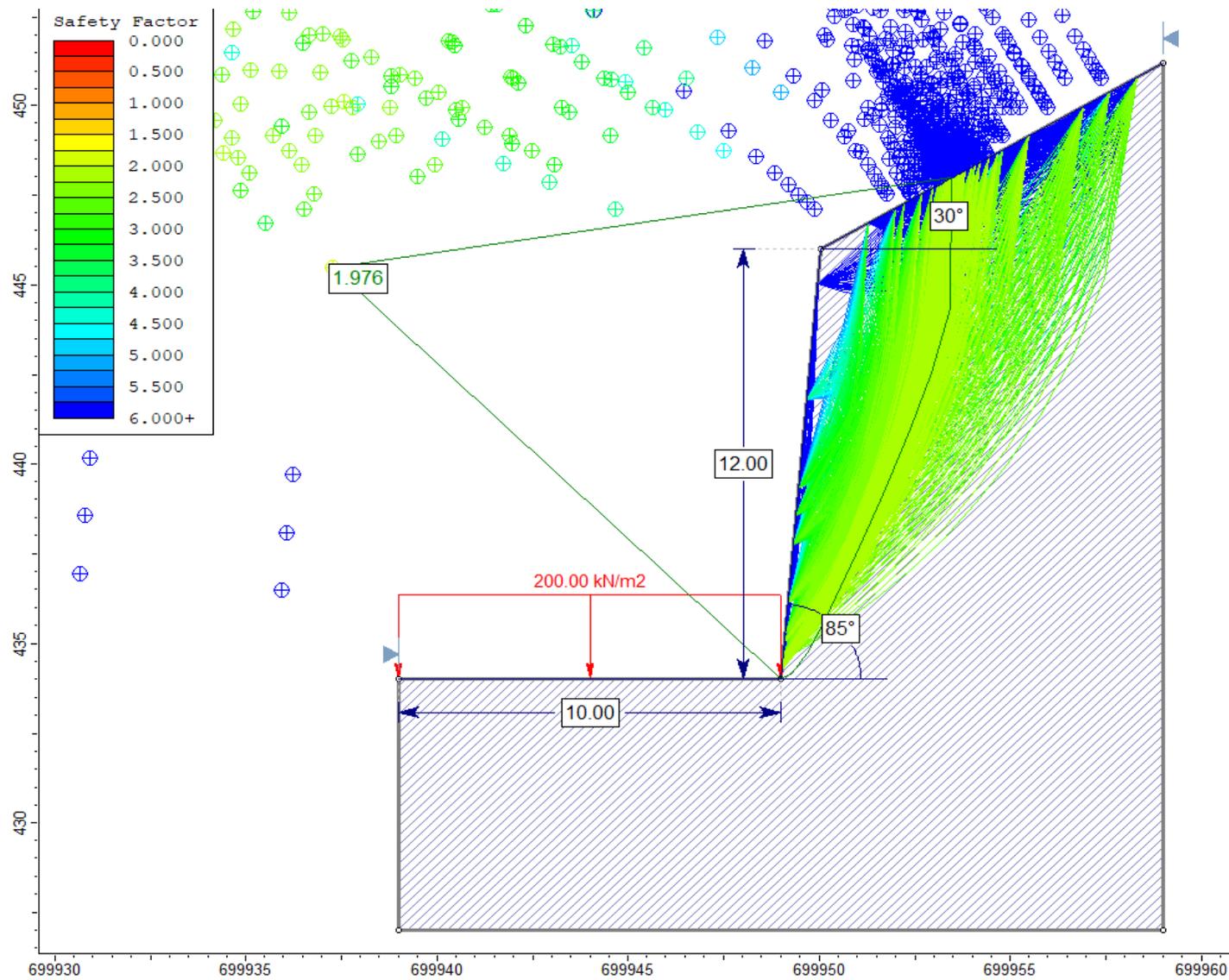


Figura 3.66: Análisis slide del talud PC-08, en Condiciones Normales.

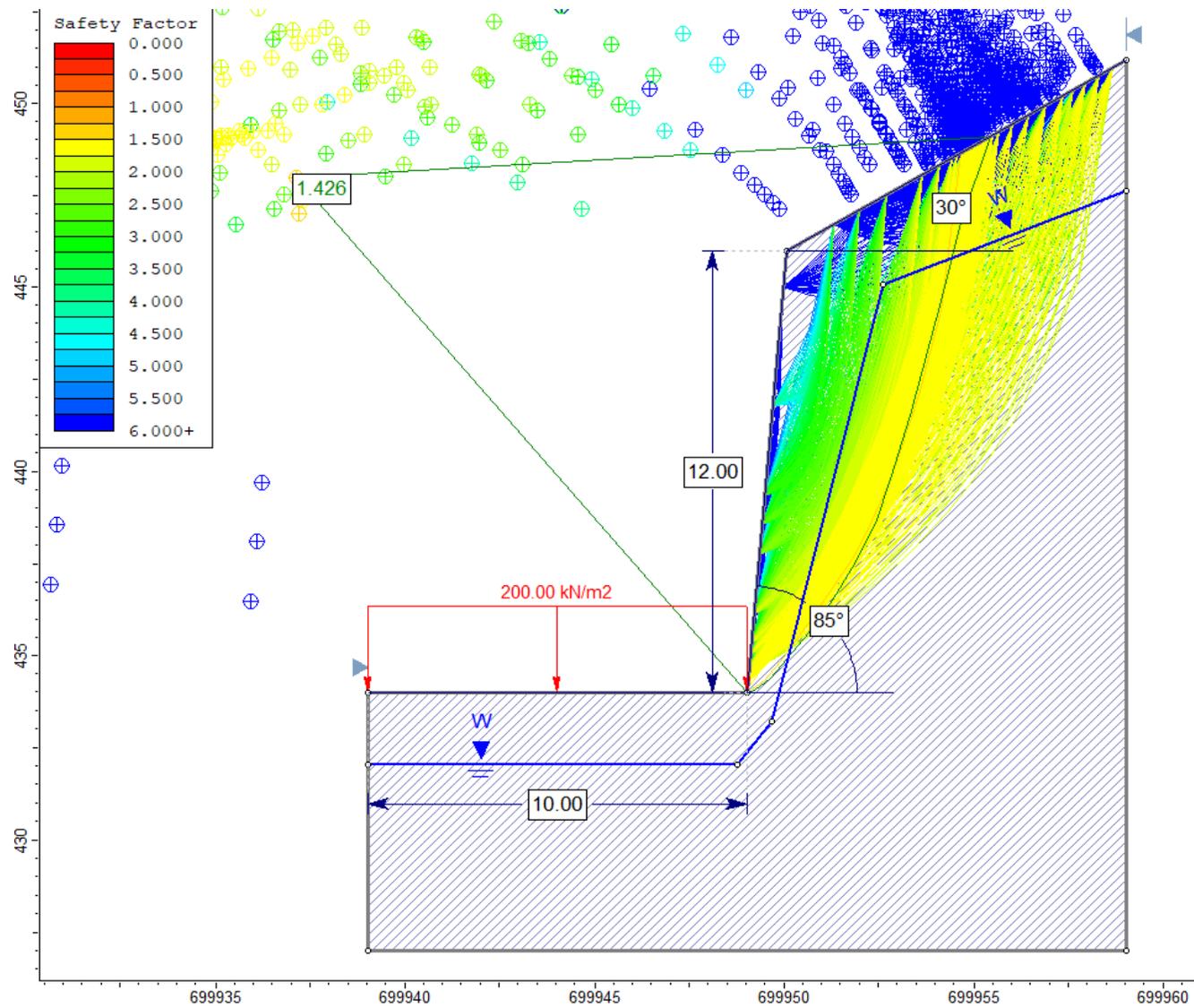


Figura 3.67: Análisis slide del talud PC-08, en condiciones de Saturación Parcial.

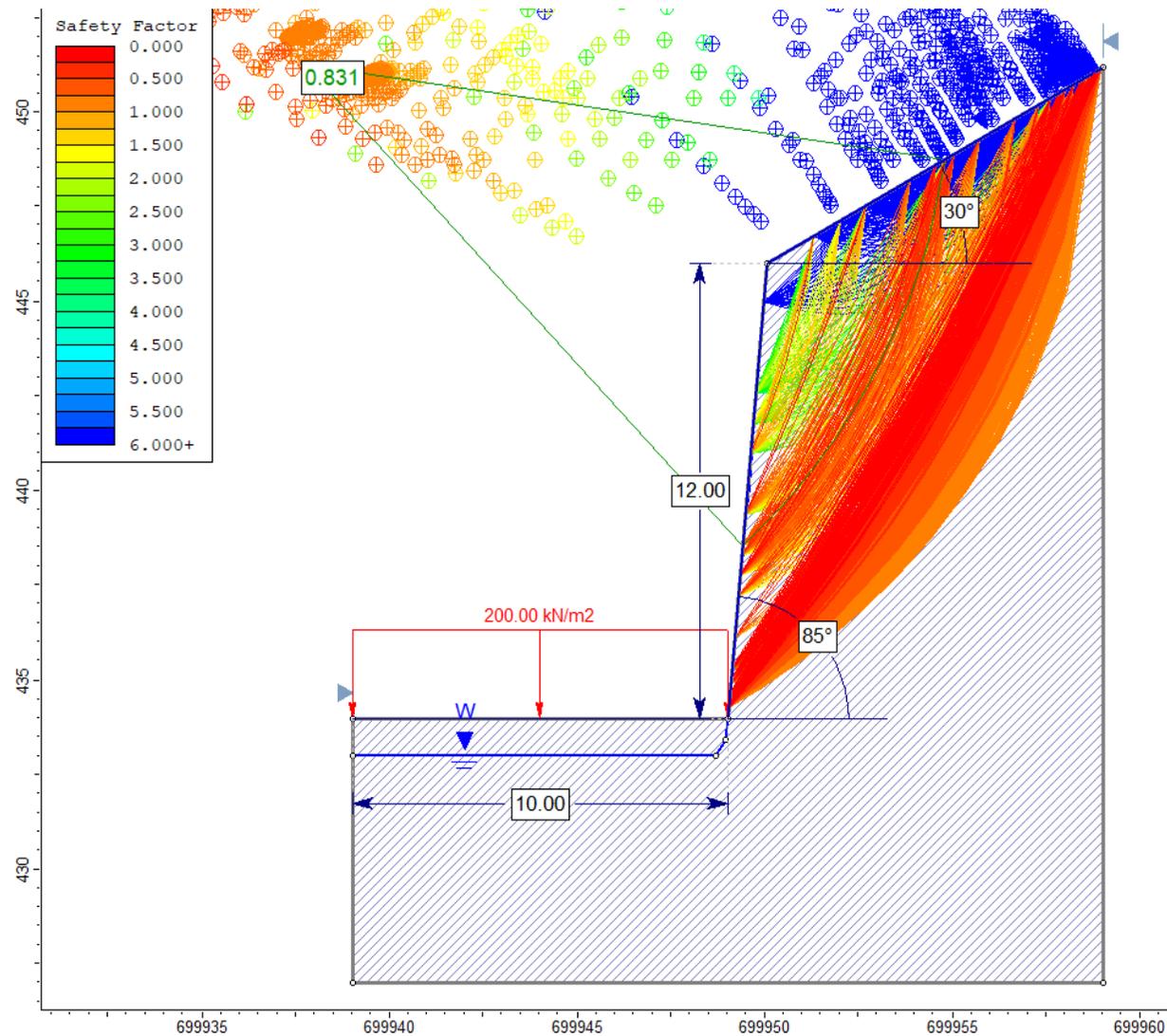


Figura 3.68: Análisis slide del talud PC-08, en condiciones de Saturación Total.

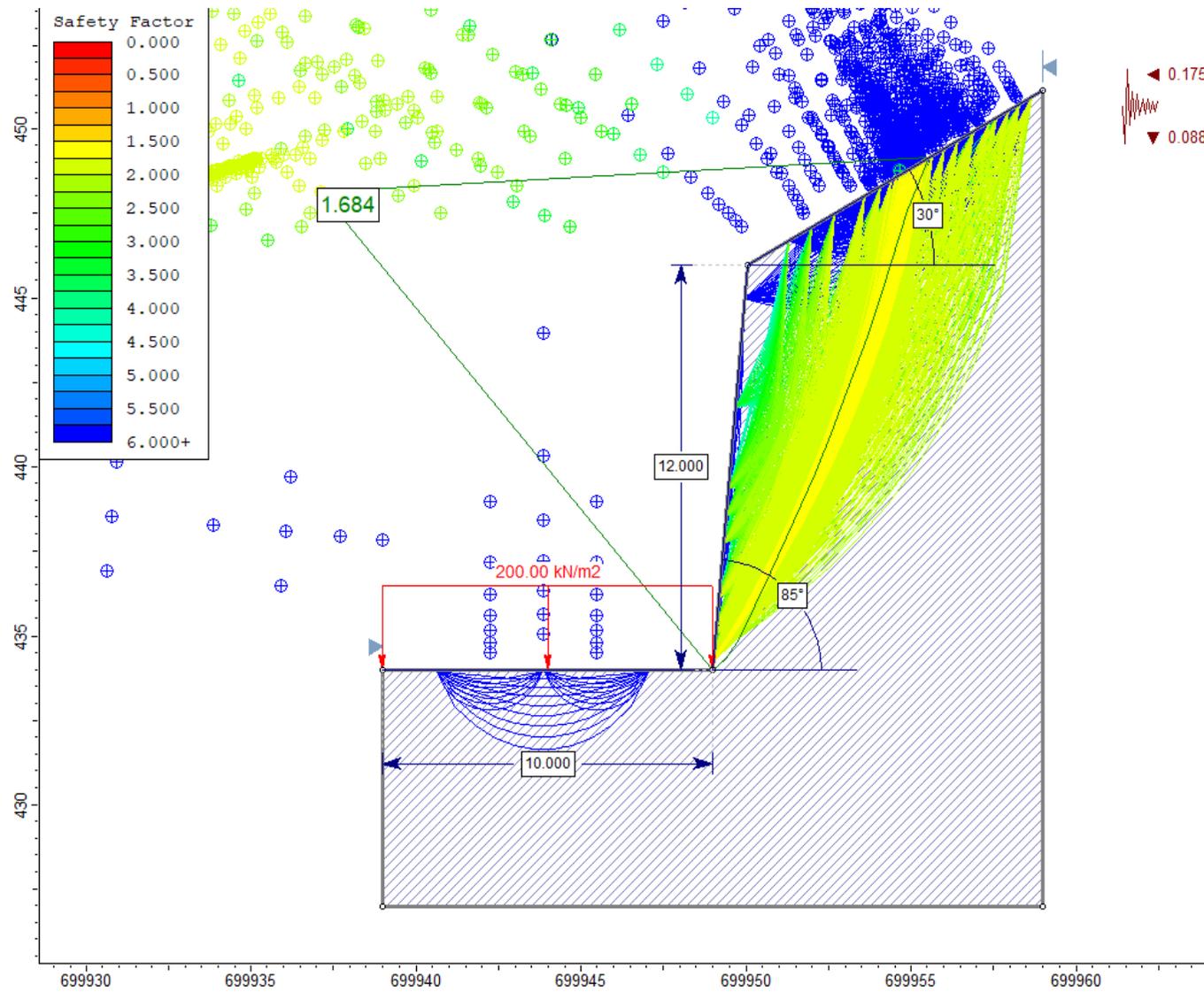


Figura 3.69: Análisis slide del talud PC-08, en condiciones de Sismicidad.

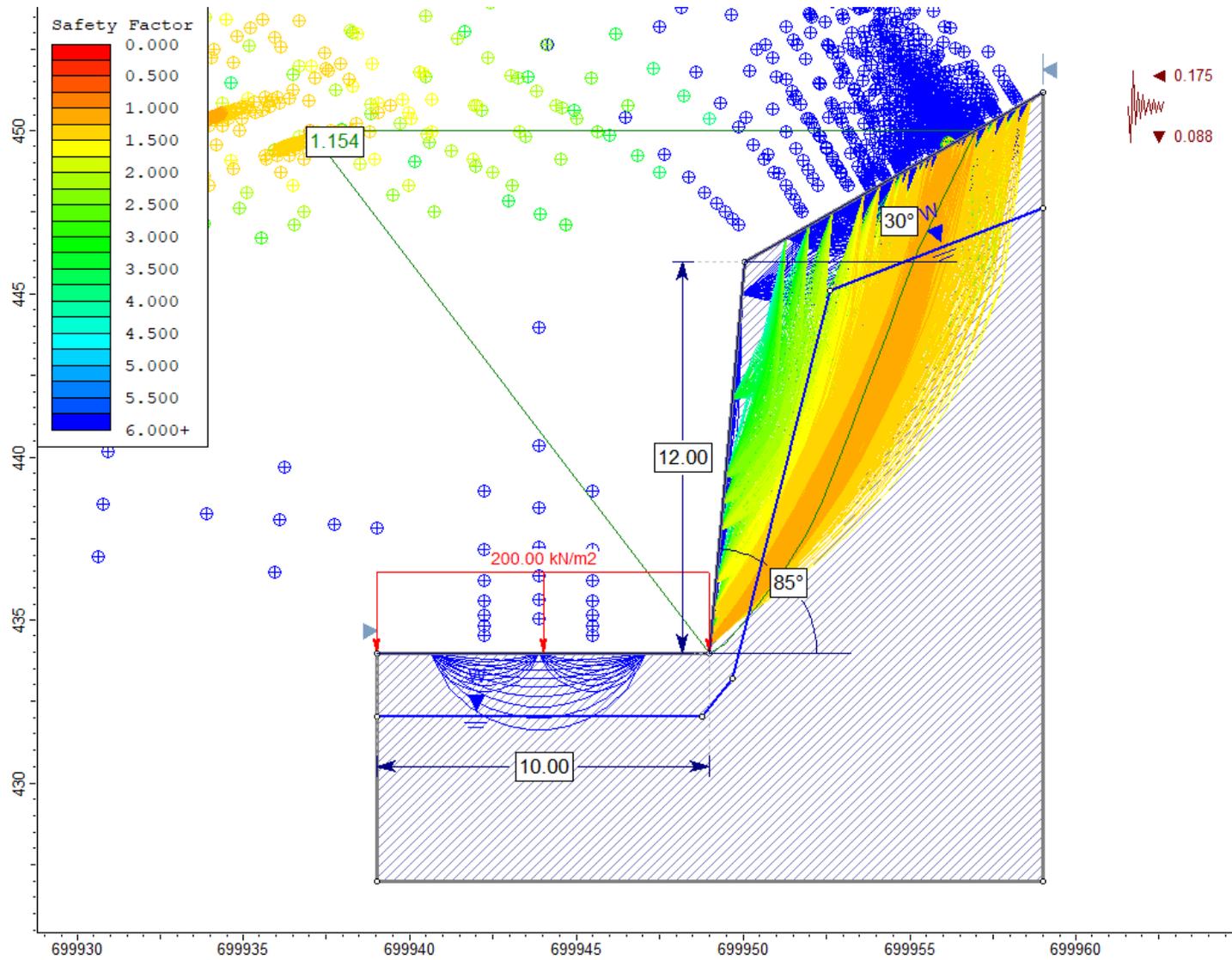


Figura 3.70: Análisis slide del talud PC-08, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.

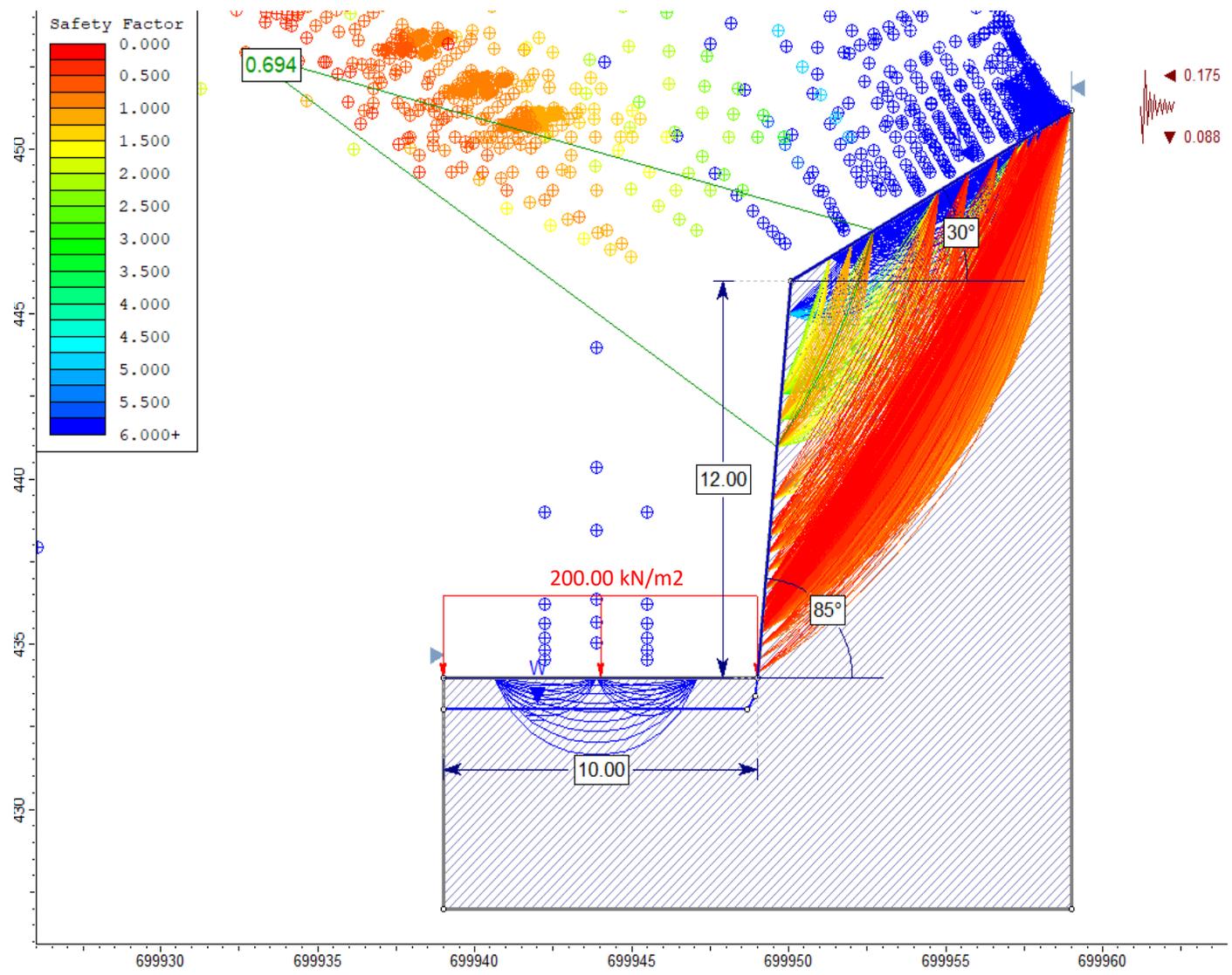


Figura 3.71: Análisis slide del talud PC-08, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.

3.6.10. Punto de control 09 entre progresivas km. 41+525 al km. 41+708.

Tabla 3.36: Localización y descripción del talud en el PC-09.

DATA GPS		DESCRIPCIÓN
Datum: WGS 84 Zona: 17S		<p>La litología que forma el talud, consta de rocas calizas nodulares (espesor de estratos oscila entre 0.25m. y 0.75m.) , perteneciente a la Fm. Chúlec. Geométricamente, el talud posee una altura de 20m., una inclinación de 80° y la cabeza del talud continua a la geoforma natural del terreno. El macizo rocoso, muestra un grado de meteorización moderado a leve y de fracturamiento bajo, formando bloques regulares cuasicúbicos de gran tamaño. Se identifican 3 familias de discontinuidades, donde los planos de estratificación se observan como grandes planchas de roca buzando hacia el talud; mientras que, la intersección de las otras discontinuidades forman cuñas. La abertura entre sus diaclasas alcanza los 3.2mm. y su relleno consta roca triturada, calcita y óxidos (en pátinas), pudiéndose generar deslizamientos planares afectados por la precipitación pluvial y sismicidad, los cuales inestabilizan dicho talud.</p> <p>Estas condiciones, pueden afectar la estabilidad del talud y se considera evaluar su comportamiento ante otros factores detonantes como la sismicidad y la precipitación.</p>
Este (m.)	700848	
Norte (m.)	9201477	
Cota (m.s.n.m.)	434	



Foto 3.41: Afloramiento de areniscas, entre el Km.41+525 y Km. 41+708 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.
Coordenadas: E 700848; N 9201477; Cota= 434 m.s.n.m.

Tabla 3.37: Caracterización del Macizo rocoso, orientación de las discontinuidades y geometría del Talud PC-09.

MACIZO ROCOSO				ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES		
Litología/ Formación	Meteorización	Grado de Fracturamiento	GSI	Tipo	Dip	Dip Direction
Calizas nodulares/ Fm. Chúlec	1=Fresco	1=Alto	1=Bloq-regular	Estrato	61°	206°
	2=Lev Met	2=Med	2=Bloq-irregular	Familia D-1	44°	26°
	3=Mod	3=Bajo	3=Bloq y capas	Familia D-2	85°	275°
	4=Alt		4=Frac-Intenso			
	5=Comp Met					
	6=Suelo					
				GEOMETRÍA DEL TALUD		
				Altura	20	
				Pie	10	
				Dirección	Talud	Cabeza
				Dip	80°	30°
3-2	3	1 / 51	Dip Direction	202°	202°	

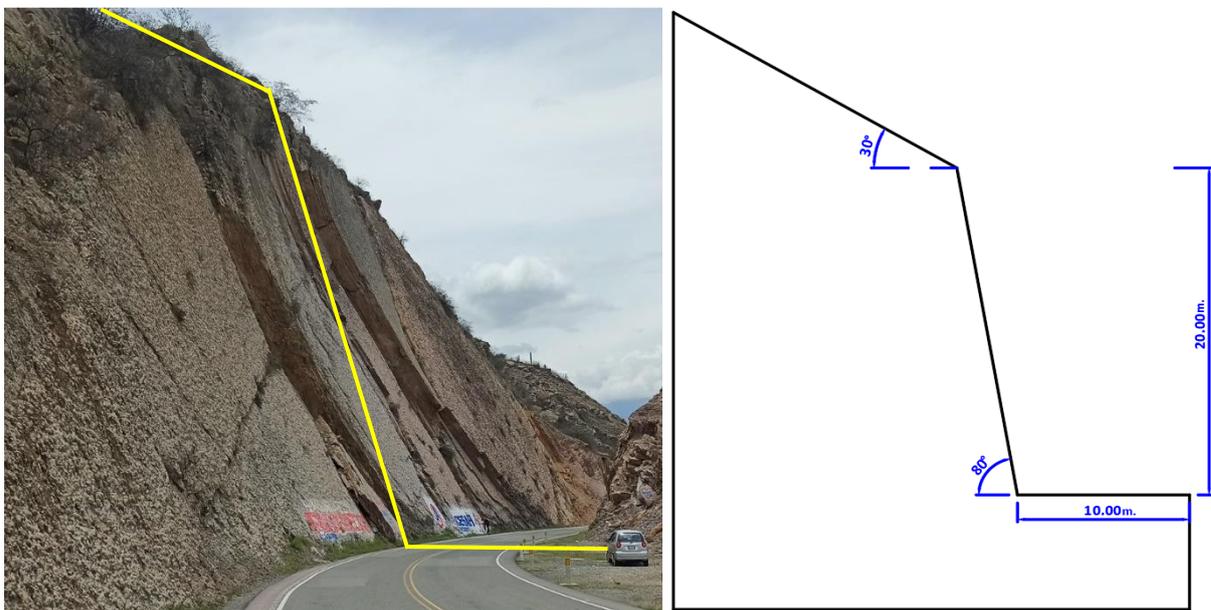


Foto 3.42: Vista perfil del talud PC-09, entre el Km.41+525 y Km. 41+708 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca.

Tabla 3.38: Cálculo de RQD del talud PC-09.

CÁLCULO DEL RQD				
$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1)$	ND	L(m.)	λ	RQD (%)
	39	4.5	8.67	78.47

Tabla 3.39: Valoración RMR del talud PC-09.

VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO (RMR)							
Parámetro	Rango de valores y valoraciones					Valor	
<i>Resistencia a la compresión uniaxial (MPa)</i>	250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	25-5 (2) 5-1 (1) <1 (0)	7	
<i>RQD (%)</i>	90%-100% (20)	75%-90% (17)	50%-75% (13)	25%-50% (6)	< 25% (3)	17	
<i>Espaciamiento de la discontinuidad (m.)</i>	> 2m. (20)	0,6m.-2m. (15)	0,2m.- 0,6m. (10)	0,06m.-0,2m. (8)	< 0,06m. (5)	10	
Estado de las discontinuidades	<i>Persistencia de la discontinuidad</i>	< 1 m. (6)	1-3 m. (4)	3-10 m. (2)	10-20 m. (1)	> 20 m. (0)	1
	<i>Abertura</i>	Nada (6)	< 0,1 mm. (5)	0,1-1,0 mm. (3)	1-5 mm. (1)	> 5 mm. (0)	1
	<i>Rugosidad</i>	Muy Rugosa (6)	Rugosa (5)	Ligeramente Rugosa (3)	Ondulada (1)	Suave (0)	5
	<i>Relleno</i>	Ninguno (6)	Relleno duro < 5 mm. (4)	Relleno duro > 5 mm. (2)	Relleno blando < 5 mm. (2)	Relleno blando > 5 mm. (0)	2
	<i>Alteración</i>	Inalterada (6)	Ligeramente alterada (5)	Moderadamente alterada (3)	Muy Alterada (1)	Descompuesta (0)	3
	<i>Agua subterránea</i>	Seco (15)	Ligeramente húmedo (10)	Húmedo (7)	Goteando (4)	Agua fluyendo (0)	10
Valor total RMR						56	

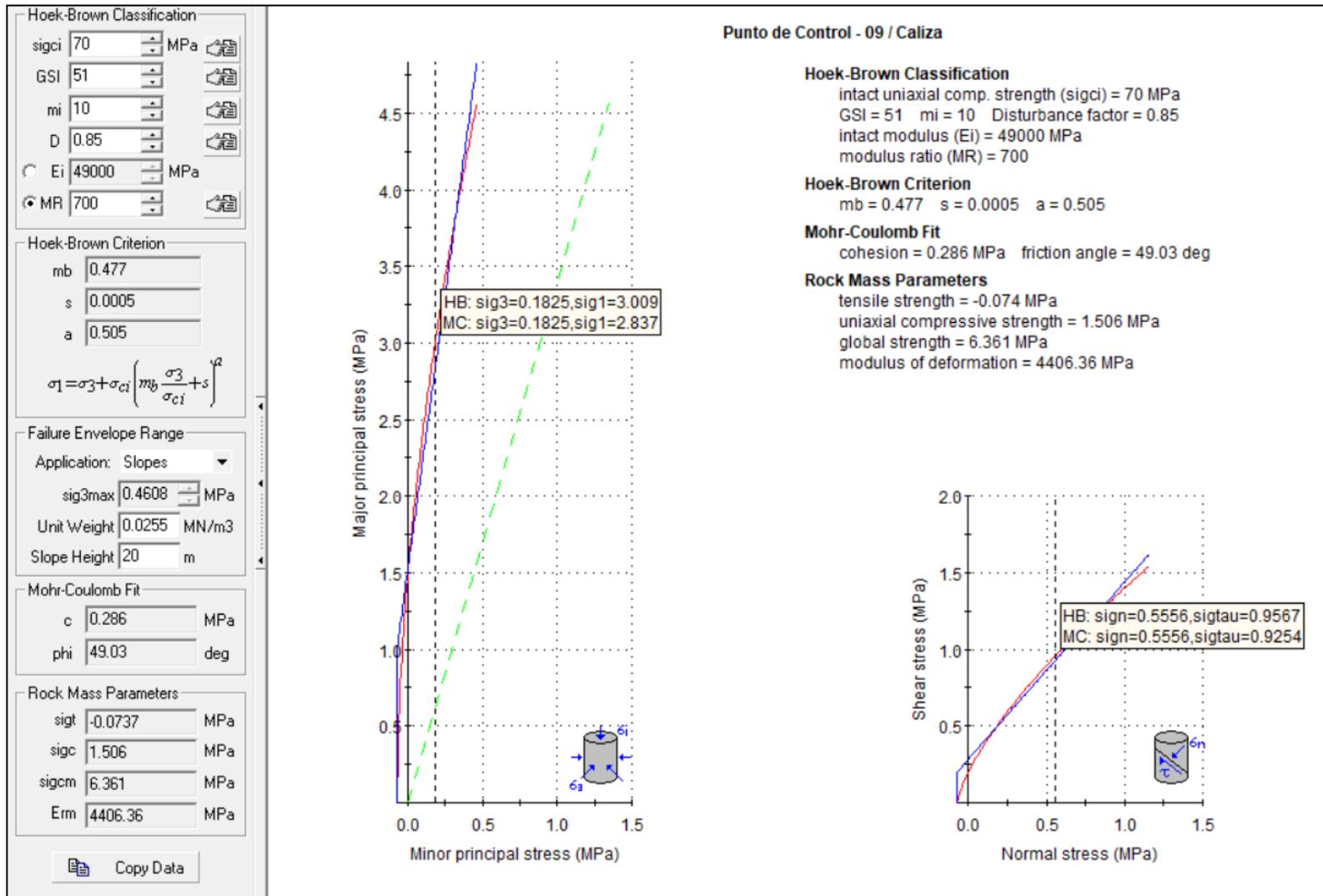


Figura 3.72: Representación gráfica de relación entre del esfuerzo principal mayor – esfuerzo menor (izquierda) y relación de esfuerzo normal – esfuerzo de corte (derecha); de roca caliza de la Fm. Chúlec, en el talud PC-09.

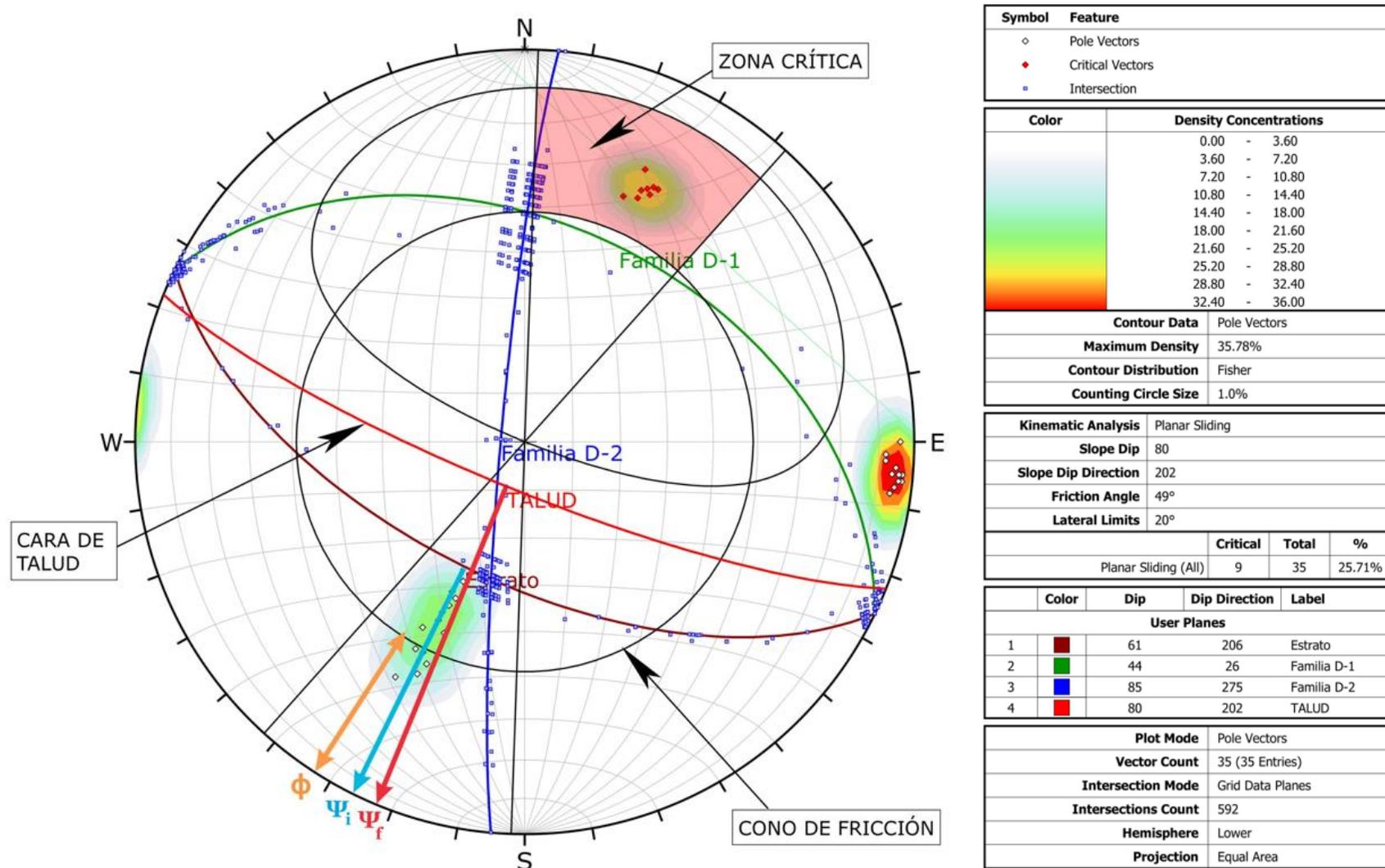
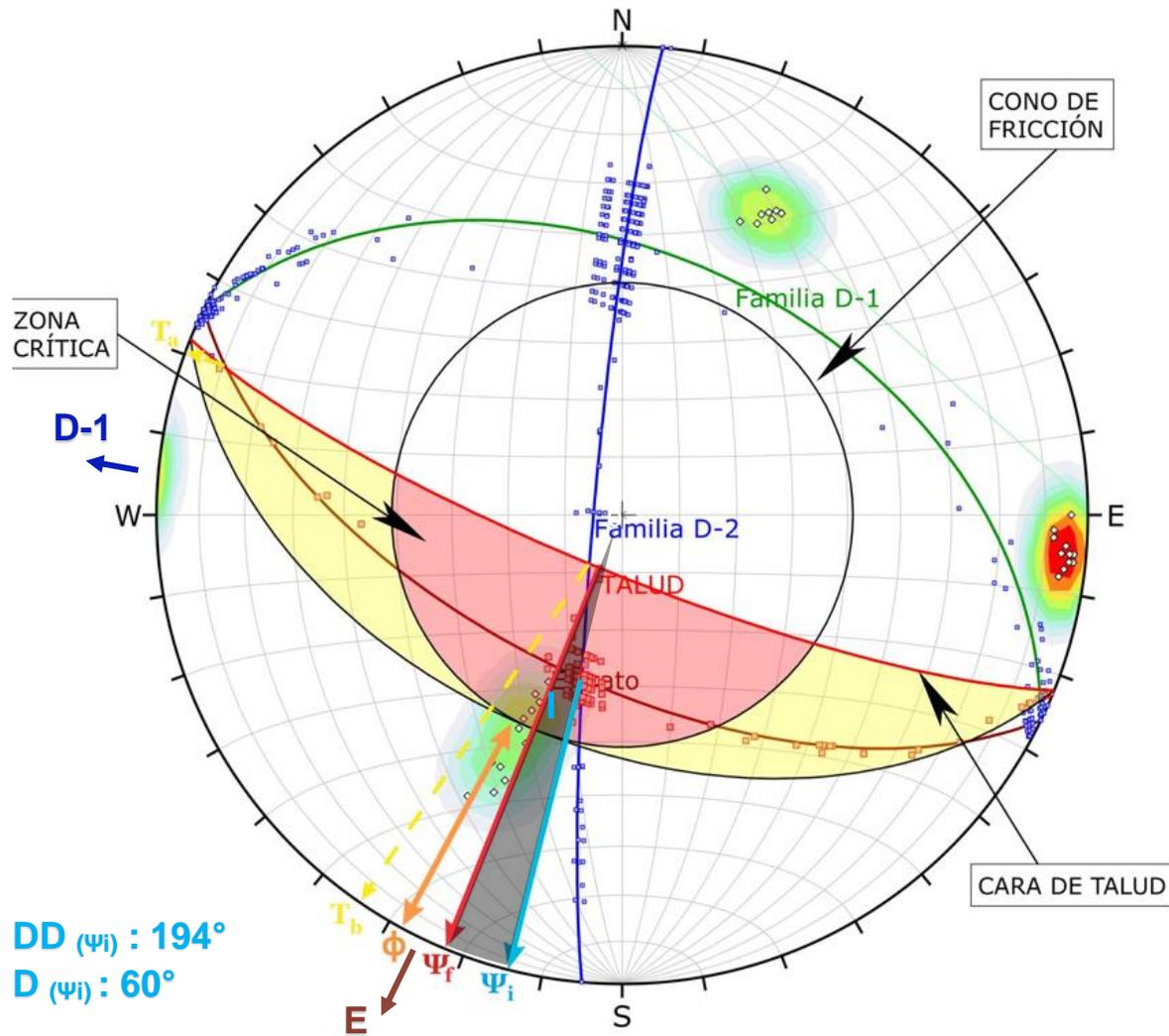


Figura 3.73: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo planar, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-09, indicando una probabilidad de falla de 25.71 %.



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors
■	Critical Intersection
■	Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.60
	3.60 - 7.20
	7.20 - 10.80
	10.80 - 14.40
	14.40 - 18.00
	18.00 - 21.60
	21.60 - 25.20
	25.20 - 28.80
	28.80 - 32.40
	32.40 - 36.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	35.78%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	80
Slope Dip Direction	202
Friction Angle	49°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	176	592	29.73%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	61	206	Estrato
2	44	26	Familia D-1
3	85	275	Familia D-2
4	80	202	TALUD

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	35 (35 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	592
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 3.74: Análisis estereográfico y cinemático para deslizamiento tipo cuña, en proyección estereográfica (Software Dips) de las discontinuidades del macizo rocoso en el talud PC-09, indicando una probabilidad de falla de 29.73 %.

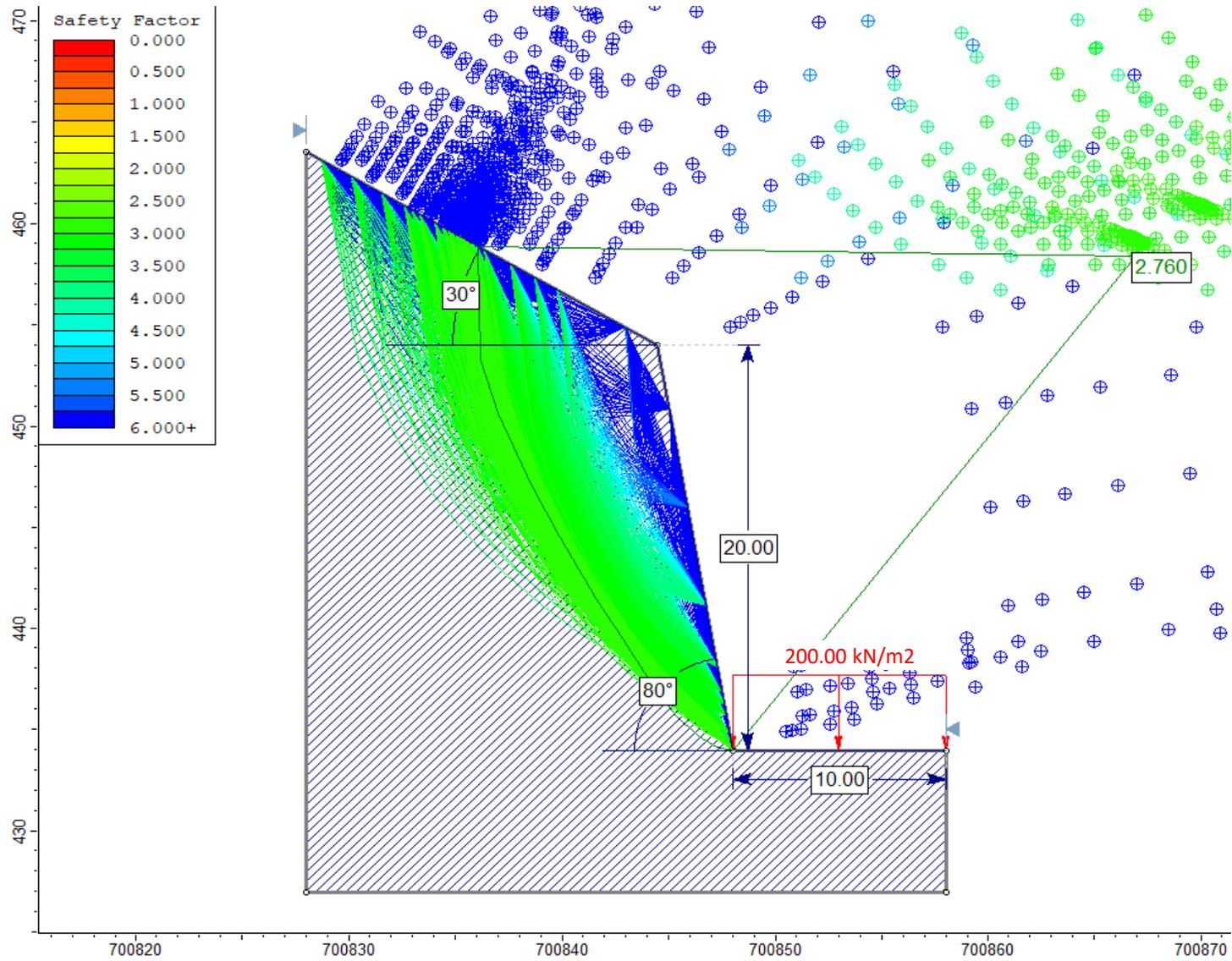


Figura 3.75: Análisis slide del talud PC-09, en Condiciones Normales.

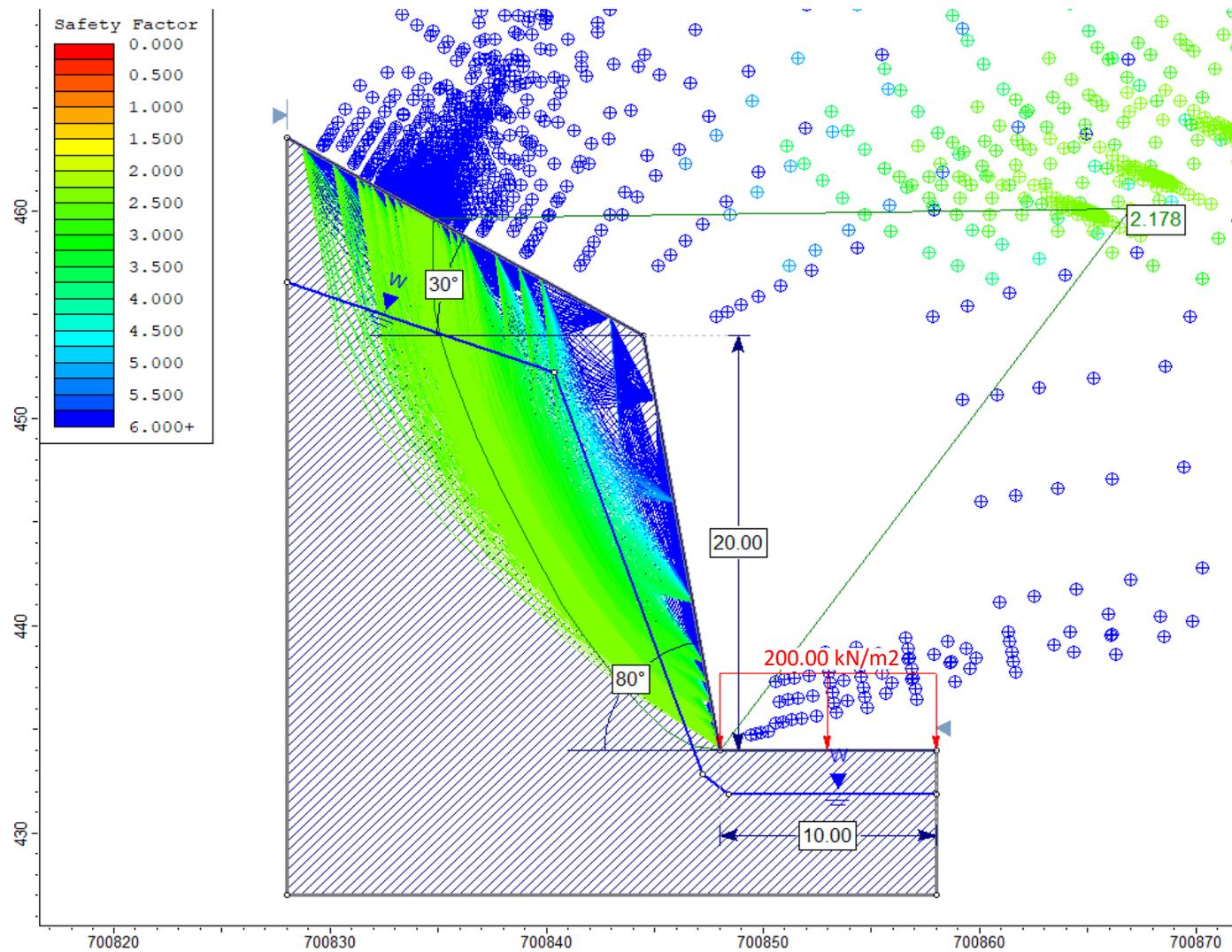


Figura 3.76: Análisis slide del talud PC-09, en condiciones de Saturación Parcial.

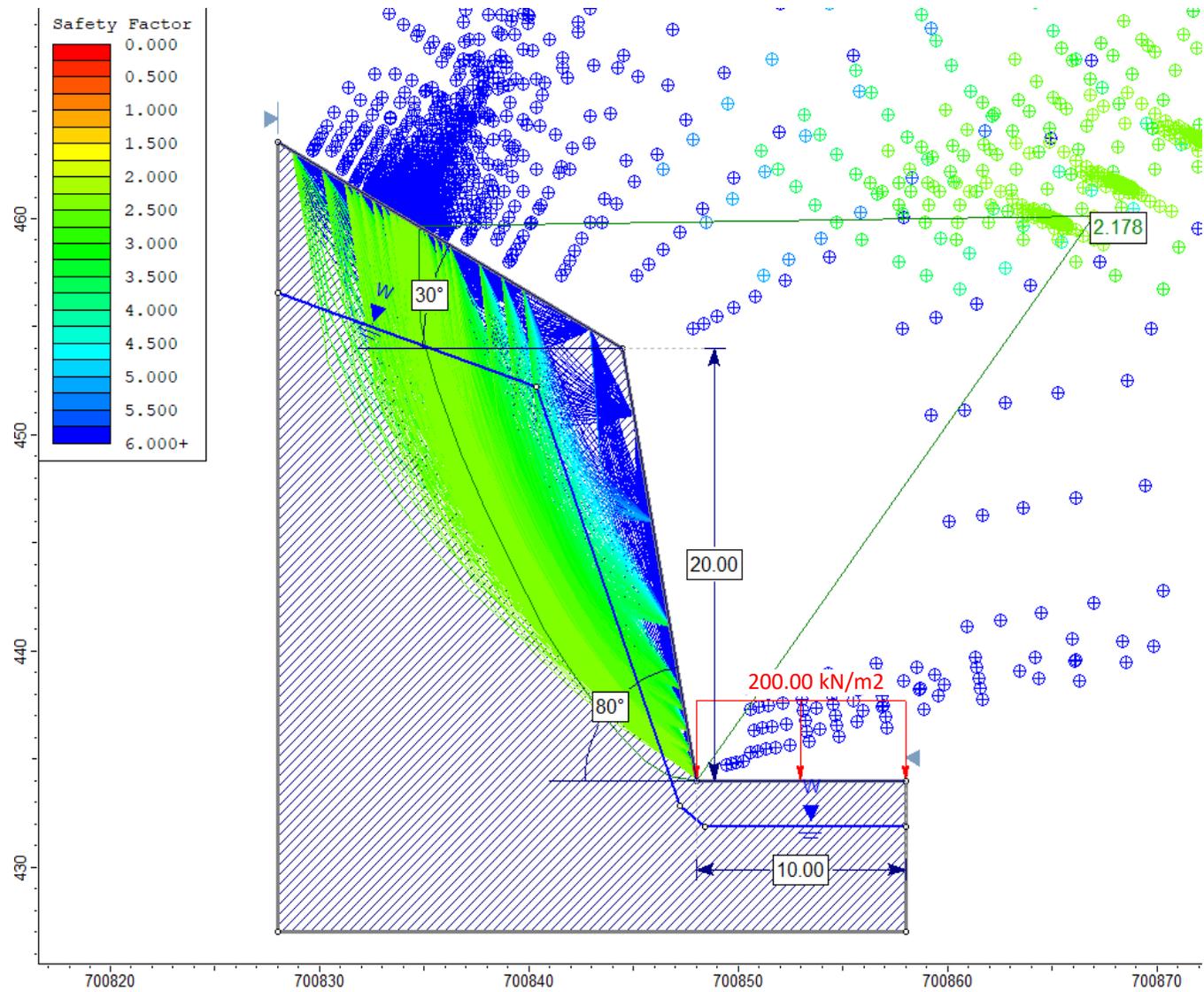


Figura 3.77: Análisis slide del talud PC-09, en condiciones de Saturación Total.

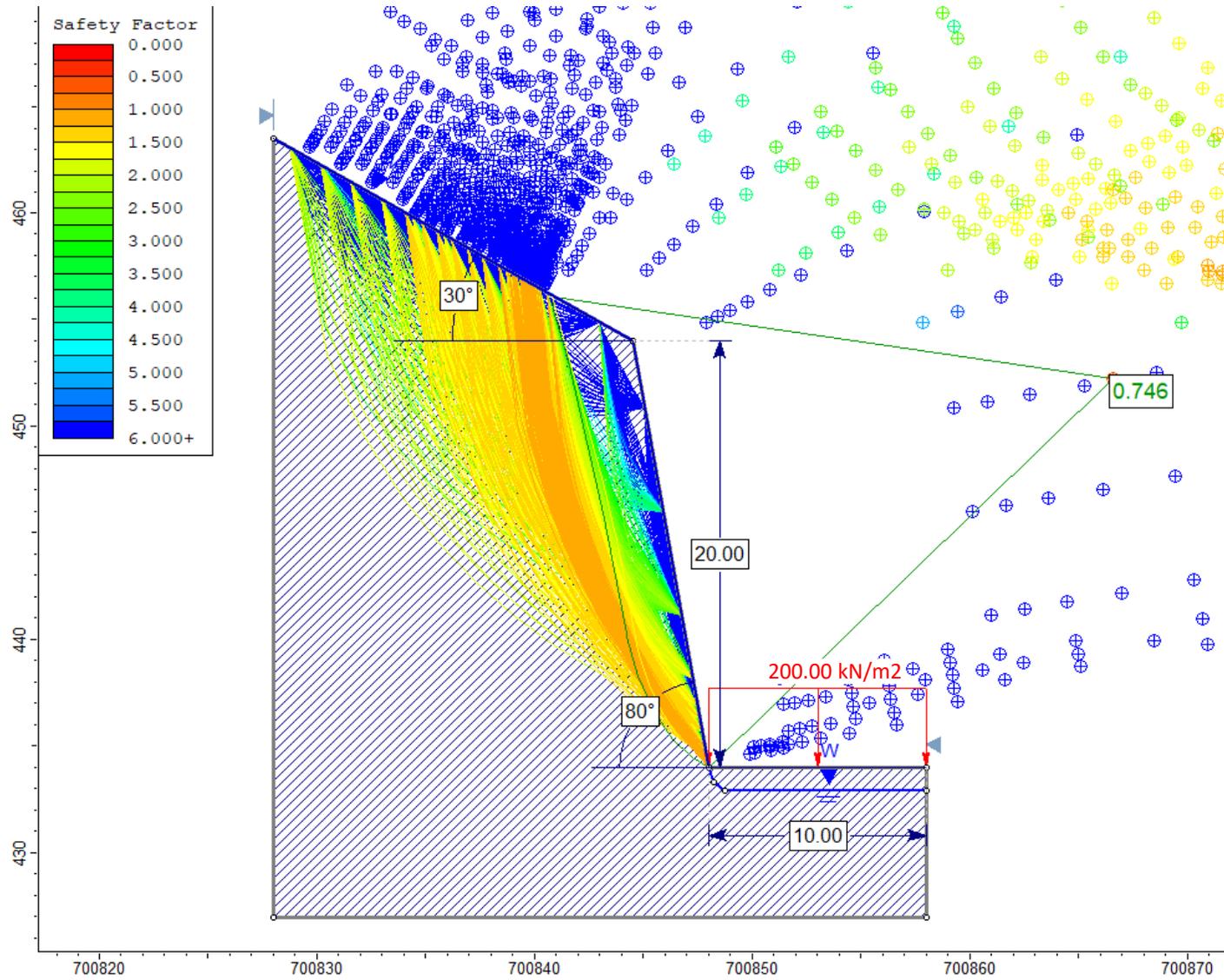


Figura 3.78: Análisis slide del talud PC-09, en condiciones de Sismicidad.

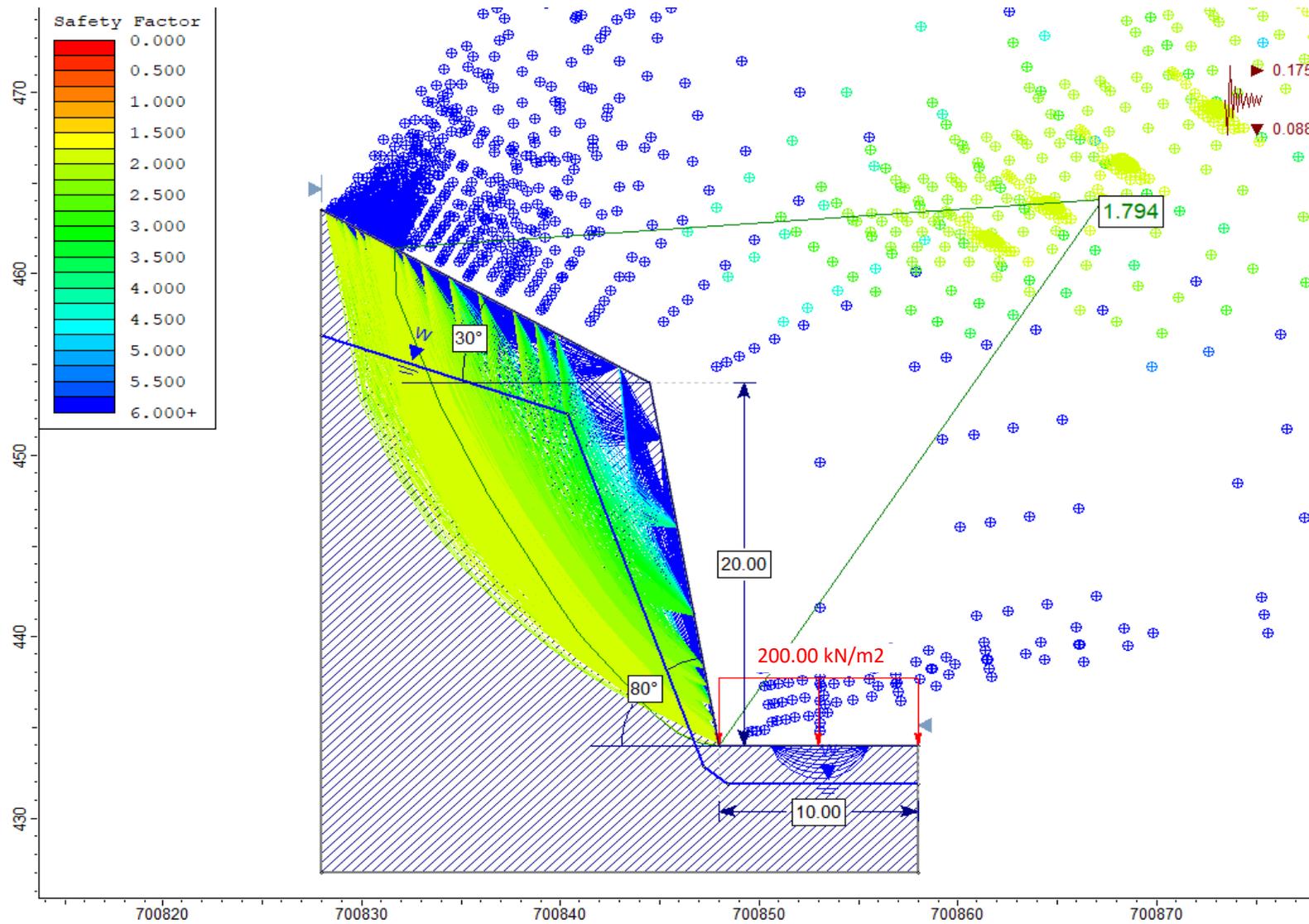


Figura 3.79: Análisis slide del talud PC-09, en condiciones de Saturación Parcial y Sismicidad.

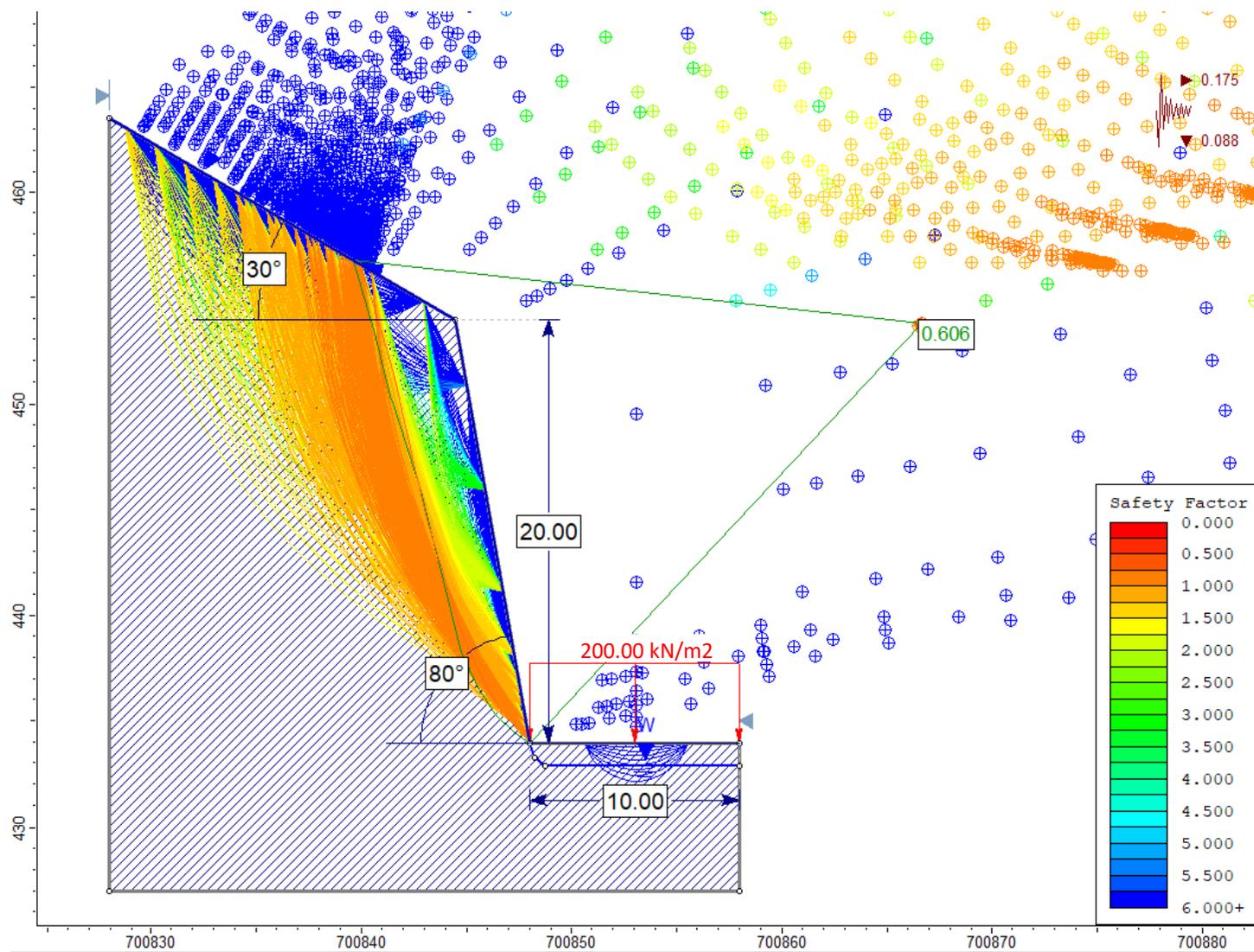


Figura 3.80: Análisis slide del talud PC-09, en condiciones de Saturación Total y Sismicidad.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos y sus correspondientes análisis, se construyen los modelos geológico, geotécnico y numérico que determinan la inestabilidad geotécnica de los macizos rocosos y depósitos cuaternarios de taludes entre el Km. 34+700 y Km. 42+200, de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca.

4.1.1. Modelo Geológico.

Con el cálculo de áreas en el Software ArcGIS v.10.8 (Área de cobertura de Formación estratigráfica/Área de estudio), se obtuvo que la geología de la zona de investigación, se constituye principalmente de rocas sedimentarias (82.5%), seguidas de rocas intrusivas (7.5%), además de, depósitos cuaternarios (10%); agrupadas en sus correspondientes unidades estratigráficas, de acuerdo a sus características litológicas y otros rasgos distintivos, tal y como se muestra en la tabla 4.1.

Se identifican rocas de areniscas, con escasas areniscas cuarzosas intercaladas con delgadas capas de limolitas grises (identificable en corte de quebrada), pertenecientes a la Formación Carhuaz; areniscas blancas, pertenecientes a la Formación Farrat; areniscas calcáreas y limolitas ferruginosas, pertenecientes a la Formación Inca; calizas arenosas fosilíferas, limolitas calcáreas y margas, pertenecientes a la Formación Chúlec; granodiorita y monzogranito pertenecientes al Batolito de la Costa; depósitos coluviales compuestos por bloques, cantos y gravas de aristas angulosas,; depósitos coluvio-aluviales, compuestos por cantos, gravas y algunos bloques de aristas subangulosas en matriz limo arenosa; depósitos aluviales, compuesto por cantos, gravas y bloques subredondeados; depósitos antropogénicos compuestos de una variabilidad de

tamaño, forma y origen de rocas; y depósito fluvial compuesto por cantos, bloques redondeados y arena (cobertura mínima del área de estudio bajo el dique de la Presa Gallito Ciego).

Los constiyuyentes litológicos de las Formaciones estratigráficas anteriormente mencionadas, se encuentran mayormente concordantes entre sí.

Tabla 4.1: Unidades estratigráficas identificadas en el área de investigación.

LEYENDA				
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	SIMBOLOGÍA
CUATERNARIO	RECIENTE		Depósito Antrópico	 Qh-an
			Depósito Coluvio-aluvial	 Qh-coal
			Depósito Coluvial	 Qh-co
			Depósito aluvial	 Qh-al
			Depósito Fluvial	 Qh-fl
CRETÁCICO	INFERIOR		Batolito de la Costa	 KP-mgr
			Monzogranito	 KsP-gd
			Granodiorita	 KsP-gd
			Formación Chúlec	 Ki-chu
			Formación Inca	 Ki-in
			Grupo Goyllarisquizga	Formación Farrat Formación Carhuaz

Entre las geoestructuras, se evidencian deformaciones dúctiles y frágiles a escala regional y local, debido al tectonismo gobernados por fuerzas de distensión y compresión, donde ésta última, probablemente haya sido coadyuvada también por el empuje de las intrusiones. Las grandes masas de roca plegada (deformación dúctil) han originado dentro del área de estudio, la formación de un anticlinal y dos sinclinales, cuyos ejes están localizados en las Formaciones Farrat e Inca, respectivamente; además, ambos ejes están orientados de Suroeste a Noreste. El fracturamiento (deformación frágil) de sus diversos componentes litológicos en algunos sectores, es más intenso que en otros, formando diaclasamiento no sistemático y sistemático. Por otra parte, se han identificado fallas normales (39°/275° y 58°/315°) visibles en las caras de algunos taludes.

Lo anterior, ha dado como consecuencia al modelamiento del terreno, la cual define la geomorfología del área estudiada, presentando las unidades morfogenéticas como planicies en 9.89%, lomadas en 33.12%, laderas en 52.92%,

y escarpes en 4.07%, calculados en el Software ArcGIS v.10.8. Están estrechamente ligadas a los constantes procesos geológicos externos como la meteorización y la erosión, cuya trascendencia ha dado lugar a la ocurrencia de algunos fenómenos geodinámicos externos, entre derrumbes y deslizamientos de rocas.

4.1.2. Modelo Geotécnico.

4.1.2.1. Análisis de la caracterización geomecánica y propiedades físico-mecánicas.

De los 9 puntos de control localizados en la carretera, se ha obtenido información de campo sobre los materiales que conforman los taludes, principalmente roca dada su predominancia, mediante la caracterización de las propiedades físicas de los macizos rocosos (roca intacta y discontinuidades) y parámetros geomecánicos; para ello, se aplicaron métodos empíricos mediante las clasificaciones geomecánicas RQD, GSI y RMR₈₉ determinando la calidad de la roca según las condiciones en las que se encuentran, adquiriendo los resultados que señala la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Resultados de clasificación geomecánica para cada talud analizado.

Talud	Material	Clasificación Geomecánica de los macizos rocosos						
		RQD (%)	Calidad	GSI	Calidad	RMR89	Calidad	Clase
PC-01	Roca	67.07	Regular	48	Regular	52	Regular	III
PC-02	Roca	65.46	Regular	48	Regular	53	Regular	III
PC-03	Suelo	-	-	-	-	-	-	-
	Roca	-	-	26	Mala	31	Mala	IV
PC-04	Roca	-	-	27	Mala	32	Mala	IV
PC-05	Roca	-	-	32	Mala	37	Mala	IV
PC-06	Roca	76.84	Buena	50	Regular	54	Regular	III
PC-07	Roca	54.67	Regular	45	Regular	47	Regular	III
PC-08	Roca	65.46	Regular	45	Regular	50	Regular	III
PC-09	Roca	78.47	Buena	51	Regular	56	Regular	III

Los resultados indican que, bajo la clasificación RMR₈₉ de Bieniawski los macizos rocosos que conforman a los taludes analizados pertenecen mayormente

a la clase III (calidad regular) con un rango de valoración de 47 a 56; seguido de los taludes PC-03, PC-04 y PC-05 pertenecientes a la clase IV (calidad mala) con un rango de valoración de 31 a 37, siendo estos últimos los más vulnerables ante cualquier sometimiento de la naturaleza. Así mismo, bajo la perspectiva GSI, hay ligeros contrastes respecto sus rangos de valoración con el RMR_{89} , pero en su clasificación conciden. Por otra parte, la clasificación mediante RQD, se limita a cuantificar la valoración para ciertos macizos rocosos cuando se dificulta el procedimiento de conteo de las discontinuidades para su cálculo.

Los resultados anteriores, se consideran como datos base para la evaluación de las propiedades mecánicas de las rocas que constituye cada talud y posterior obtención de los parámetros de Hoek y Brown, así como los parámetros equivalentes de Mohr-Coulomb, haciendo referencia a 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.

4.1.2.2. Análisis estereográfico – cinemático.

Mediante proyección estereográfica se analiza la orientación de las distintas familias de discontinuidades combinadas con la orientación del talud, a fin de definir el origen de formación de los modos de falla (para este caso, 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 tienen en cuenta las condiciones estructurales básicas de ocurrencia de falla, mencionados en el marco teórico.

Las proyecciones estereográficas y el análisis cinemático, se realizaron haciendo uso del Software Dips v.6.0, que permite observar y analizar interactivamente en su interfaz, datos geológicos basados en la orientación.

Otras consideraciones que se tuvieron en cuenta, se centra en las roturas en cuña, tal como muestran las figuras 4.1 y 4.2, con el propósito de saber:

- Si el deslizamiento ocurre a través de los dos planos de discontinuidad o sólo por uno de ellos.
- Si una cuña es directa o inversa.

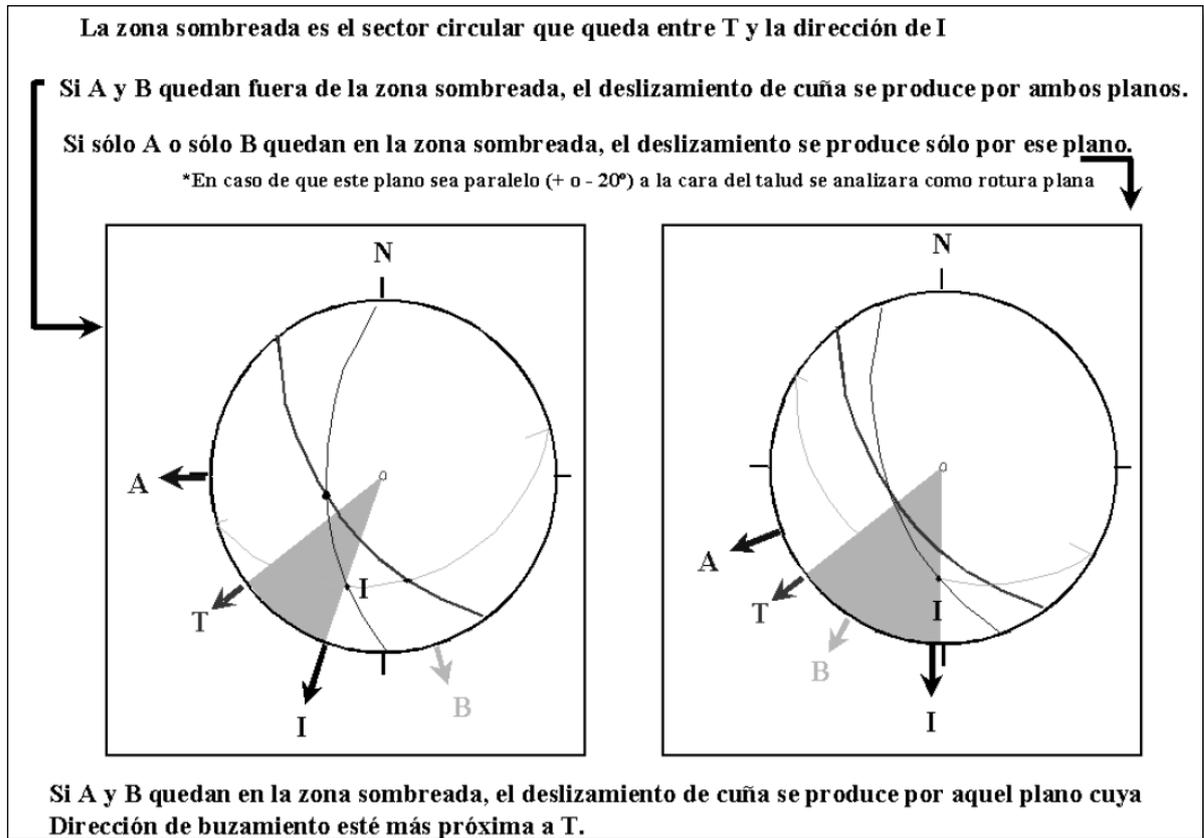


Figura 4.1: Criterio de análisis de deslizamiento de planos de discontinuidad en cuñas.

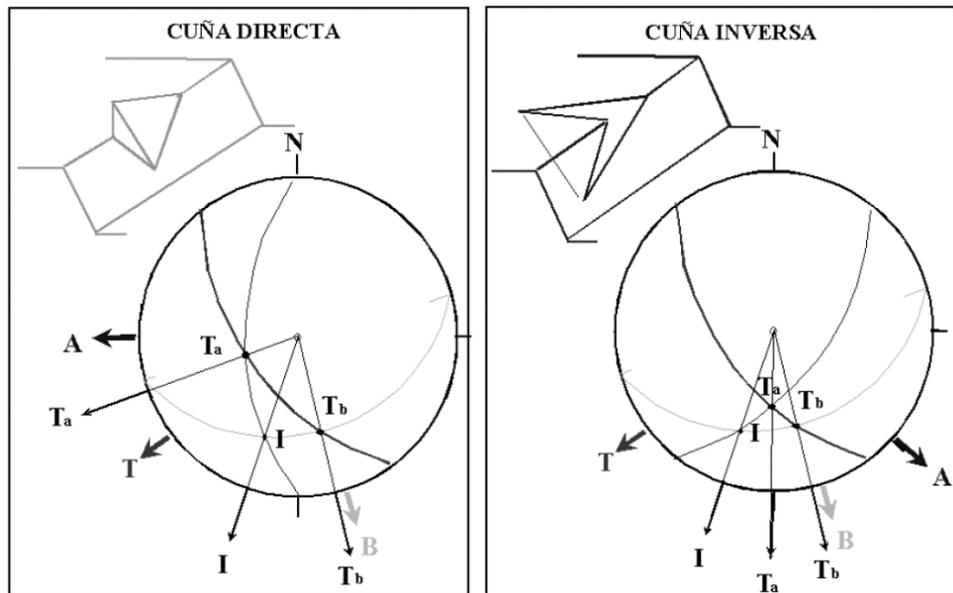


Figura 4.2: Criterio de análisis de cuña directa e inversa.

Los resultados plasmados en la tabla 4.3, muestran que para los taludes en roca analizados, existe una mayor probabilidad de falla tipo cuña directa en un 57.99% y con menor probabilidad de falla tipo planar en un mínimo de 11.11%; estos valores dependen parcialmente del número de datos obtenidos en campo, el ángulo de fricción de la discontinuidad a favor del talud y de la orientación e inclinación del talud; por tanto, el uso de esta técnica se debe considerar sólo para determinar el modo de rotura y probabilidad de ocurrencia en el talud.

Tabla 4.3: Resultado de análisis estereográfico-cinemático para cada talud.

Talud	Ángulo de fricción (ϕ)	Resultado de análisis estereográfico-cinemático							
		Rotura planar			Rotura en cuña				
		Condición	Ocurrencia	Probabilidad (%)	Condición	Ocurrencia	Probabilidad (%)	Plano(s) que se desliza	Tipo de cuña
PC-01	57°	Sí cumple	Por D-5	11.11	Sí cumple	Entre D-2 y D-3	21.11	Por ambos	Directa
PC-02	54°	No cumple	-	-	Sí cumple	Entre D-1 y D-2	43.19	Por ambos	Directa
PC-06	50	Sí cumple	Por el Estrato	14.29	No cumple	-	-	-	-
PC-07	49°	Sí cumple	Por D-2	27.08	Sí cumple	Entre D-1 y D-2	57.99	Por ambos	Directa
PC-08	51°	No cumple	-	-	Sí cumple	Entre D-1 y D-2	30.76	D-2	Inversa
PC-09	49°	Sí cumple	Por el Estrato	25.71	Sí cumple	Entre E y D-2	29.73	Por ambos	Inversa

4.1.3. Modelo Numérico.

En este ítem, se desarrolla el análisis de inestabilidad de los taludes de la zona de investigación relacionando los modelos anteriores (geológico y geotécnico), con el fin de determinar el factor seguridad de cada talud de acuerdo a los puntos de control establecidos; 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, LE/Morgenstern-Price y Spencer.

Se plantearon seis (6) escenarios que representan la condición actual y situaciones pronosticables en el talud, siendo: Condiciones normales (CN), Saturación parcial (SP), Saturación total (ST), Sismicidad máxima (SM), Saturación parcial con Sismicidad máxima (SP-SM) y Saturación total con Sismicidad máxima (ST-SM). Para efectos de saturación y como dato importante, se ha tenido cuenta el posicionamiento del nivel freático a criterio, puesto que, con su presencia aumenta la posibilidad de falla. Así mismo, para el análisis en todos los escenarios, se añadió una carga externa de 200 KN/m² sobre la carretera adyacente al talud, la cual simula el peso de los vehículos que recurrentemente transitan en esta vía; esto, con el objetivo de ver los efectos sobre cada talud analizado.

Finalmente, de acuerdo al factor seguridad promedio resultante de los análisis de equilibrio límite, mostrado en la tabla 4.5, se define las condiciones de estabilidad de los taludes representados por cada punto de control, según el rango FS recomendado por Hoek (2007), mostrado en la tabla 4.4. Estas condiciones, permiten realizar una zonificación en el tramo de carretera, la cual se visualiza en los planos del Anexos.

Tabla 4.4: Rango de factor 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.

Tabla 4.5: Resultados de los métodos de equilibrio límite analizados en los seis (6) escenarios para cada talud.

Talud	Escenario	Métodos de equilibrio límite - Factor Seguridad (FS)				
		Bishop Simplificado	Spencer	LE/Morgenstern-Price	Promedio FS	Condición Final
PC-01	Condiciones naturales (CN)	2.235	2.634	2.642	2.504	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.527	1.537	1.529	1.531	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	0.707	0.712	0.712	0.710	Inestable
	Sismicidad Máxima (SM)	1.895	1.895	1.896	1.895	Estable a largo plazo
	Combinación (SP-SM)	1.203	1.401	1.434	1.346	Estable a corto plazo
	Combinación (ST-SM)	0.542	0.539	0.540	0.540	Inestable
PC-02	Condiciones naturales (CN)	2.169	2.688	2.731	2.529	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.427	1.844	1.906	1.726	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	0.725	0.726	0.727	0.726	Inestable
	Sismicidad Máxima (SM)	1.807	1.850	1.843	1.833	Estable a largo plazo
	Combinación (SP-SM)	1.135	1.272	1.298	1.235	Estable relativo
	Combinación (ST-SM)	0.561	0.548	0.549	0.553	Inestable
PC-03	Condiciones naturales (CN)	1.135	1.138	1.123	1.132	Estable relativo
	Saturación Parcial (SP)	1.127	1.133	1.114	1.125	Estable relativo
	Saturación Total (ST)	0.752	0.759	0.745	0.752	Inestable
	Sismicidad Máxima (SM)	0.881	0.878	0.869	0.876	Inestable
	Combinación (SP-SM)	0.862	0.866	0.854	0.861	Inestable
	Combinación (ST-SM)	0.578	0.564	0.578	0.573	Inestable
PC-04	Condiciones naturales (CN)	1.303	1.359	1.355	1.339	Estable a corto plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.058	1.004	1.004	1.022	Estable relativo
	Saturación Total (ST)	0.609	0.664	0.635	0.636	Inestable
	Sismicidad Máxima (SM)	0.998	0.998	0.998	0.998	Inestable
	Combinación (SP-SM)	0.820	0.779	0.755	0.785	Inestable
	Combinación (ST-SM)	0.398	0.401	0.396	0.398	Inestable
PC-05	Condiciones naturales (CN)	1.312	1.538	1.548	1.466	Estable a corto plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.127	1.121	1.112	1.120	Estable relativo
	Saturación Total (ST)	0.719	0.723	0.722	0.721	Inestable
	Sismicidad Máxima (SM)	1.069	1.187	1.185	1.147	Estable relativo
	Combinación (SP-SM)	0.850	0.879	0.882	0.870	Inestable
	Combinación (ST-SM)	0.549	0.525	0.525	0.533	Inestable

Talud	Escenario	Métodos de equilibrio límite - Factor Seguridad (FS)				
		Bishop Simplificado	Spencer	LE/Morgenstern-Price	Promedio FS	Condición Final
PC-06	Condiciones naturales (CN)	3.131	3.647	3.456	3.411	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	2.671	3.347	3.162	3.060	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	1.760	1.980	1.968	1.903	Estable a largo plazo
	Sismicidad Máxima (SM)	2.487	2.541	2.552	2.527	Estable a largo plazo
	Combinación (SP-SM)	2.115	2.175	2.185	2.158	Estable a largo plazo
	Combinación (ST-SM)	1.422	1.430	1.437	1.430	Estable a corto plazo
PC-07	Condiciones naturales (CN)	1.703	2.065	2.085	1.951	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.282	1.437	1.292	1.337	Estable a corto plazo
	Saturación Total (ST)	0.838	0.854	0.828	0.840	Inestable
	Sismicidad Máxima (SM)	1.432	1.451	1.448	1.444	Estable a corto plazo
	Combinación (SP-SM)	1.082	1.169	1.211	1.154	Estable relativo
	Combinación (ST-SM)	0.549	0.539	0.536	0.541	Inestable
PC-08	Condiciones naturales (CN)	1.976	2.373	2.398	2.249	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	1.426	1.422	1.425	1.424	Estable a corto plazo
	Saturación Total (ST)	0.831	0.858	0.838	0.842	Inestable
	Sismicidad Máxima (SM)	1.684	1.719	1.713	1.705	Estable a largo plazo
	Combinación (SP-SM)	1.154	1.230	1.339	1.241	Estable relativo
	Combinación (ST-SM)	0.694	0.656	0.650	0.667	Inestable
PC-09	Condiciones naturales (CN)	2.760	3.421	3.143	3.108	Estable a largo plazo
	Saturación Parcial (SP)	2.178	2.945	2.568	2.564	Estable a largo plazo
	Saturación Total (ST)	0.746	1.531	1.502	1.260	Estable relativo
	Sismicidad Máxima (SM)	2.289	2.322	2.320	2.310	Estable a largo plazo
	Combinación (SP-SM)	1.794	1.802	1.846	1.814	Estable a largo plazo
	Combinación (ST-SM)	0.606	0.864	0.858	0.776	Inestable

Las gráficas 4.1 al 4.6, comparan los factores de seguridad (FS) de cada talud bajo los mismos escenarios de análisis. Estas ofrecen observar un mejor panorama permitiendo evaluar los efectos que pueden ocasionar los factores detonantes sobre los condicionantes, considerando la tabla 4.4. que clasifica a los taludes como inestable, estable relativo, estable a corto plazo y estable a largo plazo.

De la gráfica 4.1 se observa que, en condiciones normales, los taludes PC-04 y PC-05 presentan estabilidad a corto plazo con F.S. menor a 1.5, el PC-03 presenta estabilidad relativa con F.S. de 1.132. y los taludes PC-01, PC-02, PC-06, PC-07, PC-08 y PC-09 presentan una estabilidad a largo plazo con F.S. mayor a 1.5.

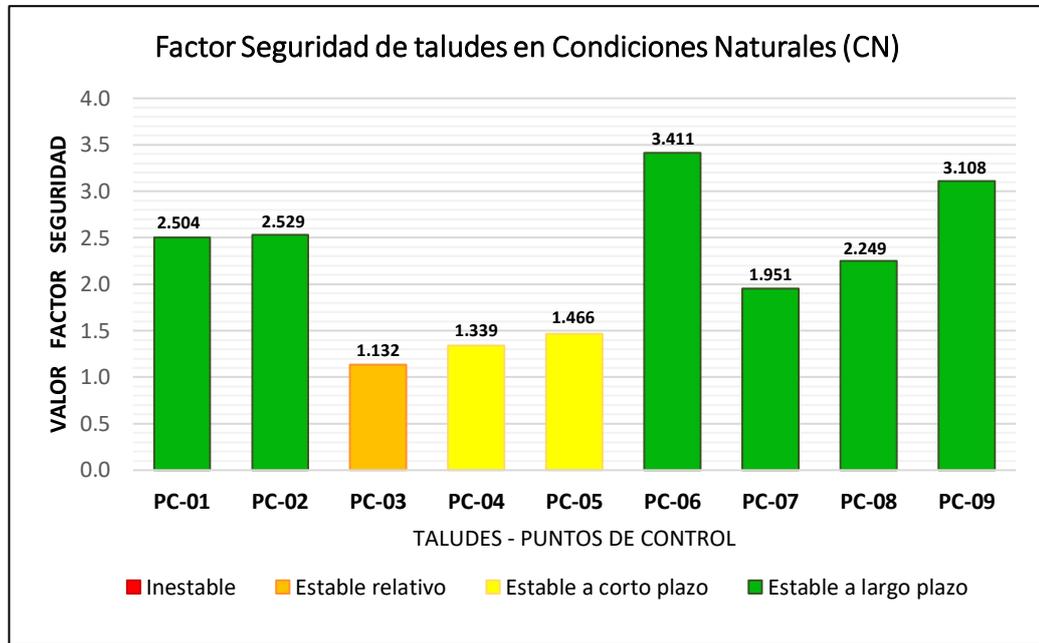
Si todos estos taludes, son sometidos a factores desencadenantes como la lluvia y la sismicidad, los efectos de inestabilidad se observarán más rápido en los taludes PC-03 y PC-04, que reducen su F.S. a menos de 1.3, pasando a ser estables relativos en condiciones de saturación parcial, e inestables en condiciones de sismicidad máxima, teniendo mayor efecto el movimiento sísmico, de acuerdo a las gráficas 4.2 y 4.4.

Si los materiales que constituyen los taludes se saturaran parcialmente, como muestra la gráfica 4.2, cinco taludes reducirían su factor seguridad, teniendo a PC-07 y PC-08 con estabilidad a corto plazo (F.S.: 1.3 - 1.5) y a PC-03, PC-04 y PC-05 con estabilidad relativa (F.S.: 1.0 - 1.3).

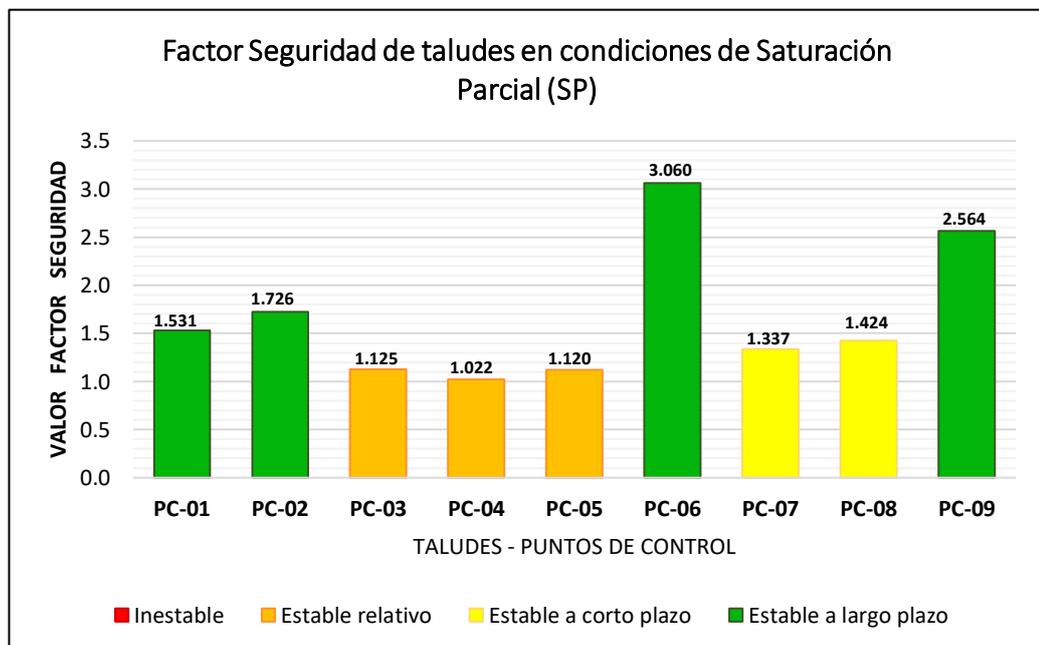
Para consideraciones de saturación total mostrada en la gráfica 4.3 , relacionadas con eventos de lluvias extremas, los taludes PC-01, PC-02, PC-03, PC-04, PC-05, PC-07 y PC-08, tendrían un comportamiento de inestable (F.S. <1.0), representando peligro de movimiento en masa en los diferentes tramos donde se sitúan los puntos de control analizados.

Para casos extraordinarios, poco probables, si dos factores desencadenantes (precipitación pluvial y sismicidad) inciden en los taludes, surtiría efecto dependiendo del grado de saturación. Con saturación parcial y sismicidad máxima (gráfica 4.5), el talud PC-01 asume una estabilidad a corto plazo, los taludes PC-02, PC-07 y PC-08 estabilidad relativa, y los taludes PC-03, PC-04 y PC-05 se convierten en inestables. Mientras que, con saturación total y sismicidad máxima (gráfica 4.6), todos los taludes a excepción de Talud PC-06 se volvería inestables.

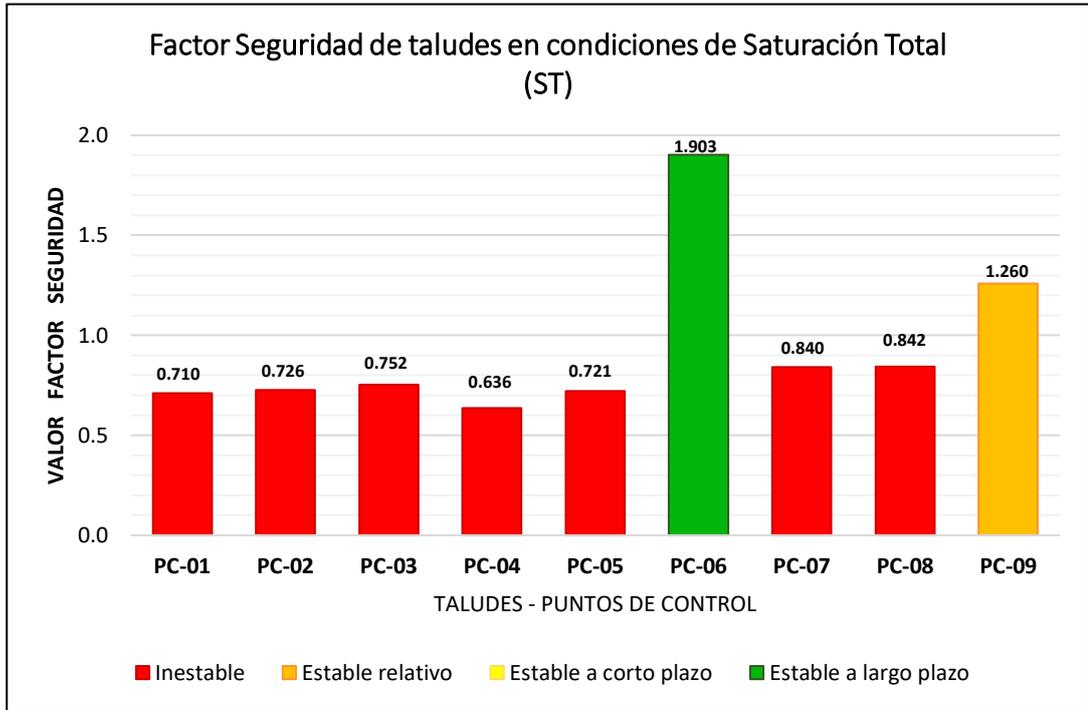
Caso particular sucede con los taludes PC-06 y PC-09 que, a pesar de someterse a la acción de factores desencadenantes, su factor seguridad se mantiene por encima de 1.5, especialmente en con el talud PC-06, el cual en condiciones críticas que combina saturación parcial con la sismicidad máxima, reduce su F.S. hasta 1.430 (estabilidad a corto plazo).



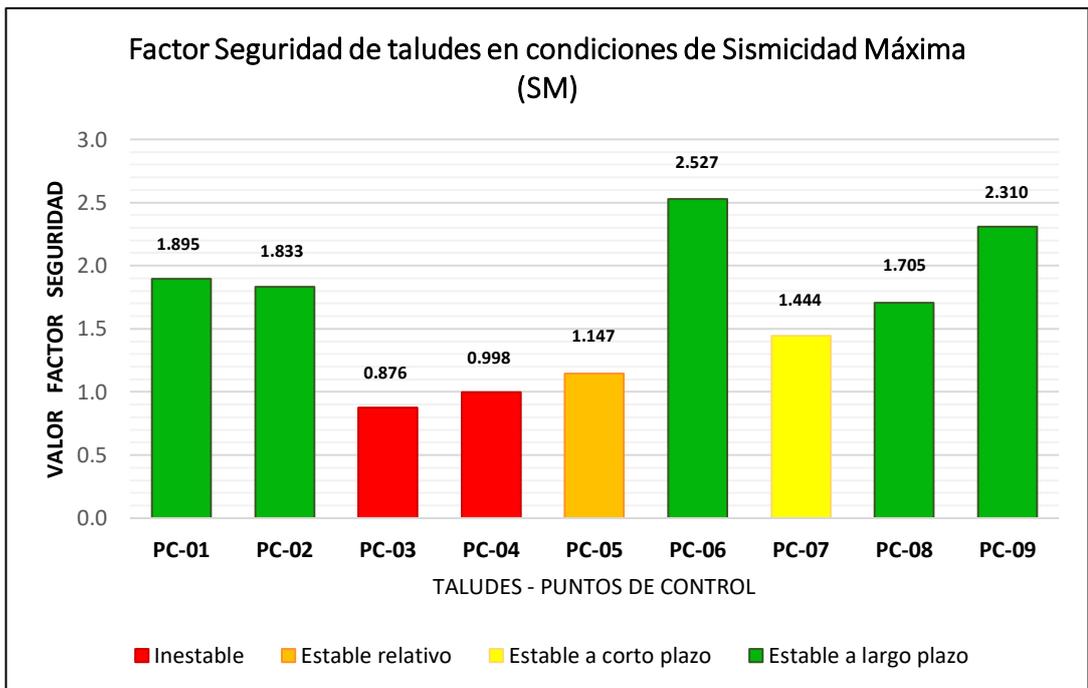
Gráfica 4.1: Barras comparativas de Factor seguridad para cada talud en condiciones normales.



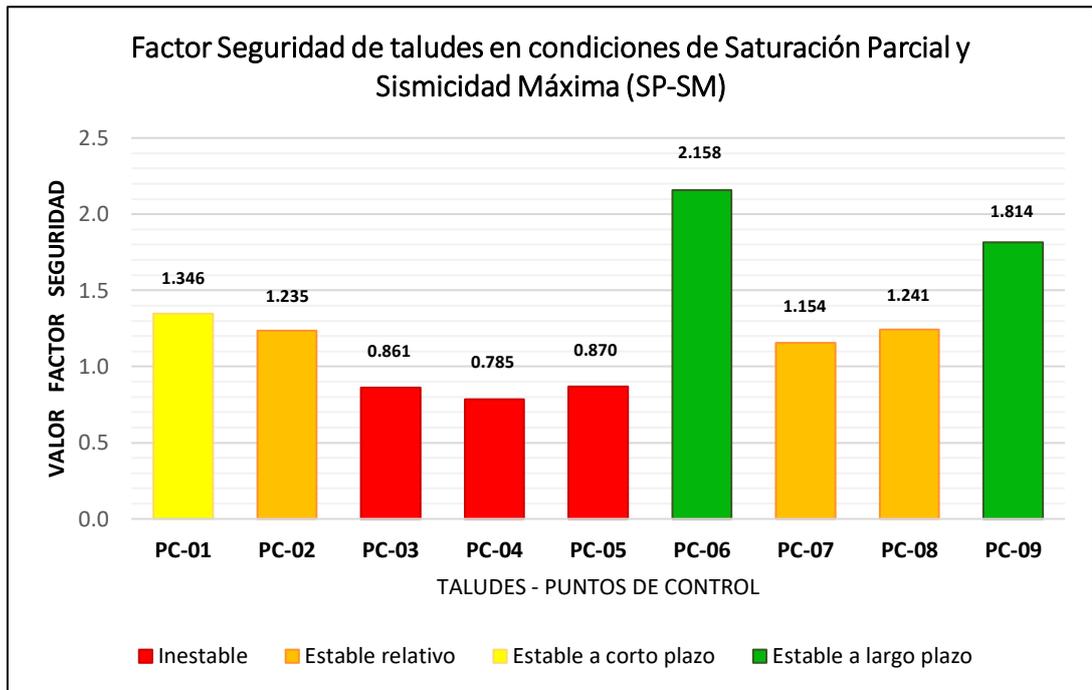
Gráfica 4.2: Barras comparativas de Factor seguridad para cada talud en condiciones de saturación parcial.



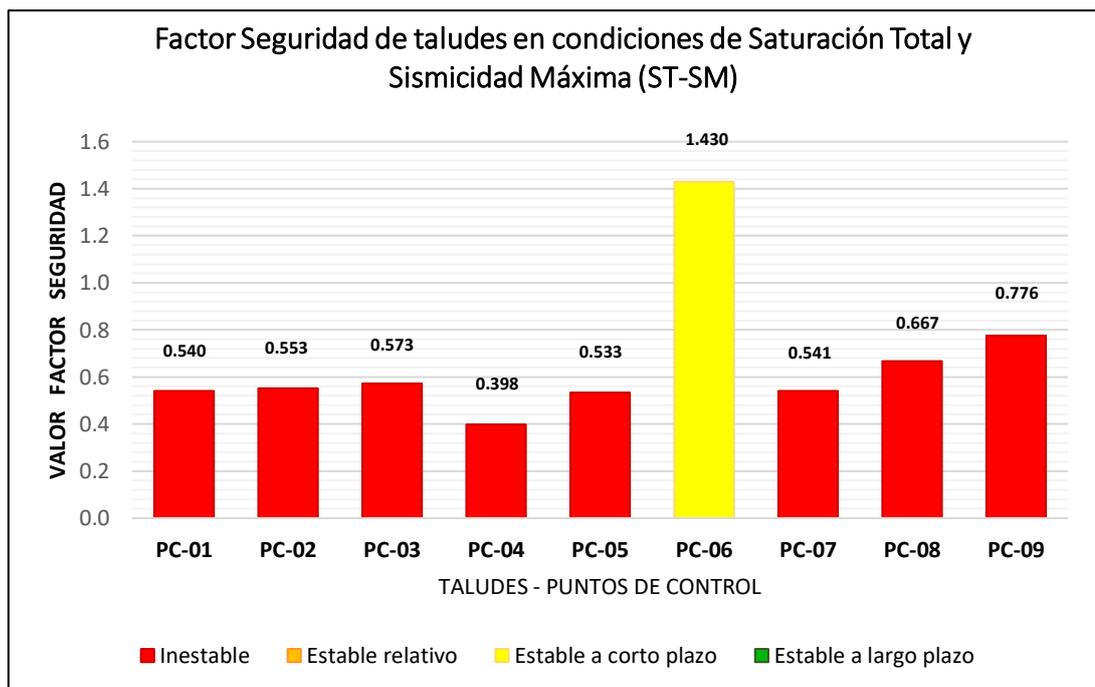
Gráfica 4.3: Barras comparativas de Factor de seguridad para cada talud en condiciones de saturación total.



Gráfica 4.4: Barras comparativas de Factor de seguridad para cada talud en condiciones de sismicidad máxima.



Gráfica 4.5: Barras comparativas de Factor de seguridad para cada talud en condiciones de saturación parcial y sismicidad máxima.



Gráfica 4.6: Barras comparativas de Factor de seguridad para cada talud en condiciones de saturación total y sismicidad máxima.

4.2. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.

Por intermedio de la investigación realizada, para la determinación de la inestabilidad geotécnica de taludes entre el Km. 34+700 y Km. 42+200, de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca; 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, abarcando secuencias litológicas de rocas sedimentarias del Cretácico inferior (Formaciones: Carhuaz, Farrat, Inca y Chúlec), rocas ígneas (cuerpo ígneo: batolito) y depósitos cuaternarios (destacando los coluvio-aluviales, coluviales y aluviales), donde el constituyente 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, principalmente) y por el tectonismo regional; y factores geométricos, debido a la presencia de taludes con inclinaciones mayormente de 85°. Además se confirma que, la inestabilidad de los taludes es causal de los factores detonantes como la precipitación pluvial (provocando mayor afectación cuando acontecen precipitaciones anómalas, según registros de SENAMHI) 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 la variable hidrológica (precipitación e infiltración) y sísmica.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.

La geología, comprende afloramientos de rocas pertenecientes a las Formaciones Carhuaz, Farrat, Inca y Chúlec; intrusivos pertenecientes al Batolito de la Costa; depósitos cuaternarios del tipo coluvial, coluvio-aluvial y aluvial.

Se identificaron estructuras como un anticlinal, dos sinclinales (con orientación SO-NE) y fallas normales que, subsecuentemente han originado el alto grado de fracturamiento en los macizos rocosos; y conjuntamente, moldean la geomorfología, identificándose unidades morfogénicas como planicies (9.89%), lomadas (33.12%), laderas (52.92%), y escarpes (4.07%).

La caracterización geomecánica, califica a los macizos rocosos como clase III (calidad regular) y IV (calidad mala), según RMR_{89} . Calidad regular (54.67% - 67.07%) y calidad buena (76.84% - 78.47%), según RQD. Calidad regular (47-56) y calidad mala (31-37), según GSI. Así también, la clasificación SUCS, califica al suelo muestreado en depósito cuaternario como GM-GC (grava con finos y arena).

El análisis estereográfico-cinemático mediante Software Dips de las discontinuidades y el ángulo de fricción, determina mayor probabilidad de deslizamiento por falla tipo cuña (prob. máx.= 57.99% y prob. mín.=21.11%) que por falla planar (prob. máx.=25.71% y prob. mín.=11.11%).

El comportamiento geotécnico de los taludes para cada punto de control, está definido por factores litológicos, geomecánicos, geométricos geomorfológicos y variables desencadenantes como la precipitación, infiltración y sismicidad.

La zonificación de inestabilidad geotécnica muestra zonas críticas ($FS < 1.0 =$ inestables) en los escenarios de condición de saturación total, donde los taludes PC-01, PC-02, PC-03, PC-04, PC-05, PC-07 y PC-08 se muestran inestables; en condición de sismicidad, taludes PC-03 y PC-04 son inestables; en condiciones de saturación parcial y sismicidad, los taludes PC-03, PC-04 y PC-05 son inestables; en condiciones de saturación total y sismicidad, donde todos a excepción de PC-06 son taludes inestables.

5.2. RECOMENDACIONES.

A la empresa CONALVÍAS realizar ensayos especiales como triaxiales, puesto que, las pruebas de resistencia en campo mediante el golpeo de martillo, inevitablemente generan cierto margen de error.

Se recomienda a la empresa CONALVÍAS, actuar de manera preventiva con el monitoreo y mejoramiento de aquellos taludes que se determinaron inestables y/o se consideren con una inestabilidad relativa, dado los distintos escenarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Braja M., D. (2015). *Fundamentos de Ingeniería geotécnica*. Ciudad de México-México: Cengage Learnig, 334-373.
- Cabana Ticona, O. (2016). *Evaluación geotécnica para la estabilidad de taludes desde la progresiva Km. 09+000 - 18+000 de la obra: Mejoramiento de la carretera tramo I Dv. Cara Cara - Lampa*. Puno-Perú: Tesis de pregrado. Universidad Nacional del Altiplano.
- Corominas, J. (1997). Tipos de rotura en laderas y taludes. *Revista de la Universidad Politécnica de Cataluña*, 17.
- Cuevas Videa, R. E. (2019). *Análisis de la inestabilidad de ladera en la carretera NN-4, en el tramo San Lucas-Las Sabanas Km. 233-235, Departamento de Madriz*. Managua-Nicaragua.: Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Davila Burga, J. (2011). *Diccionario Geológico*. Lima-Perú: INGEMMET.
- Fidel Smoll, L. y. (1994). *Estudio Geodinámico de la Cuenca de Río Jequetepeque*. Cajamarca-Perú: INGEMMET.
- GEMMA, G. d. (2007). *Movimientos en masa en la región andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Vancouver-Canadá: Publicacion Multinacional, 1-77.
- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid-España: Pearson, 430-484.
- González Hija, L. (1997). *Estudio Geológico para la estabilidad de taludes de la carretera Olmos-Corral Quemado del Km. 0+000 al Km. 196+300*. Lima-Peru: Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Goodman. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. Berkeley-EE.UU: Wiley, 293-341.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid-España: Pearson, 229-270.
- Hoek, E. (1997). Confiabilidad de las estimaciones de Hoek-Brown de las propiedades del macizo rocoso y su impacto en el diseño. *Taller Geotécnico Interdivisional, división Chuquicamata de Codelco - Chile.*, 8.
- Hoek, E. (2010). *Practical Rock Engineering*. Vancouver-Canada: Own publication.
- Hoek, e. a. (2002). El criterio de rotura de Hoek-Brown. *RocScience Inc.*, 8.

- Hurtado Lascano, M. (2009). *Modelo para la estabilización de taludes en la carretera Selva Alegre - Saguangal que permita disminuir costos de mantenimiento*. Ambato-Ecuador: Tesis Magistral. Universidad Técnica de Ambato.
- Marinos, P. y. (2000). GSI: Una confiable herramienta geológica para la estimación de la resistencia del macizo rocoso. *National Technical University of Athens*, 19.
- Montoya, F. (2014). *Evaluación geotécnica de los taludes de la Cruz Blanca - El Gavilán*. Cajamarca-Perú: Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Novoa, E. (2019). *Evaluación geotécnica para determinar la inestabilidad de los taludes en roca en la carretera del tramo Chilete-Puente Muyuna*. Cajamarca-Perú: Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Puell Marín, F. e. (2004). La linealización del criterio de Hoek-Brown en el análisis de la estabilidad general de taludes en roca. *Ciencia y técnica de la ingeniería civil*, 7.
- Ramírez Oyanguren, P. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid-España.: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez Cruzado, R. (2016). *Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos, zona Ronquillo-Corisorgona*. Cajamarca-Perú.: Tesis magistral. Universidad Mayor de San Marcos.
- Rojas, C. (2018). *Comportamiento geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas-El Tayal, Provincia de Chota*. Cajamarca-Peru: Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Suarez Diaz, J. (2005). *Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga-Colombia: Publicaciones Universidad Industrial de Santander.
- Suarez Diaz, J. (2009). *Deslizamientos: Análisis geotécnico*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 130-159.
- Tapia-Varela, G. y.-B. (2002). Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: Unidades morfogenéticas a escala 1:100000. *Revista Mexicana de ciencias geológicas*, 50-65.
- Zavala, B. (2011). *Riesgos geológicos en la Región Cajamarca*. Cajamarca-Perú: INGEMMET.

ANEXOS

- **REGISTROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO CON PUNTOS DE CONTROL.**
- **RESULTADOS DE LABORATORIO (ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y GRAVEDAD ESPECÍFICA).**
- **PLANOS.**

01. Plano de ubicación.

02. Plano de accesibilidad.

03. Plano MDE (Modelo Digital de Elevación).

04. Plano de Unidades Morfométricas.

05. Plano Geológico.

06. Plano Geotécnico.

07. Planos de zonificación

07.1. Condiciones normales.

07.2. Condiciones de saturación parcial.

07.3. Condiciones de saturación total.

07.4. Condiciones de sismicidad máxima.

07.5. Condiciones de saturación parcial y sismicidad máxima.

07.6. Condiciones de saturación total y sismicidad máxima