



UNIVERSIDAD DE TALCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE “PROYECTO
CONTINUIDAD MINA GABRIELA”.

“MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS”

MIGUEL ESTEBAN RICCI VALDÉS

PROFESOR GUÍA: Claudio Martínez Espinoza.

PROFESOR CO-GUÍA: Mauricio Jara Ortiz.

CURICÓ – CHILE

2018

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'.

Curicó, 2020

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mis padres Patricia y Miguel Angel, quienes han sido parte importante en mi formación valórica y académica durante todo mi proceso como estudiante.

Bárbara tu eres la energía que me hace superar los momentos difíciles, y disfrutar al máximo los logros y éxitos en todos los momentos que hemos vivido juntos en este periodo de formación académica, gracias por todo. ¡Te Amo Mucho!

A mi familia, quienes han sido mi soporte en las etapas más importantes de mi vida y por el apoyo incondicional que me han brindado, les estaré siempre agradecido.

También quisiera agradecer a todos mis amigos tanto los que formé en mi época escolar como los que fui conociendo en el periodo universitario sus consejos y risas fueron muy importante para poder enfrentar de buena forma el quehacer diario.

Finalmente agradecer a la Escuela de Ingeniería Civil de Minas por entregar las herramientas necesarias para poder adquirir los conocimientos referentes al rubro minero, especialmente a mi profesor guía Claudio Martínez el cual fue generando en mí el gusto por el área de la geomecánica.

RESUMEN

A continuación, se presenta la memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas en la Universidad de Talca, el contenido de este trabajo tiene como objetivo establecer una evaluación de estabilidad de los taludes que conforman las paredes de 7 nuevos *pits* en el Proyecto Continuidad Mina Gabriela, realizando una caracterización geotécnica.

Por medio de una recopilación bibliográfica se analizan los diferentes métodos de clasificación geomecánica proponiendo el RMR₈₉ de Bieniawski como el índice utilizado para establecer una clasificación de las unidades geológicas según su calidad y posteriormente una obtención de propiedades geomecánicas por medio de la envolvente de falla de Mohr-Coulomb.

De forma paralela mediante una caracterización estructural se encuentra las fallas mayores y menores para cada sector, las cuales se concentran principalmente en las paredes Sur-Oeste de los *pits*. Siguiendo criterios estructurales y de diseño se plantean las secciones evaluadas en cada rajo para concluir la estabilidad de las paredes.

Dividiendo los análisis en determinístico y probabilístico para casos estáticos y pseudoestáticos se evalúa la estabilidad de los taludes ya sea a nivel talud-global como banco-berma, por medio de análisis de equilibrio límite y tensión-deformación ajustando como mecanismo de decisión de la estabilidad, los criterios de aceptabilidad propuestos.

Según estos análisis todas las paredes de los rajos son estables, debido a la alta competencia de las rocas que los conforman, de manera complementaria se propone el ajuste de los ángulos de talud global para las fallas por control estructural en los cuales sea posible variar la inclinación, cumpliendo los criterios de aceptabilidad.

De esta forma es posible reconfigurar el diseño de los taludes globales de los rajos pertenecientes a los sectores Tailandia y China en un máximo de 11° para algunos casos.

Finalmente se recomienda efectuar análisis de caída de rocas y metodologías numéricas 3D mediante elementos de borde, como también establecer actualizaciones en los datos provenientes de las campañas de sondaje y ensayos de laboratorio, además de realizar el cálculo de las propiedades de geomecánicas de las rocas con métodos diferentes al de Mohr-Coulomb.

PALABRAS CLAVES: Estabilidad, RMR₈₉, Mohr-Coulomb, Equilibrio Limite, Tensión-deformación.

ABSTRACT

The following memory is presented to qualify for the title of Civil Engineer of Mines at the University of Talca, the content of this work aims to establish a stability assessment of the slopes that make up the walls of 7 new pits in the “Proyecto Continuidad Mina Gabriela” carrying out a geotechnical characterization.

By means of a bibliographic compilation the different geomechanical classification methods are analyzed establishing Bieniawski's RMR89 as the index used to establish a classification of the geological units according to their quality and later a obtaining of geomechanical properties by means of the Mohr-Coulomb fault envelope.

In parallel with a structural characterization is the major and minor faults for each sector, which are mainly concentrated in the south-west walls of the pits. Following structural and design criteria, the sections evaluated in each pit are considered to conclude the stability of the walls.

Dividing the analyzes in deterministic and probabilistic for static and pseudostatic cases, the stability of the slopes is evaluated either at the talud-global level as bank-berm, by means of analysis of limit equilibrium and stress-strain adjusting as stability decision mechanism , the proposed acceptability criteria.

According to these analyzes all the walls of the ravines are stable, due to the high competition of the rocks that form them, in a complementary way we propose the adjustment of the global slope angles for the faults by structural control in which it is possible to vary the inclination, meeting the criteria of acceptability.

In this way it is possible to reconfigure the design of the global slopes of the ravines belonging to the sectors Tailandia and China in a maximum of 11° for some cases.

Finally it is recommended to carry out rock fall analysis and 3D numerical methodologies by means of edge elements as well as to establish updates in the data coming from the probing campaigns and laboratory tests, as well as to perform the calculation of the geomechanical properties of the rocks with methods different from Mohr-Coulomb.

KEY WORDS: Stability, RMR89, Mohr-Coulomb, Limit equilibrium, stress-strain.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN.	1
1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	1
1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA.	1
1.4 OBJETIVOS.....	1
1.4.1 Objetivo general.	1
1.4.2 Objetivos específicos.....	2
1.5 ALCANCES.	2
1.6 METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS.	3
1.6.1 Herramientas utilizadas.	4
1.7 RESULTADOS ESPERADOS.	4
1.8 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.	5
CAPÍTULO 2 : ANTECEDENTES GENERALES.	7
2.1 UBICACIÓN Y ACCESO.	7
2.2 GEOLOGÍA.	9
2.2.1 Depósitos.	9
2.2.2 Rocas estratificadas.	9
2.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	10

2.4	MINERALIZACIÓN.	12
2.5	DESCRIPCIÓN PROYECTO.....	12
2.5.1	Rajo Gabriela.....	12
2.5.2	Rajo China.	12
2.5.3	Rajo India.	13
2.5.4	Rajo Japón.	13
2.5.5	Rajo China Sur.	13
2.5.6	Rajo Tailandia.	13
CAPÍTULO 3 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....		14
3.1	MÉTODO DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO.	14
3.1.1	Frecuencia de fracturas. <i>Fracture Frequency</i> .(FF).....	14
3.1.2	Resistencia a la Compresión Uniaxial Simple. <i>Uniaxial Compressive Strength</i> . (UCS).....	14
3.1.3	Rock Quality Designation. RQD. (1967)	15
3.1.4	Índice Geológico de Resistencia. <i>Geological Strength Index</i> . GSI. (1.995)	15
3.1.5	Rock Mass Rating. RMR ₈₉ Bieniawski.	17
3.1.5.1	Resistencia a la compresión simple:.....	18
3.1.5.2	RQD.	18
3.1.5.3	Espaciamiento.	19
3.1.5.4	Condición de las discontinuidades.	19
3.1.5.5	Presencia de agua.	20
3.2	DISEÑO DE TALUD.....	21
3.3	CRITERIO DE ACEPTABILIDAD.	22
3.3.1	Factor de Seguridad. (F.S.).....	22
3.3.2	Probabilidad de Falla. (PF).....	23

3.4	CRITERIOS DE FALLA DEL MACIZO ROCOSO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	24
3.4.1	Criterio de falla de Hoek and Brown.....	24
3.4.2	Criterio de falla de Mohr-Coulomb.....	25
3.4.3	Tipos de fallas.....	26
3.4.4	Falla plana.	26
3.4.5	Falla Cuña.....	27
3.4.6	Falla <i>Toppling</i>	28
3.4.7	Falla Rotacional.....	29
3.5	ESTABILIDAD DE TALUDES.....	30
3.5.1	Cálculo de estabilidad de taludes por equilibrio límite.....	31
3.5.1.1	Métodos exactos.....	31
3.5.1.2	Modelo determinístico.....	31
3.5.1.3	Equilibrio límite falla plana.....	32
3.5.1.4	Equilibrio límite falla cuña.....	33
3.5.1.5	Modelo probabilístico.....	34
3.5.1.6	Métodos no exactos.....	34
3.5.1.7	Métodos dovelas aproximados.....	36
3.5.1.8	Métodos dovelas precisos.....	36
3.5.2	Cálculo de estabilidad de taludes por deformaciones.....	37
3.5.2.1	Modelamiento numérico.....	37
CAPÍTULO 4 : DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....		39
4.1	INFORMACIÓN UTILIZADA.....	39
4.1.1	Levantamiento de información geológica y geotécnica.....	39
4.1.2	Unidades litológicas.....	40

4.1.3	Unidades geotécnicas.	41
4.1.4	Caracterización geotécnica.	42
4.1.5	Características geomecánicas del macizo rocoso.	42
4.1.6	Información estructural.....	43
4.1.7	Diseño Minero.	43
4.1.7.1	Sector China Sur.....	43
4.1.7.2	Sector Tailandia.....	44
4.1.7.3	Sector Japón	44
4.1.8	Sismicidad.	44
CAPÍTULO 5 : CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....		46
5.1	CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA.	48
5.2	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO.....	50
5.2.1	Compresión Uniaxial Simple.	50
5.2.2	Compresión Triaxial.....	50
5.2.3	Tracción indirecta (TI).....	51
5.2.4	Modulo elástico.	52
5.2.5	Peso unitario (PU).	52
5.3	CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS.....	53
5.4	CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES.	54
CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.....		57
6.1	DETERMINACIÓN DE PERFILES.	57
6.1.1	Perfiles China Sur.....	57
6.1.2	Perfiles Tailandia.....	58
6.1.3	Perfiles Japón.....	59
6.2	ANÁLISIS CINEMÁTICO PARA FALLAS CON CONTROL ESTRUCTURAL. .	60

6.3	CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PROPUESTO.....	63
6.4	ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE BAJO MODELAMIENTO DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO, PARA FALLAS CON CONTROL ESTRUCTURAL.....	64
6.4.1	Equilibrio límite, perfiles China Sur.	64
6.4.2	Equilibrio límite, perfiles Tailandia.	65
6.4.3	Equilibrio límite, perfiles Japón.	66
6.5	ANÁLISIS TENSIÓN-DEFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE BAJO MODELAMIENTO DETERMINÍSTICO Y PROBABILISTICO DE FALLAS SIN CONTROL ESTRUCTURAL.....	68
6.5.1	Análisis talud banco-berma.	69
6.5.2	Análisis talud nivel global.	72
6.6	EVALUACIÓN DE CAMBIO DE ÁNGULO DE TALUD GLOBAL, PARA FALLAS CON CONTROL ESTRUCTURAL.	74
6.6.1	Caso falla plana.	74
6.6.2	Caso falla cuña.....	75
	CAPÍTULO 7 : ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	77
7.1	REFERENTE A LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	77
7.2	REFERENTE A LA ESTABILIDAD DE TALUDES.	78
	CONCLUSIONES.....	80
	REFERENCIAS.	82
	ANEXOS.....	83
	ANEXO A: PROCESAMIENTO DE DATOS Y METODOLOGÍAS.....	84
	UBICACIÓN ESPACIAL DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA.	84
	ENSAYOS DE LABORATORIO.	87
	ESTIMACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESION UNIXIAL EN SITU.	88

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.	89
ANÁLISIS CINEMÁTICO CON RED ESTEREOGRÁFICA.....	89
Sector China Sur estructuras menores análisis banco-berma.....	89
Análisis cinemático taludes críticos.	90
Sector Japón estructuras menores análisis banco-berma.....	94
Análisis cinemático taludes críticos.	95
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TENSIÓN-DEFORMACIÓN.....	99
Evaluación a nivel banco-berma UG GRAVA.	99
Sector China Sur.....	100
Sector Tailandia.....	103
Sector Japón.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Vista en planta área Proyecto Continuidad Minera Gabriela. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2016).....	8
FIGURA 2.2: Carta Altamira, Regiones Antofagasta y Atacama. Escala 1:100.000. (Servicio Nacional de Geología y Minería-SERNAGEOMIN).....	11
FIGURA 3.1: Estimación del GSI, en base a una descripción geológica del macizo rocoso. ..	17
FIGURA 3.2: Componentes geométricos en el diseño de un talud. (Fuente: (Read & Stacey, 2009).....	22
FIGURA 3.3: Condiciones de buzamiento para falla plana. Representación visual falla plana. Visualización en Red de Smith para falla plana. (Wyllie & Mah, 2004).....	27
FIGURA 3.4: Representación visual falla cuña. Condiciones de buzamiento para falla cuña. Visualización en Red de Smith para falla cuña. (Wyllie & Mah, 2004).....	28
FIGURA 3.5: Condiciones de buzamiento para falla toppling. Visualización en Red de Smith para falla toppling.....	29
FIGURA 3.6: Falla rotacional o circular.....	30
FIGURA 3.7: Clasificación de métodos de cálculo por equilibrio límite. (Fuente: Elaboración propia).....	30
FIGURA 3.8: Geometría de la rotura plana en talud. a) Grieta de tracción en cabecera, b) Grieta de tracción en la cara del talud. (Vallejo 2004, modificado de Hoek y Bray, 1981).....	32
FIGURA 3.9: Resolución de fuerzas para calcular el factor de seguridad de la cuña: (a) vista de la cuña que mira la cara que muestra la definición de los ángulos β y ξ , y las reacciones en los planos deslizantes RA y RB; (b) red estereográfica que muestra la medición de los ángulos β y ξ ; (c) corte transversal de cuña que muestra la resolución del peso de cuña W. (Read & Stacey, 2009).....	33
FIGURA 3.10: Representación de métodos de dovelas. Fuerzas actuando en dovela. (Wyllie & Mah, 2004).....	35
FIGURA 5.1: Histograma FF de datos compositados. (Fuente: Elaboración propia).....	46
FIGURA 5.2: Histograma RQD de datos compositados. (Fuente: Elaboración propia).....	47
FIGURA 5.3: Histograma RMR ₈₉ calculado. (Fuente: Elaboración propia.).....	49

FIGURA 6.1: (a) Secciones propuestas para rajo China Sur 1. (b) Secciones propuestas para rajo China Sur 2.....	57
FIGURA 6.2: Secciones propuestas rajo Tailandia 1.....	58
FIGURA 6.3: Secciones propuestas Rajo Tailandia 2.	59
FIGURA 6.4: a) Secciones propuestas para rajo Japón 1. (b) Secciones propuestas para rajo Japón 2.....	59
FIGURA 6.5: Secciones propuestas rajo Japón Norte.	60
FIGURA 6.6: Representación de análisis cinemático para falla tipo plana, en talud nivel banco berma referente a sector China Sur 1, Dip 70°, Dip Dir 63°. Fuente: (Elaboración Propia, Software Dips).....	62
FIGURA 6.7: Representación de análisis cinemático para falla tipo plana, en talud a nivel ángulo global referente a sector China Sur 1, Dip Dir 256°, Dip 54°. Fuente: (Elaboración Propia, Software Dips)	63
FIGURA 6.8: Criterios de aceptabilidad para rajos de Proyecto Continuidad Mina Gabriela. (Fuente: EIA, Tecnología y Geociencias)	63
FIGURA 6.9: Esquema de equilibrio límite de la pared con dirección Dip/DipDir 63°/070° con estructura 34°/049° la cual genera bloque de deslizamiento, análisis en condición de sismo máximo, rajo China Sur 1. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane).....	65
FIGURA 6.10: Esquema de equilibrio límite de la pared con dirección Dip/DipDir 54°/226° con estructura 39°/236° la cual genera bloque de deslizamiento, análisis en condición de sismo máximo, rajo Tailandia 2. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane).....	66
FIGURA 6.11: Esquema de equilibrio límite de la pared con dirección Dip/DipDir 70°/270° con estructura 35°/243° la cual genera bloque de deslizamiento, análisis en condición de sismo máximo, rajo Japón Norte. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane)	67
FIGURA 6.12: Ejemplo de análisis tensión -formación a sección Ch1a para establecer superficie de corte en sector que posee unidad geológica GRAVA. En dicho ejemplo se somete a un análisis pseudoestático con sismo máximo, y se determina que la falla critica ocurre con un F.S. de 2,94. (Fuente: Elaboración propia, Software: Phase 2.0 v8).....	70
FIGURA 6.13: Ejemplo de análisis de equilibrio limite método GLE, para sección Ch1a , ajustando el análisis a la superficie de corte obtenida en análisis tensión deformación. En	

dicho ejemplo se somete a un análisis pseudoestático con sismo máximo, y se determina que la falla crítica ocurre con un F.S. de 2,81. (Fuente: Elaboración propia, Software: Slide v6).....	70
FIGURA 6.14: Correlación entre altura de GRAVA presente en análisis banco-berma, con Factor de Seguridad obtenido bajo análisis de equilibrio límite GLE, y análisis tensión-deformación, en condiciones de sismo máximo.....	71
FIGURA 6.15: Ejemplo de análisis tensión -deformación a sección T1b para establecer superficie de corte a nivel talud global. En dicho ejemplo se somete a un análisis pseudoestático con sismo máximo, y se determina que la falla crítica ocurre con un F.S. de 6,12. (Fuente: Elaboración propia, Software: Phase 2.0 v8)	73
FIGURA 6.16: Ejemplo de análisis de equilibrio límite método GLE, para sección T1b , ajustando el análisis a la superficie de corte obtenida en análisis tensión deformación. En dicho ejemplo se somete a un análisis pseudoestático con sismo máximo, y se determina que la falla crítica ocurre con un F.S. de 6,71. (Fuente: Elaboración propia, Software: Slide v6).....	73
FIGURA 6.17: Gráfico de variación de ángulo de talud global con factor de seguridad y probabilidad de falla obtenido, para sección T1b de rajo Tailandia 2.....	74
FIGURA 6.18: Gráfico de variación de ángulo de talud global con factor de seguridad y probabilidad de falla obtenido, para sección J2d de rajo Japón 2.	75
FIGURA 6.19: Gráfico de variación de ángulo de talud global con factor de seguridad y probabilidad de falla obtenido, para sección JNa de rajo Japón Norte.....	76

ANEXO A

FIGURA A. 1: Visualización de collares de los sondajes perteneciente al sector China Sur, en la parte superior se encuentra el rajo China Sur 1 y en el inferior el rajo China Sur 2.	84
FIGURA A. 2: Visualización de collares de los sondajes perteneciente al sector Tailandia, en la parte superior se encuentra el rajo Tailandia 1 y en el inferior el rajo Tailandia 2.	85
FIGURA A. 3: Visualización de collares de los sondajes perteneciente al sector Japón, en la parte superior se encuentra el rajo Japón 1 y en el inferior el rajo Japón 2.....	86
FIGURA A. 4: Visualización de collares de los sondajes perteneciente al sector Japón, específicamente el rajo Japón Norte.....	87

FIGURA A. 5: Criterios para estimación de la resistencia del material. (Tecnología y Geociencias. LTDA.).....	88
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ANEXO B

FIGURA B. 2: Proyección estereográfica de sector rajo China Sur en ella se representa la familia estructural de las estructuras menores.....	89
FIGURA B. 3: Detección de susceptible falla tipo toppling, talud Dip/DipDir 70°/230°, rajo China Sur 1.....	90
FIGURA B. 4: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/325°, rajo China Sur 1.....	90
FIGURA B. 5: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/63°, rajo China Sur 1.....	91
FIGURA B. 6: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/63°, rajo China Sur 1.....	91
FIGURA B. 7: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/335°, rajo China Sur 2.....	92
FIGURA B. 8: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/335°, rajo China Sur 2.....	92
FIGURA B. 9: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/68°, rajo China Sur 2.....	93
FIGURA B. 10: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/68°, rajo China Sur 2.....	93
FIGURA B. 11: Proyección estereográfica de sector rajo Japón en ella se representa la familia estructural de las estructuras menores.....	94
FIGURA B. 12: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/103°, rajo Japón 1.....	95
FIGURA B. 13: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/103°, rajo Japón 1.....	95
FIGURA B. 14: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/250°, rajo Japón 1.....	96

FIGURA B. 15: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/170°, rajo Japón 2.....	96
FIGURA B. 16: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/255°, rajo Japón 2.....	97
FIGURA B. 17: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/82°, rajo Japón 2.....	97
FIGURA B. 18: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/82°, rajo Japón 2.....	98
FIGURA B. 19: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/176°, rajo Japón Norte.....	98
FIGURA B. 20: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/270°, rajo Japón Norte.....	99
FIGURA B. 21: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch1a bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)	100
FIGURA B. 22: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch1b bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)	100
FIGURA B. 23: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch1c bajo caso estático, sismo operacional y máximo. (Phase 2.0 v8)	101
FIGURA B. 24. Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch1d bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)	101
FIGURA B. 25: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch2b bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)	102
FIGURA B. 26: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch2c bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)	102
FIGURA B. 27: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, T1a bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)	103
FIGURA B. 28: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, T1b bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)	103
FIGURA B. 29: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, T1d bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)	104

FIGURA B. 30: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, T1e bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)	104
FIGURA B. 31: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, J1c bajo caso estático, sismo operacional y máximo. (Phase 2.0 v8)	105

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1: Calidad de roca según RQD.....	15
TABLA 3.2: Clasificación calidad del Macizo según GSI.	16
TABLA 3.3: Calidad del macizo rocoso según RMR ₈₉ . (Z.T.Bieniawski, 1989).....	18
TABLA 3.4: Clasificación RMR ₈₉ , resistencia a la compresión simple estimada. (Z.T.Bieniawski, 1989).....	18
TABLA 3.5: Clasificación RMR ₈₉ , índice de calidad RQD. (Z.T.Bieniawski, 1989).....	19
TABLA 3.6: Clasificación RMR ₈₉ , espaciamiento. (Z.T.Bieniawski, 1989)	19
TABLA 3.7: Clasificación RMR ₈₉ , abertura de discontinuidades. (Z.T.Bieniawski, 1989) ...	19
TABLA 3.8: Clasificación RMR ₈₉ , persistencia de discontinuidades. (Z.T.Bieniawski, 1989)	19
TABLA 3.9: Clasificación RMR ₈₉ , rugosidad de discontinuidades. (Z.T.Bieniawski, 1989).	20
TABLA 3.10: Clasificación RMR ₈₉ , relleno de discontinuidades. (Z.T.Bieniawski, 1989) ...	20
TABLA 3.11: Clasificación RMR ₈₉ , alteración de discontinuidades. (Z.T.Bieniawski, 1989)	20
TABLA 3.12: Clasificación RMR ₈₉ , presencia de agua subterránea. (Z.T.Bieniawski, 1989)	20
TABLA 3.13: Criterios de aceptabilidad. (Read & Stacey, 2009).....	24
TABLA 3.14: Ecuaciones presentes en equilibrio hiperestático, dovelas. (Read & Stacey, 2009).....	35
TABLA 3.15: Incógnitas presentes en equilibrio hiperestático, dovelas. (Read & Stacey, 2009)	35
TABLA 3.16: Descripción de métodos numéricos. (Diaz, 1998)	38
TABLA 4.1: Unidades geotécnicas planteadas.	41
TABLA 4.2: Propiedades geomecánicas de estructuras. (Fuente: Tecnología y Geociencias.)	43
TABLA 4.3: Coeficiente sísmico para sismo operacional y máximo. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2016).....	45
TABLA 5.1: Frecuencia de fracturas y RQD según unidades litológicas y geotécnicas. (UG)	48
TABLA 5.2: Índice de calidad geomecánica RMR ₈₉ para cada una de las UG. (Fuente: Elaboración propia.)	49

TABLA 5.3: Resumen resultados ensayos de compresión simple. (Fuente: Elaboración propia)	50
.....	
TABLA 5.4: Resumen ensayos de compresión triaxial. (Fuente: Elaboración propia.)	51
TABLA 5.5: Resumen ensayos de tracción indirecta. (Fuente: Elaboración propia.)	52
TABLA 5.6: Resumen ensayos de velocidad de onda. (Fuente: Elaboración propia.)	52
TABLA 5.7: Resumen ensayos de PUP y PUG. (Fuente: Elaboración propia.)	53
TABLA 5.8: Parámetros geomecánicos de las diferentes UG. (Fuente: Elaboración propia software RocLab)	53
TABLA 5.9: Parámetros geomecánicos según criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Fuente: (Ingeniería de rocas LTDA., 2008)	54
TABLA 5.10: Detalle de estructuras principales Rank 3 Y 4 según sector. (Fuente: Tecnología y Geociencias)	55
TABLA 5.11: Detalle de set estructurales obtenidos según análisis estereográfico. (Fuente: Elaboración propia.)	55
TABLA 6.1: Características geométricas y de orientación de perfiles propuestos para análisis sector China Sur.	58
TABLA 6.2: Características geométricas y de orientación de perfiles propuestos para análisis sector Tailandia.	59
TABLA 6.3: Características geométricas y de orientación de perfiles propuestos para análisis sector Japón-India.	60
TABLA 6.4: Resultados análisis cinemático talud nivel banco berma, Rank 1 y 2.	61
TABLA 6.5: Resultados análisis cinemático talud nivel global, Rank 3 y 4.	62
TABLA 6.6: Resumen análisis equilibrio límite, para falla tipo plana y cuña en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a nivel banco-berma Sector China Sur. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane)	64
TABLA 6.7: Resumen análisis equilibrio límite, para falla tipo plana en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a nivel talud global. Sector Tailandia. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane)	66
TABLA 6.8: Resumen análisis equilibrio límite, para falla tipo plana y cuña en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a nivel talud banco-berma. Sector Japón. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane)	67

TABLA 6.9: Resumen análisis equilibrio límite, para falla tipo cuña en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a nivel talud global. Sector Japón. (Fuente: Elaboración propia, Software: Swedge v4)	68
TABLA 6.10: Resumen de resultados de la comparación de análisis tensión-deformación con análisis de equilibrio límite, a nivel banco-berma referente a taludes con UG GRAVA, sector China Sur 1 y 2, Tailandia 1 y Japón 1.....	69
TABLA 6.11: Resumen de resultados de la comparación de análisis tensión-deformación con análisis de equilibrio límite, a nivel talud global para todos los rajos propuestos en los sectores China Sur, Tailandia y Japón.....	72

ANEXO A

TABLA A. 1: Desglose de los ensayos realizados a cada uno de los sondajes.....	87
--------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN.

1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.

La estabilidad geomecánica de todo proyecto minero es fundamental para asegurar una labor de operación segura, es tal su importancia que las empresas realizan una investigación constante para mejorar los estudios de planificación, seguimiento y monitoreo de sus explotaciones mineras, con el fin de optimizar las condiciones laborales de sus trabajadores y a su vez garantizar la seguridad y productividad de la industria minera.

En seguida se presentará un estudio acorde a estos lineamientos, pero en razón de mantener la confidencialidad de la empresa y protección de su información, la presente memoria reemplazará el nombre real del proyecto, al de “Proyecto Continuidad Mina Gabriela” bajo el respaldo y guía de la empresa de consultoría geomecánica Tecnología y Geociencias LTDA., en la determinación del estudio y resguardo de los datos.

El “Proyecto Continuidad Mina Gabriela, tiene por objetivo prolongar el uso de la planta de procesos del antiguo proyecto “Mina Gabriela” durante 4,5 años, manteniendo su capacidad de producción de 30.000 ton/año de cátodos de cobre. Para ello la modificación más importante es la construcción de 7 nuevos rajos y depósitos de estéril, en reemplazo de los actuales rajos Gabriela y China.

Esta expansión requiere el desarrollo de 7 nuevos rajos en 3 sectores distintos, llamados sector China Sur, Tailandia y Japón-India.

Por ende, es de suma importancia poder determinar la estabilidad geomecánica de estos rajos propuestos, para conseguir la aprobación del Servicio Nacional De Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y así poder comenzar con la construcción y posterior operación de estos rajos.

Considerando lo anterior la principal motivación de esta memoria es poder determinar una caracterización geotécnica del macizo rocoso mediante base de datos provenientes de mapeos geotécnicos realizados por la empresa, para poder establecer las características del macizo considerando los parámetros y variables encontradas. Posteriormente realizar un estudio de estabilidad generando los factores de seguridad y probabilidad de falla en cada uno de estos rajos, para finalmente establecer algunas conclusiones y reevaluaciones de diseño para los casos críticos.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

El “Proyecto Continuidad Mina Gabriela” requiere realizar una expansión en su área de producción para así poder extender el uso de la planta de procesamiento de minerales, y para esto plantea desarrollar 7 nuevos rajos, divididos en 3 sectores. Rajos China 1 y 2, Rajos Tailandia 1 y 2 y Rajo Japón 1, Japón 2 y Japón Norte.

Uno de los factores relevantes para que el proyecto pueda ser aprobado es el estudio de estabilidad de los rajos, por esta razón es necesario realizar una caracterización geotécnica en el macizo rocoso, para determinar el comportamiento geomecánico de las diferentes unidades geotécnicas. De esta forma se puede evaluar la estabilidad de los rajos en condiciones estáticas y pseudoestáticas.

1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA.

Se plantea como solución realizar un estudio geomecánico a partir de las bases de datos entregadas, de las diferentes unidades geológicas para determinar y caracterizar las unidades geotécnicas. Seguido de esto analizar los diferentes sectores de mayor riesgo a poseer inestabilidades según criterios de diseño. Luego evaluar la estabilidad cinemática a nivel de Pit global y banco berma según criterios determinístico y probabilístico acorde a análisis de generación de fallas susceptibles.

Por último, generar recomendaciones, y posibles cambios de ángulos de talud, según corresponda.

1.4 OBJETIVOS.

1.4.1 Objetivo general.

- Analizar la estabilidad de los taludes global y banco-berma, referentes a los nuevos rajos propuestos por el “Proyecto Continuidad Mina Gabriela”, a partir de la realización de una caracterización geotécnica.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Definir las calidades geomecánicas del macizo rocoso basado en el RMR Bieniawski (1989).
- Identificar los sectores susceptibles a fallar mediante análisis cinemático, basándose en criterios de diseño.
- Evaluar la estabilidad de taludes que poseen sistemas con control estructural mediante análisis estático y pseudoestático de equilibrio límite, y evaluar la estabilidad de taludes con sistemas sin control estructural mediante métodos tensión-deformación y equilibrio límite a partir de características del macizo rocoso determinadas mediante la envolvente de falla de Mohr-Coulomb, diseño de taludes y geología estructural.
- Establecer una estimación de la altura máxima de talud posible a desarrollar en paredes construidas sobre la unidad geológica GRAVA de Atacama.
- Generar recomendaciones en sectores potencialmente inestables para satisfacer criterio de aceptabilidad, por medio de cambio de ángulos de talud global.

1.5 ALCANCES.

- Caracterización del macizo rocoso, condiciones de sismicidad y estimación de propiedades geomecánicas se realizan con bases de datos entregadas por la empresa minera.
- Se determina que el macizo se encuentra totalmente seco.
- Se determina que las unidades geotécnicas tienen la misma dimensión y ubicación que las unidades geológicas y se considera que cada una posee un comportamiento isotrópico.
- El análisis de estabilidad excluye el nivel Inter-rampa.
- Se excluye el análisis determinístico y probabilístico de las fallas del tipo *toppling*, solo se indicará las áreas susceptibles a localizar la ocurrencia de este tipo de falla.
- Los objetivos se pretenden cumplir con la realización de un análisis de estabilidad por medio de equilibrio límite con ayuda de un análisis tenso-deformacional, dando como

parámetros de salida un factor de seguridad y probabilidad de falla, de los diferentes sectores analizados propuestos por esta memoria.

1.6 METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS.

1. Revisión bibliográfica de la teoría sobre caracterización geotécnica de macizos rocosos, determinación de condiciones de inestabilidad, teoría de fallas, análisis de fallas y factores de seguridad.
2. Recopilación de antecedentes entregados por la empresa, análisis preliminar y filtro de datos.
3. Caracterización geotécnica de Unidades Geológicas (UG) mediante cálculo de RMR_{89} Bieniawski.
4. Cálculo de propiedades del macizo rocoso mediante envolvente de falla de Mohr-Coulomb según base de datos de ensayos de laboratorio, entregadas por laboratorio externo.
5. Determinación de perfiles con mayor susceptibilidad a fallar según condiciones de diseño.
6. Análisis estructural y determinación de sectores susceptibles a generar falla plana, cuña o *toppling*, a partir de análisis cinemático.
7. Cálculo de Factor de Seguridad (F.S.) y probabilidad de falla por medio de equilibrio límite bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, en sectores susceptibles a fallar, según análisis cinemático.
8. Análisis por modelamiento numérico tensión-deformación en UG con mala calidad para determinar superficie de corte referente a posible falla sin control estructural.
9. Cálculo de estabilidad estática y pseudoestática por equilibrio límite de superficie de corte obtenidas en análisis tensión-deformación.
10. Evaluación de sectores críticos y generación de recomendaciones y conclusiones del diseño de estos sectores, evaluando la posibilidad de efectuar modificaciones en los ángulos de talud global específicamente, basándose en los criterios de aceptabilidad propuestos y en la teoría de equilibrio límite por medio de modelos determinísticos.

1.6.1 Herramientas utilizadas.

Softwares.

- Dips.
Análisis estructural y análisis cinemático.
- Rocdata.
Cálculo de propiedades geomecánicas del macizo rocoso.
- Rocplane.
Análisis Equilibrio límite determinístico y probabilístico falla plana.
- Swedge.
Análisis Equilibrio límite determinístico y probabilístico falla cuña.
- Phase 2.
Análisis tensión-deformación por modelamiento numérico.
- Excel.
Estadísticas, filtro de datos, validación de datos, etc.

1.7 RESULTADOS ESPERADOS.

En primera instancia se pretende obtener como resultado una clasificación geomecánica de cada una de las unidades geológicas para poder asignar una clasificación cualitativa en cuanto a la calidad de la roca. A continuación, obtener las propiedades geomecánicas, para calcular la resistencia de ésta basándose en la teoría de falla de Mohr-Coulomb.

Posteriormente plantear una caracterización estructural y por medio de ésta, establecer un análisis cinemático que permita obtener los sectores proclives a generar fallas con control estructural.

Seguido de esto, obtener mediante modelamiento determinístico y probabilístico de equilibrio límite los factores de seguridad y probabilidad de falla que describan la estabilidad de los taludes estudiados. Y, de forma análoga, establecer un análisis tensión-deformación para áreas donde se produzcan fallas sin control estructural y determinar la superficie de corte para luego realizar un análisis de equilibrio límite y así obtener los factores de seguridad y probabilidad de falla.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

Finalmente replantear el diseño de algunos taludes en los cuales sea posible modificar su ángulo de inclinación global para satisfacer los criterios de aceptabilidad propuestos.

1.8 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.

El CAPÍTULO 1, consta de la introducción de esta memoria, en ella se exponen los antecedentes preliminares y la motivación, además se describe el tema y se dispondrá de una solución propuesta. Más adelante se presentan los objetivos, los alcances de la investigación y la metodología propuesta para cumplir con los objetivos, finalmente se exponen los resultados esperados.

En el CAPÍTULO 2, se describen los antecedentes generales del proyecto a realizar, contando con información geológica, estructural y mineralógica.

Posteriormente en el CAPÍTULO 3, se señala todo el marco teórico a considerar para la realización de esta memoria, describiendo métodos de clasificación geomecánica, criterios de falla y aceptabilidad, análisis de estabilidad de taludes entre otros.

El CAPÍTULO 4, muestra toda la información utilizada para el desarrollo de esta memoria y los métodos de los cuales se obtuvo.

Ya definida la información a utilizar, en el CAPÍTULO 5, se comienza a describir los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización geotécnica, entregando datos de clasificación geomecánica, propiedades del macizo rocoso y el cálculo de las propiedades geomecánicas mediante el criterio de falla de Mohr-Coulomb. Además de una caracterización estructural.

A continuación, en el CAPÍTULO 6, se exponen los resultados de los análisis de estabilidad de taludes, mediante métodos de equilibrio límite y métodos de tensión-deformación tanto para los casos de talud global como banco-berma, bajo los casos de análisis estático y pseudoestático.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

Acogiéndose a los resultados entregados en dichos análisis se plantea una evaluación de cambio de ángulo de talud global, para los casos de fallas por control estructural en los cuales el ángulo pueda ser modificado y aun así cumplir con el criterio de aceptabilidad.

En el CAPÍTULO 7, se desarrolla un análisis de los resultados obtenidos en los CAPÍTULOS 5 y 6, estableciendo comentarios y sugerencias.

Para terminar, se desarrollan las conclusiones de esta memoria, se presentan las referencias utilizadas y se adjuntas los anexos explicativos de los procedimientos ejecutados.

CAPÍTULO 2 : ANTECEDENTES GENERALES.

2.1 UBICACIÓN Y ACCESO.

El “Proyecto Continuidad Mina Gabriela” está ubicado en la Región de Antofagasta, Provincia de Antofagasta, comuna de Taltal, específicamente en el sector de Altamira, en el kilómetro (km) 71 de la ruta C-115-B, a aproximadamente 77 km al sur-este de la ciudad de Taltal, a una altura aproximada de 1730 metros sobre el nivel del mar.

Las coordenadas del centro del Proyecto son norte 7141880, este 412870, conforme al sistema de proyección UTM Huso 19 S, Datum WGS84 y corresponde a la ubicación de la planta de proceso actual.

Las rutas de acceso existentes y recomendadas son desde Antofagasta, Copiapó o Chañaral.

Desde Antofagasta se viaja hacia el sur por la Ruta 5 Norte. En el km 1.076 se debe tomar la ruta B-955 que tras 60 km se toma la ruta C-115-B. Luego de 3 km hacia el sur se llega a la entrada del área del Proyecto. La distancia total de este recorrido es de 367 km.

Desde Copiapó o Chañaral, en el km 982 de la Ruta 5 Norte se toma la vía C-13 en dirección hacia Diego de Almagro. Luego se toma el camino C-115-B en dirección al norte. Después de alrededor de 48 km, un camino estabilizado por bischofita permite el acceso hasta la mina Gabriela. La distancia desde Chañaral hasta el Proyecto mediante este recorrido es de aproximadamente 135 km.

2.2 GEOLOGÍA.

El marco geológico que se describe a continuación está basado en la información contenida en la Hoja geológica regional Altamira del SERNAGEOMIN (Matthews *et al*, 2010). Se describen depósitos consolidados y la roca basal, integrada por rocas estratificadas e intrusivos.

2.2.1 Depósitos.

La roca basal está cubierta de una capa de espesor variable de gravas consolidadas, localmente cementada con sales, asignadas tradicionalmente a la unidad informal de Gravas de Atacama. Estas gravas se caracterizan por proporciones variables de clastos y matriz; los clastos polimícticos son angulosos, de diámetro variable; la matriz generalmente arenosa, suele ser escasa. En estas gravas son frecuentes las intercalaciones de depósitos piroclásticos. La secuencia de Gravas de Atacama sobreyace a la roca basal en el distrito en áreas disectadas. Estos depósitos enmascaran un paleo relieve irregular y su espesor es muy variable. Las potencias informadas de las Gravas de Atacama en el área del Proyecto varían entre 5 y 80 m. En las quebradas y llanuras de inundación se describen depósitos aluviales y aluvionales pleistocénicos a holocénicos pobremente consolidados que sobreyacen a las Gravas de Atacama.

Las laderas de los cerros pueden estar cubiertas de depósitos coluviales.

2.2.2 Rocas estratificadas.

En la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa afloran volcanitas asignadas a la Formación La Negra, integrada por andesitas y brechas con intercalaciones de sedimentitas marinas; hacia el techo de la formación aumentan las rocas volcanoclásticas con intercalaciones de rocas sedimentarias continentales, escasamente estratificadas.

En Sierra Altamira predominan las andesitas porfíricas y afaníticas, con intercalaciones piroclásticas asignadas a los depósitos superiores de la Formación La Negra. Esta Formación se interpreta como un arco volcánico Jurásico, que marca el inicio del ciclo de convergencia

CAPÍTULO 2 : ANTECEDENTES GENERALES.

de la Placa de Nazca con la Placa Sudamericana, en un régimen de convergencia oblicua del noroeste hacia el sureste.

En el cerro Guanaco, ubicado inmediatamente al oriente del yacimiento “Gabriela”, afloran volcanitas y cuerpos intrusivos hipabísales de edad paleocena, que en este sector corresponden a una unidad de domos dacíticos porfíricos de hornblenda y biotita y brechas volcánicas de composición intermedia, dacíticas a andesíticas.

2.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.

Se presentan tres sistemas estructurales, con sus correspondientes sistemas adicionales complementarios a ellos.

En primer lugar, el sistema representado por la Falla Frankenstein el cual está en dirección noreste, en segundo lugar, la Falla Altamira representando su sistema noroeste y finalmente un sistema norte sur, paralelo a la Zona de Falla de Atacama. Adicionalmente se observa un sistema de orientación aproximada este-oeste y buzamiento hacia el sureste, representado por la Falla Olga. (FIGURA 2.2)

2.4 MINERALIZACIÓN.

El yacimiento Gabriela es un sistema del tipo Fe-Cu-calcita que se encuentra emplazado en rocas volcánicas (andesitas), volcano-sedimentarias (areniscas volcánicas y brechas volcánicas) y subvolcánicas (ocoítas, de carácter intrusivo) asociadas a la Formación La Negra.

En el nivel supergeno existe una zona de óxidos de cobre hasta alrededor de 80 m de profundidad, en ella se encuentran principalmente los minerales crisocola, malaquita y acompañados de especularita (óxido de hierro) y calcita.

A mayor profundidad se observa una zona de mixtos (óxidos verdes de cobre y calcosina), seguidos de una zona de sulfuros enriquecidos, con calcosina secundaria. La mineralización primaria corresponde principalmente a calcosina hipógena (con bornita y escasa cantidad de calcopirita), la cual se encuentra relacionada a especularita, calcita y feldespatos potásico, este último especialmente en profundidad (clorita y epidota se encuentran principalmente rodeando los cuerpos de mineral) (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2016).

2.5 DESCRIPCIÓN PROYECTO.

En esta sección se describe los rajos existentes en el proyecto Gabriela y los rajos propuestos para Proyecto Continuidad Mina Gabriela.

2.5.1 Rajo Gabriela.

Este rajo abierto, comenzó a operar en octubre de 2009, su aprobación consta de una superficie de 55 hectáreas (ha) y una profundidad de 137 metros (m), una extracción de 35 millones de toneladas (ton) de mineral oxidado y la misma cantidad de estéril dado que posee una razón estéril mineral de 1/1. Con una operación propuesta de 8 a 9 años.

2.5.2 Rajo China.

Este rajo abierto comenzó a operar en 2012, su aprobación consta de una superficie de 19,9 ha, 110 m de profundidad. Considera una extracción de 6.000.000 ton, con una tasa de 250.000

CAPÍTULO 2 : ANTECEDENTES GENERALES.

ton/mes y 12.000.000 ton de estéril con una tasa de extracción de 500.000 ton/mes, a una razón estéril mineral de 2.

2.5.3 Rajo India.

El rajo India se mantuvo operativo en 2009. Utiliza 4,6 ha, con 27 m de profundidad y se removieron 702.000 ton de material de cobertura para pilas de lixiviación y 486.000 ton de material que no ha tenido uso y ha sido depositado en el sector oeste del rajo.

2.5.4 Rajo Japón.

Este rajo se ubicará aproximadamente a 1 km al noreste del rajo China, tendrá una superficie de 41 ha, 120 m de profundidad, y extraerá 720.000 ton de mineral y 1,3 millones de ton de estéril con una razón estéril mineral de 1,8.

El rajo Japón constará de 3 rajos los cuales se unirán en un gran rajo detallado anteriormente. Estos 3 rajos serán Japón 1, Japón 2 y Japón Norte.

2.5.5 Rajo China Sur.

China sur se ubicará aproximadamente a 5 km al suroeste de la planta de LX/SX/EW, y a 200 m al sur del rajo China. Tendrá una superficie de 46 ha, 85 m de profundidad y extraerá 830.000 ton de mineral y 3,8 millones de ton de estéril, con una razón estéril mineral de 4,6, con una vida de 1 año.

El rajo China Sur constará de 2 rajos los cuales se unirán en un gran rajo detallado anteriormente. Estos 2 rajos son China Sur 1 y China Sur 2.

2.5.6 Rajo Tailandia.

El rajo Tailandia se ubicará aproximadamente a 3 km al oeste de la planta, tendrá una superficie de 72 ha, 100 m de profundidad. Se plantea extraer 1,6 millones de ton de mineral y 8 millones de ton de estéril con una razón estéril mineral de 5. Y una duración de 1 año.

El rajo Tailandia constará de 2 rajos los cuales se unirán en un gran rajo detallado anteriormente. Estos rajos serian Tailandia 1 y Tailandia 2.

CAPÍTULO 3 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

3.1 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO.

Existen diferentes metodologías para clasificar el macizo rocoso, estas se basan en la observación directa, ya sea de forma cualitativa o cuantitativa, con el fin de determinar sus propiedades mecánicas y estructurales.

La determinación de las características geotécnicas de un macizo rocoso se fundamenta en el cálculo de diferentes índices y ratings que han sido desarrollados y actualizados por los autores a través de la historia. Esta caracterización generara una categorización de la roca según su tipo y calidad geomecánica.

En minería a cielo abierto los más utilizados son: RQD, GSI, RMR, dichos índices dependen de propiedades estructurales y mecánicas del material destinado a caracterizar. A continuación, se describirán como características geotécnicas, la frecuencia de fracturas, la resistencia a la compresión uniaxial y los índices anteriormente nombrados.

3.1.1 Frecuencia de fracturas. *Fracture Frequency* .(FF)

La frecuencia de fracturas es una medida de la cantidad de fracturas o discontinuidades en una longitud determinada de testigo, generalmente se utiliza 1 metro.

3.1.2 Resistencia a la Compresión Uniaxial Simple. *Uniaxial Compressive Strength*. (UCS)

Es un ensayo en el cual se somete un testigo a una compresión no confinada, es decir con un esfuerzo principal σ_1 con un módulo cuantificable y un esfuerzo σ_3 nulo. El UCS está relacionado con la calidad de la roca y específicamente con la composición de ésta.

Se considera una propiedad del macizo rocoso y puede generar una clasificación geotécnica de éste. Además, esta propiedad es utilizada por diferentes índices de clasificación geomecánica como lo son RMR, MRMR.

3.1.3 Rock Quality Designation. RQD. (1967)

Este sistema fue desarrollado por Deere entre 1963 y 1967, se define como el porcentaje de recuperación de testigos que poseen una longitud mayor o igual a 10 cm. Existen 3 metodologías para la obtención del RQD.

El primer método se calcula midiendo la totalidad de trozos que superan los 10 cm, y se calcula el porcentaje según el largo total del testigo muestreado.

$$RQD = \frac{\sum \text{Trozos} \geq 10\text{cm}}{\text{Longitud Total}} \times 100\% \quad (1)$$

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) recomienda un diámetro de sondaje superior o igual a 54,7 milímetros.

El segundo método calcula el RQD en función del número de fisuras por metro. Determinadas en los estudios geológicos y geotécnicos.

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda \times (0.1\lambda + 1)} \quad (2)$$

λ : N° de fisuras/Espacio

Finalmente, el tercer método consta en calcular el RQD en función de las fracturas contenidas en un metro cúbico (J_v = Joint Volumetric number), entregados por los estudios geológicos-geotécnicos.

$$RQD = 115 - 3,3 \times J_v \quad (3)$$

TABLA 3.1: Calidad de roca según RQD.

RQD	Calidad de la masa de roca
<25%	Muy pobre
25-50%	Pobre
50-75%	Regular
75-90%	Bueno
90-100%	Muy bueno

3.1.4 Índice Geológico de Resistencia. *Geological Strength Index. GSI. (1.995)*

Según (E.T.Brown & E.Hoek , 2003) el GSI estima la reducción de la resistencia del macizo rocoso, para diferentes condiciones geológicas. Este índice fue planteado por Hoek (1995) y ha sido actualizado en 1998, 2000, 2001.

CAPÍTULO 3 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Esta metodología utilizada para la caracterización del macizo rocoso se basa en la observación de la estructura rocosa, en cuanto al tamaño de bloques de ésta y la condición superficial de las discontinuidades, mediante factores de rugosidad y alteración de las juntas.

El GSI se utiliza cuando es necesario estimar los parámetros de entrada para cálculo de resistencia.

En la FIGURA 3.1 se puede estimar el GSI en base a una descripción geológica del macizo rocoso, en la TABLA 3.2 se representa la clasificación del macizo rocoso según la calidad determinada a partir del GSI.

Por otro lado, es posible generar una relación entre este índice y el RMR₈₉ de Bieniawski, la cual ha sido determinada de forma empírica. Esta relación se cumple para casos en el cual la condición de agua es nula, y la orientación de discontinuidades es 0. Del mismo modo se puede traspasar de RMR₈₉ a GSI, pero solo para casos en el cual la puntuación de RMR₈₉ sea igual o superior a 23. Ecuación (4).

$$GSI=RMR_{89}-5 \quad (4)$$

TABLA 3.2: Clasificación calidad del Macizo según GSI.

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

CAPÍTULO 3 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

discontinuidades, condición de discontinuidades, aguas subterráneas y orientación de discontinuidades.

La puntuación total indica la calidad del macizo rocoso como muestra la TABLA 3.3.

TABLA 3.3: *Calidad del macizo rocoso según RMR₈₉. (Z.T.Bieniawski, 1989)*

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

El cálculo del rating para cada uno de los parámetros analizados se detalla a continuación.

3.1.5.1 Resistencia a la compresión simple:

El rating concerniente a la resistencia a la compresión simple o UCS se determina en base a la TABLA 3.4.

TABLA 3.4: *Clasificación RMR₈₉, resistencia a la compresión simple estimada. (Z.T.Bieniawski, 1989)*

Descripción	Resistencia a la compresión Simple [MPa]	Valoración
Extremadamente dura	>250	15
Muy Dura	100 – 250	12
Dura	50 – 100	7
Moderadamente dura	25 – 50	4
Blanda	5 - 25	2
Blanda	1 - 25	1
Blanda	<1	0

3.1.5.2 RQD.

El rating asociado al RQD se basa en la TABLA 3.5: Clasificación RMR₈₉, índice de calidad RQD.

TABLA 3.5: Clasificación RMR89, índice de calidad RQD. (Z.T.Bieniawski, 1989)

Índice de calidad RQD [%]	Calidad	Valoración
0 - 25	Muy Mala	3
25 - 50	Mala	8
50 - 75	Regular	13
75 - 90	Buena	17
90 - 100	Excelente	20

3.1.5.3 Espaciamiento.

El rating asociado al espaciamiento se detalla en la TABLA 3.6.

TABLA 3.6: Clasificación RMR89, espaciamiento. (Z.T.Bieniawski, 1989)

Descripción	Espaciado de las juntas	Tipo de macizo rocoso	Valoración
Muy Separadas	> 2 m	Sólido	20
Separadas	0,6 – 2 m.	Masivo	15
Moderadamente juntas	200– 600 mm.	En bloques	10
Juntas	60 – 200 mm.	Fracturado	8
Muy juntas	< 60 mm.	Machacado	5

3.1.5.4 Condición de las discontinuidades.

El rating asociado al estado de las discontinuidades se separa considerando la condición de abertura TABLA 3.7, la persistencia de las discontinuidades TABLA 3.8, su rugosidad TABLA 3.9, el relleno que poseen TABLA 3.10 y finalmente la alteración de las discontinuidades TABLA 3.11.

TABLA 3.7: Clasificación RMR89, abertura de discontinuidades. (Z.T.Bieniawski, 1989)

Grado	Descripción	Separación de las caras	Valoración
1	Abierta	> 5mm	0
2	Moderadamente abierta	1 – 5 mm	1
3	Cerrada	0,1 – 1 mm	4
4	Muy cerrada	< 0,1 mm	5
5	Ninguna	0	6

TABLA 3.8: Clasificación RMR89, persistencia de discontinuidades. (Z.T.Bieniawski, 1989)

Grado	Descripción	Continuidad	Valoración
1	Muy baja	< 1 m	6
2	Baja	1 – 3 m	4
3	Media	3 – 10 m	2
4	Alta	< 0,1 mm	1
5	Muy alta	> 20 m	0

TABLA 3.9: Clasificación RMR89, rugosidad de discontinuidades. (Z.T.Bieniawski, 1989)

Grado	Descripción	Valoración
1	Muy rugosa	6
2	Rugosa	5
3	Ligeramente rugosa	3
4	Lisa	1
5	Plana (espejo de falla)	0

TABLA 3.10: Clasificación RMR89, relleno de discontinuidades. (Z.T.Bieniawski, 1989)

Grado	Descripción	Valoración
1	Blando > 5 mm	0
2	Blando < 5mm	2
3	Duro > 5mm.	2
4	Duro < 5 mm	4
5	Ninguno	6

TABLA 3.11: Clasificación RMR89, alteración de discontinuidades. (Z.T.Bieniawski, 1989)

Grado	Descripción	Valoración
1	Descompuesta	0
2	Muy alterada	1
3	Moderadamente alterada	3
4	Ligeramente alterada	5
5	No alterada	6

3.1.5.5 Presencia de agua.

La determinación del rating de agua se establece una relación entre la presión de agua y la tensión principal mayor TABLA 3.12.

TABLA 3.12: Clasificación RMR89, presencia de agua subterránea. (Z.T.Bieniawski, 1989)

Descripción	Presión de agua/ tensión	Valoración
Seco	0	15
Ligeramente húmedo	0-0.1	10
Húmedo	0.1-0.2	7
Goteando	0.2-0.5	4
Fluyendo	>0.5	0

3.2 DISEÑO DE TALUD.

El análisis geomecánico se utiliza en gran parte para poder determinar un diseño óptimo de talud, considerando los componentes geométricos, la seguridad y la operatividad.

Los componentes geométricos que definen un talud minero son los siguientes FIGURA 3.2:

- Pie de Banco: Es el punto de inicio del banco, con respecto a la horizontal.
- Cresta del Banco: Es el punto más alto del banco, donde termina el talud e inicia la berma.
- Altura de banco: Es la altura de la perpendicular que se genera entre el pie y la cresta del talud, esta típicamente adaptada a las características de los equipos de carguío.
- Ángulo caro de banco: Corresponde al ángulo formado entre la horizontal, pivoteando en el pie del banco, y la pared del talud. Estos pueden variar de 55° a 80° .
- Berma: Es la superficie de seguridad que se genera entre el pie y la cresta del siguiente banco.
- Ancho de berma: Es la distancia entre el pie banco y la cresta del banco.
- Ángulo inter-rampa: Es el ángulo entre el pie del banco por donde pasa un segmento de rampa y el pie del banco inmediatamente superior.
- Altura talud global: Corresponde a la altura perpendicular generada entre la horizontal en el pie del banco más profundo y la cresta del banco más alto.
- Ángulo talud global: Es el ángulo generado entre la horizontal generada en el pie del primer banco, pivoteando en el pie con la cresta del banco más alto el cual intercepta con la topografía.
- Rampa: Es la superficie diseñada para el movimiento de equipos de transporte.

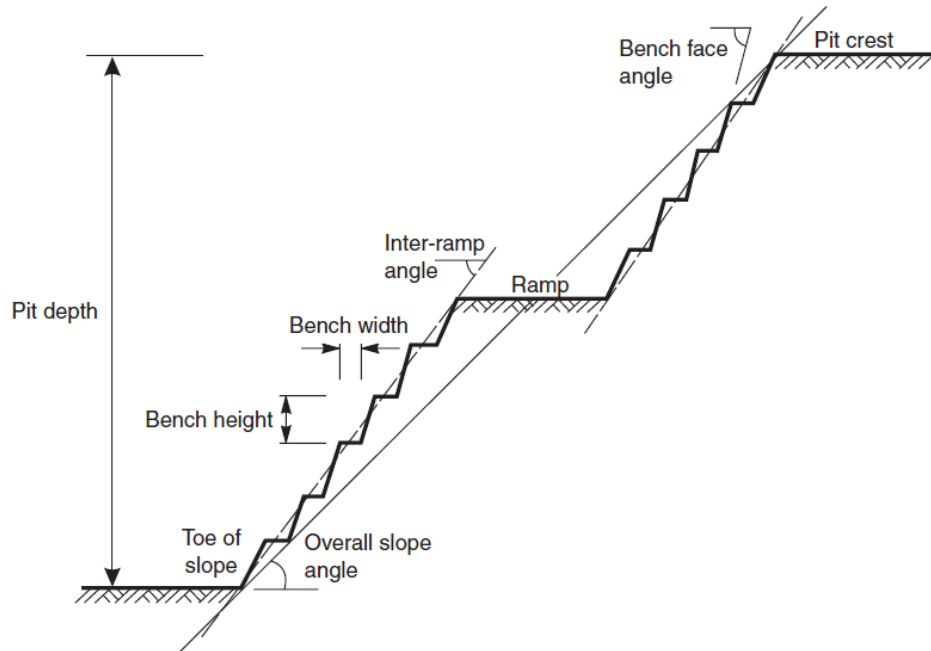


FIGURA 3.2: Componentes geométricos en el diseño de un talud. (Fuente: (Read & Stacey, 2009))

3.3 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD.

La definición de los criterios de aceptación permite determinar el nivel de rendimiento requerido de una pendiente contra la inestabilidad. (Read & Stacey, 2009)

Es decir, cómo se comportaría un talud con un diseño establecido, con respecto a las problemáticas estructurales o no estructurales que podrían surgir, y como se podría realizar ajustes en los ángulos o dimensiones para quedar dentro de los valores estables, instaurados por el criterio.

Los criterios se expresarán inicialmente en términos de un Factor de Seguridad y posteriormente en Probabilidad de Falla. El nivel de aceptabilidad en cualquiera de los términos anteriormente nombrados puede variar, dependiendo del nivel de riesgo que se quiere admitir a partir de los diseños planteados.

3.3.1 Factor de Seguridad. (F.S.)

El factor de seguridad es una forma de cuantificar el nivel de riesgo que se tiene en el análisis de un caso que está sometido a diferentes fuerzas.

Se define como la razón entre las fuerzas resistivas con las fuerzas deslizantes. Mediante este factor es posible determinar los sectores susceptibles a fallar, por lo cual es frecuentemente utilizado como criterio de aceptabilidad en el diseño minero.

$$F.S. = \frac{\text{Fuerzas Resistivas}}{\text{Fuerzas Deslizantes}} \quad (5)$$

La interpretación de este factor está estrechamente ligado al sector en el cual se quiere evaluar, el tipo de diseño y en la experiencia del observador.

3.3.2 Probabilidad de Falla. (PF)

Esta metodología permite determinar la distribución de probabilidad de una variable dependiente en función del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables independientes, las cuales generan la variable dependiente, en este caso el factor de seguridad de la estabilidad de un talud.

Se determina la curva de distribución de probabilidad de las variables dependientes del factor de seguridad, las cuales son principalmente, la cohesión, ángulo de fricción, peso específico, etc.

A partir de esta distribución se puede determinar la probabilidad de falla, definida como la parte del área bajo la curva de distribución de probabilidad del factor de seguridad menor que 1,0. (Valencia, Assis, & Carvalho, 2005)

Si bien en términos estáticos se considera que un factor de seguridad estable es 1, la medición y cálculos de propiedades geotécnicas contiene una incerteza y esto sumado al riesgo de una falla de un talud a gran escala se proponen para cálculo de probabilidad de falla factores de seguridad superiores a 1, estos rondan entre 1.3 a 1.5 o al criterio del ingeniero, evaluando la incerteza y credibilidad en la toma de datos.

A continuación, en la TABLA 3.13 se establecen los criterios de aceptabilidad considerados en distintas condiciones, según (Read & Stacey, 2009):

TABLA 3.13: Criterios de aceptabilidad. (Read & Stacey, 2009)

Talud	Consecuencias	F.S. (Min) (Estático)	F.S. (Min) (Pseuestático)	PF(Max) P[F.S≤1]
Banco	Bajo-Alto	1,1	NA	25-50%
Inter-rampa	Bajo	1,15-1,2	1,0	25%
	Moderado	1,2	1,0	20%
	Alto	1,2-1,3	1,1	10%
Global	Bajo	1,2-1,3	1,0	15-20%
	Moderado	1,3	1,05	10%
	Alto	1,3-1,5	1,1	5%

Existen determinados criterios para establecer si un talud es estable o si posee riesgos.

Si el talud cumple con los criterios de análisis determinístico de F.S. y de probabilidad de falla se concluye que el talud es estable.

Si el talud cumple con el análisis determinístico, pero no con el probabilístico se considera que el talud es estable, pero debe ser monitoreado porque posee un riesgo mínimo.

Si el talud no cumple con el análisis determinístico, pero si con el probabilístico, es recomendable modificar ligeramente el diseño del talud.

Finalmente, si el talud no cumple con el criterio de aceptabilidad en ninguno de los 2 métodos de análisis se considera que el talud es inestable y debe reconfigurarse el diseño y considerar mecanismos de contención y fortificación.

3.4 CRITERIOS DE FALLA DEL MACIZO ROCOSO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

3.4.1 Criterio de falla de Hoek and Brown.

Es un método empírico que fue realizado con una estadística de variados ensayos de compresión triaxial. Como resultado se obtuvo una fórmula generalizada, para determinar la resistencia del macizo rocoso.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_1} + s \right)^a \quad (6)$$

σ_1 : Esfuerzo Principal Mayor.

m_b : Constante Macizo Rocoso.

σ_3 : Esfuerzo Principal Menor.

a: Constante Macizo Rocoso.

σ_{ci} : Resistencia a la compresión Unixial.

s: Constante Macizo Rocoso.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (7)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (8)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right) \quad (9)$$

m_i = Constante según tipo de roca. D= Factor Calidad de Tronadura.

GSI= Índice Geológico de Resistencia.

El criterio original se ha encontrado adecuado para rocas de buena calidad a mediana, en donde la resistencia del macizo está controlada por bloques de roca ensamblada. La falla de estos macizos rocosos puede ser definida con la ecuación utilizando un valor de $a=0.5$ (E.T.Brown & E.Hoek , 2003)

3.4.2 Criterio de falla de Mohr-Coulomb.

El criterio específico de Mohr-Coulomb, es para determinar fallas en caso de que existan estructuras y se puede ajustar para resistencia del macizo rocoso.

$$\tau = c + \sigma_n \tan\varphi \quad (10)$$

τ =Resistencia al corte

σ_n = Esfuerzo Normal

c= Cohesión

φ = Ángulo de Fricción

Existe una variante de este que puede determinar un valor de resistencia del macizo rocoso en función de la cohesión y el ángulo de fricción.

Una de las limitantes de esta técnica es su restricción respecto a la teoría de Mohr-Coulomb y el tipo de materiales para la cual aplica. Si bien, en general la resistencia de los macizos

rocosos se caracteriza por envolventes de falla no lineales, es posible su aplicación en criterios que tengan una mejor representación, como el generalizado de Hoek- Brown. Para el ajuste de los parámetros de resistencia en la literatura es posible encontrar diferentes técnicas, que se encuentran validadas y calibradas.

Determinar la equivalencia de parámetros entre criterios de falla usando el Software RocLab (Rocscience) (Hoek et al., 2002).

Dado que una gran cantidad de softwares geotécnicos están aún escritos en términos del criterio de rotura de Mohr-Coulomb, es necesario determinar los ángulos de fricción y las resistencias cohesivas para cada macizo rocoso e intervalo de esfuerzos. Esto se hace ajustando una relación lineal media a la curva generada a partir de la ecuación generalizada de Hoek- Brown para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por $\sigma_1 < \sigma_3 < \sigma_{3max}$. (E.T.Brown & E.Hoek , 2003)

3.4.3 Tipos de fallas.

Existen diferentes tipos en los cuales puede fallar un talud, las principales son fallas con control estructural, en ellas es posible determinar las discontinuidades que provocan la falla, por otro lado, existen las fallas sin control estructural donde no es posible detectar las discontinuidades.

3.4.4 Falla plana.

Es una falla de control estructural en la cual el deslizamiento ocurre a través de una superficie plana. Para estudiar la ocurrencia de una posible falla de este tipo es necesario realizar un análisis cinemático en la red estereográfica, en la cual se debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Los rumbos del talud y de la estructura deben ser paralelos con una variación de a lo máximo 20° .
- El buzamiento del talud ψ_t debe ser mayor al de la estructura ψ_e y además el buzamiento de la estructura debe ser mayor al ángulo de fricción de la estructura ϕ .

La representación en la Red de Smith de este tipo de falla se visualiza con una concentración de polos, en la posición opuesta a la dirección de deslizamiento y el plano de la pared.

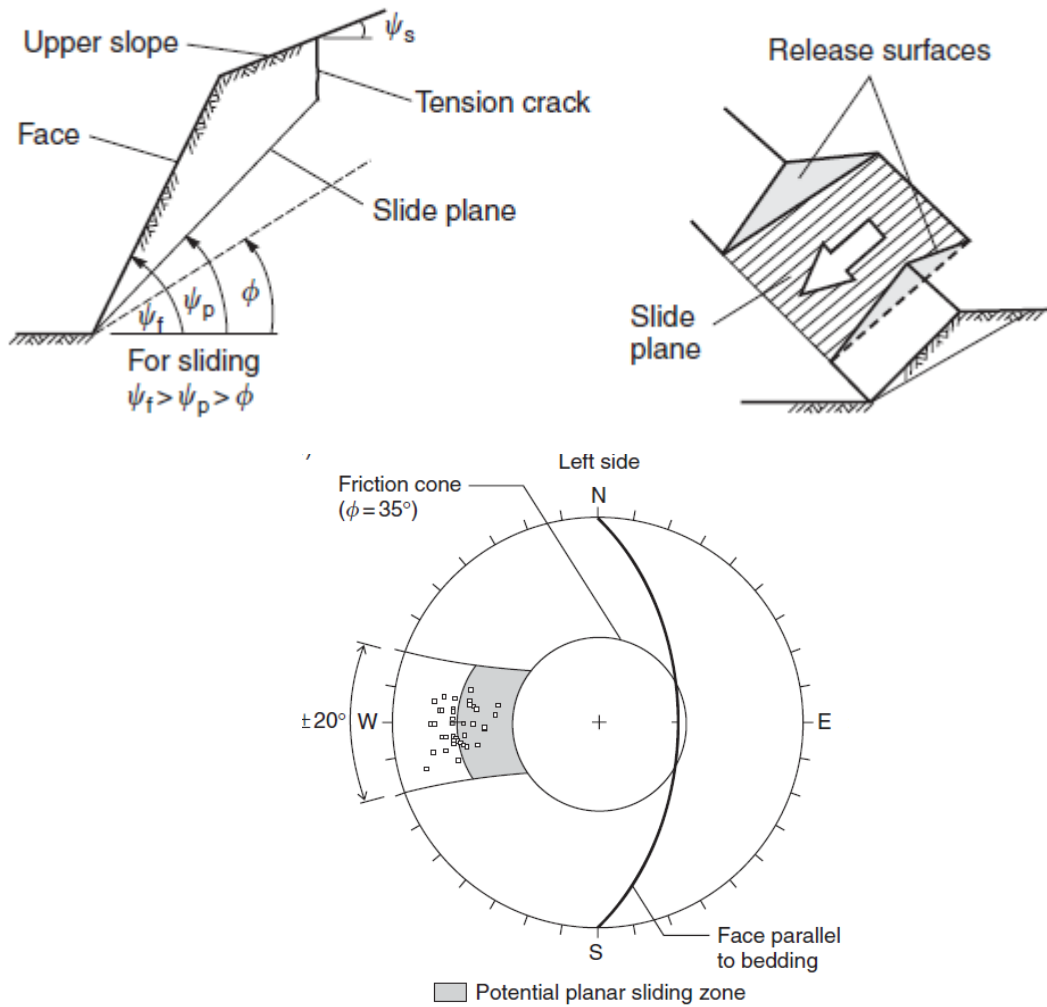


FIGURA 3.3: Condiciones de buzamiento para falla plana. Representación visual falla plana. Visualización en Red de Smith para falla plana. (Wyllie & Mah, 2004)

3.4.5 Falla Cuña.

Es una falla de control estructural y ocurre cuando 2 planos de estructuras se interceptan generando una línea de intersección paralela a la cara del talud. Su representación en la Red de Smith debe cumplir con las siguientes condiciones.

- El azimut de la línea de intersección debe ser aproximadamente paralela a la cara del talud.
- El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor al buzamiento del talud.

- El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor al ángulo de fricción de las discontinuidades.

La representación en la red estereográfica de esta falla se visualiza con una concentración de dos familias de polos las cuales crean las estructuras que se interceptaran. Además, el punto de intersección de las estructuras debe posicionarse por detrás de la representación de la cara del talud.

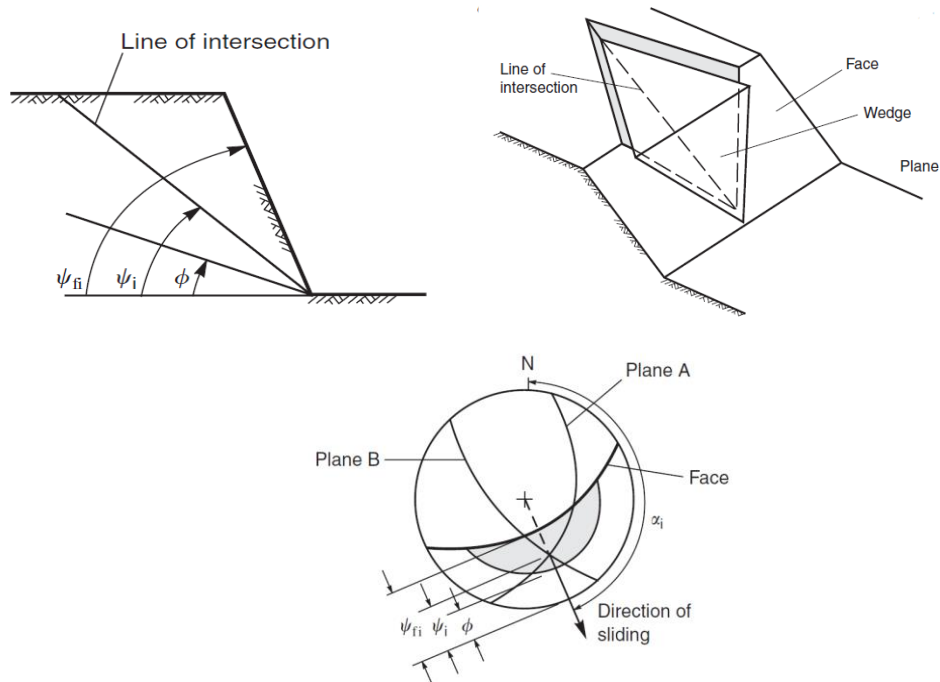


FIGURA 3.4: Representación visual falla cuña. Condiciones de buzamiento para falla cuña. Visualización en Red de Smith para falla cuña. (Wyllie & Mah, 2004)

3.4.6 Falla *Toppling*.

Es una falla de control estructural, y se presenta cuando existe una serie de estructuras que mantean fuertemente y de forma paralela a la superficie del talud. Además, intersectan la cara del talud generando bloques.

Su análisis cinemático representado en la red estereográfica debe cumplir las siguientes condiciones:

- El azimut de las discontinuidades debe ser cuasi paralelo a la superficie del talud, con una diferencia de máximo 20°.

- El buzamiento debe cumplir con la condición de que la diferencia entre la perpendicular y el buzamiento de las estructuras (ψ_p) debe ser menor o igual a la diferencia en el buzamiento de la cara del talud (ψ_f) y el ángulo de fricción de las discontinuidades (ϕ).

$$(90 - \psi_p) \leq (\psi_f - \phi) \quad (11)$$

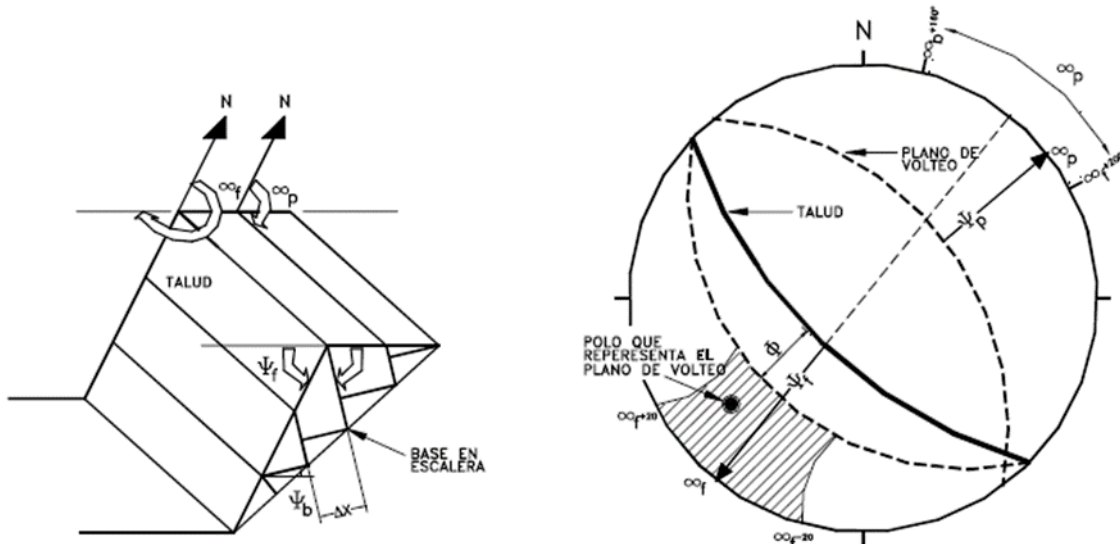


FIGURA 3.5: Condiciones de buzamiento para falla toppling. Visualización en Red de Smith para falla toppling.

3.4.7 Falla Rotacional.

La falla del tipo rotacional ocurre en macizos rocosos altamente fracturados, suelos y rocas blandas, taludes formados por roca estéril y macizos rocosos altamente meteorizados y alterados. Este comportamiento ocurre a nivel de talud global y es a consecuencia de la pérdida de cohesión del macizo rocoso por alguna de las causas mencionadas con anterioridad. El análisis de falla circular se realiza a aquellos perfiles de talud en zonas en donde el macizo rocoso presente un GSI menor a 30.

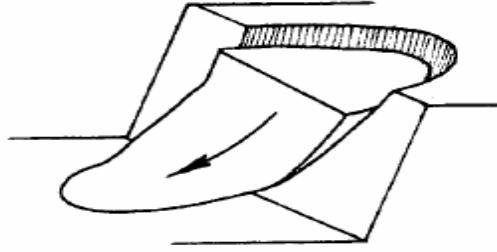


FIGURA 3.6: Falla rotacional o circular.

3.5 ESTABILIDAD DE TALUDES.

Existen diferentes métodos para poder calcular la estabilidad de taludes, en primera instancia se encuentran los métodos de cálculo de equilibrio límite, en el cual existen los métodos exactos usados para los casos de falla plana, falla cuña y falla *toppling*, también los métodos no exactos utilizados generalmente para el cálculo de falla rotacional, en el cual podemos encontrar los métodos de cálculo por dovelas y círculo de fricción. FIGURA 3.7

Por otro lado, existen los métodos de cálculo en deformaciones, los cuales sustentan su teoría en métodos numéricos.

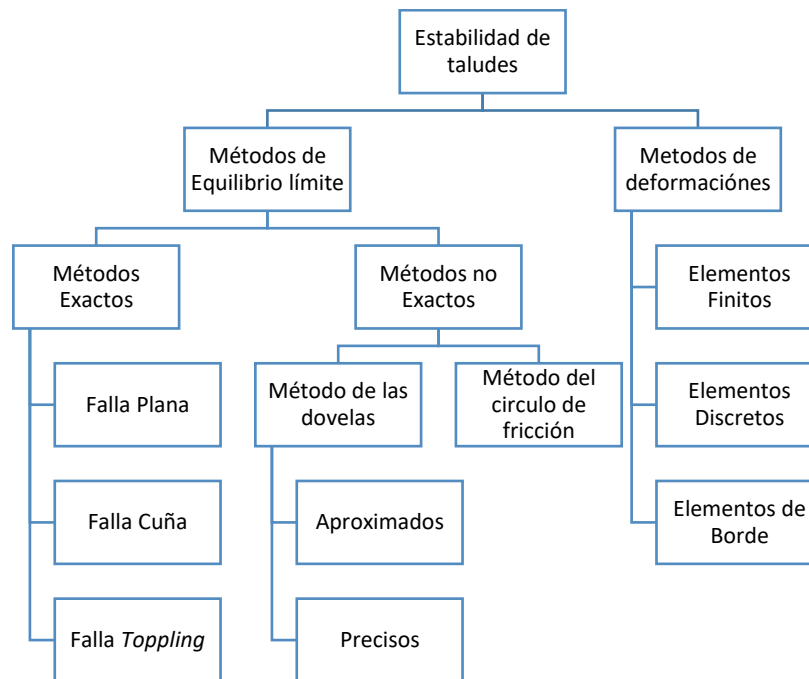


FIGURA 3.7: Clasificación de métodos de cálculo por equilibrio límite. (Fuente: Elaboración propia)

3.5.1 Cálculo de estabilidad de taludes por equilibrio límite.

El cálculo de estabilidad por equilibrio límite trata de cuantificar el factor de seguridad del talud, mediante las leyes físicas de la estática. En este análisis se excluye las deformaciones del terreno, y se centran en el estudio de una estructura de corte o falla la cual consta de características uniformes (ángulo de fricción y cohesión), esta estructura genera un bloque de deslizamiento. Posteriormente se realiza una comparación de las fuerzas deslizantes presente en el bloque y las fuerzas resistivas presentes en las características geotécnicas de los materiales constituyentes de la estructura.

El cálculo por equilibrio límite se divide en métodos exactos y métodos aproximados.

3.5.1.1 Métodos exactos.

Se centran en determinar la estabilidad de fallas con control estructural preferentemente fallas planas y fallas tipo cuña. La aplicación de las leyes estáticas entrega soluciones estáticas.

3.5.1.2 Modelo determinístico.

El modelo determinístico propone calcular el factor de seguridad de un talud dependiendo de la fuerza de corte generada a lo largo de la superficie deslizante.

Para todos los fallos de tipo cortante, se puede suponer que la roca es un material que se comporta con el criterio de falla de Mohr-Coulomb en el que la resistencia al corte se expresa en términos de la cohesión C y del ángulo de fricción ϕ . Para una superficie deslizante en la que una tensión normal efectiva σ está actuando, la resistencia al cizallamiento τ se obtiene a través de la ecuación (10) ,sección 3.4.2 (Wyllie & Mah, 2004).

Esta ecuación surge modificaciones dependiendo de las diferentes variables que pueden agregarse, ya sea grieta de tracción o condición de agua y también el tipo de análisis, el cual puede ser estático o pseudoestático con presencia de aceleración sísmica.

Para el análisis de estabilidad de fallas planas se utiliza un análisis determinístico en 2 dimensiones y para el caso de falla tipo cuña en 3 dimensiones por su complejidad.

3.5.1.3 Equilibrio límite falla plana.

La condición de equilibrio límite de una falla plana requiere del estudio de diferentes factores, que actúan entre el bloque deslizante y las fuerzas resistivas al corte. Entre ellas se puede presentar que el bloque este sometido a condiciones de presión de agua, referente a los niveles freáticos, a una grieta de tracción, y a condiciones de anclaje para diseño.

A continuación, en la FIGURA 3.8 se grafica la geometría y las fuerzas existentes en el estudio de equilibrio límite de una posible falla plana.

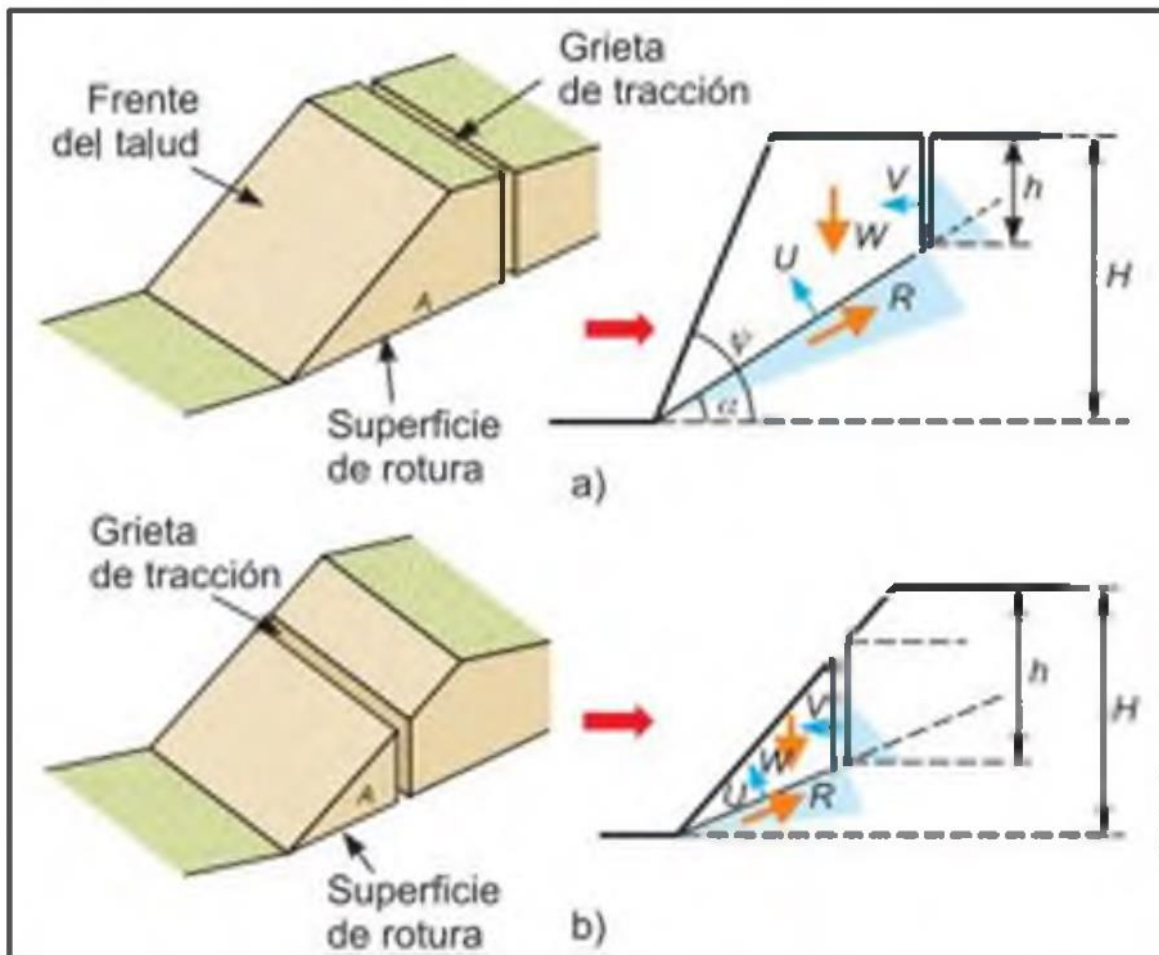


FIGURA 3.8: Geometría de la rotura plana en talud. a) Grieta de tracción en cabecera, b) Grieta de tracción en la cara del talud. (Vallejo 2004, modificado de Hoek y Bray, 1981)

Para obtener el factor de seguridad del estudio del equilibrio límite del bloque deslizante se utiliza la siguiente ecuación:

$$F.S = \frac{cA + (W \cos(\alpha) - U + T \cos(\delta)) \tan(\phi)}{W \sin(\alpha) - T \sin(\delta)} \quad (12)$$

3.5.1.4 Equilibrio límite falla cuña.

Las expresiones matemáticas que proporcionan el factor de seguridad de una cuña por el método analítico son complicadas y laboriosas de resolver. En el caso más simple, suponiendo que solo existe fricción para los dos planos de cuña y que el ángulo de fricción es el mismo para ambos, el coeficiente de seguridad se obtiene a partir de las siguientes expresiones.

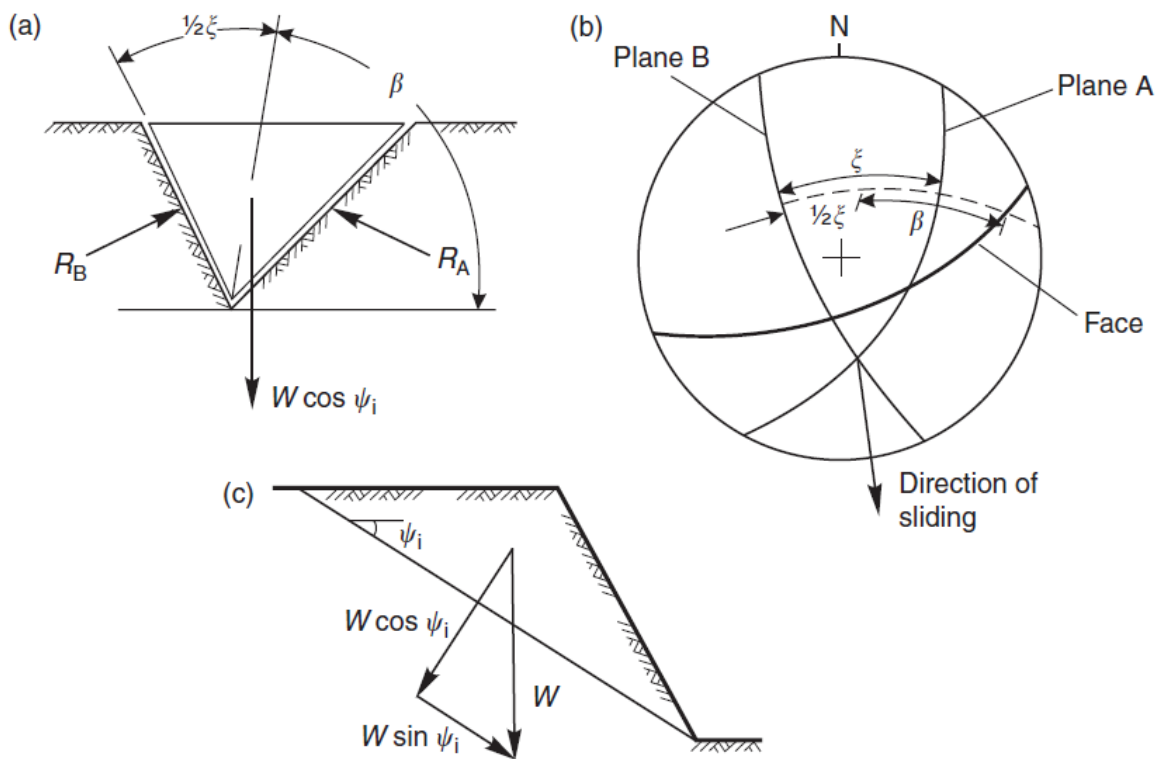


FIGURA 3.9: Resolución de fuerzas para calcular el factor de seguridad de la cuña: (a) vista de la cuña que mira la cara que muestra la definición de los ángulos β y ξ , y las reacciones en los planos deslizantes R_A y R_B ; (b) red estereográfica que muestra la medición de los ángulos β y ξ ; (c) corte transversal de cuña que muestra la resolución del peso de cuña W . (Read & Stacey, 2009)

$$F.S = \frac{(R_a + R_b) \tan(\phi)}{W \sin(\psi_i)} \quad (13)$$

R_a y R_b son las reacciones normales proporcionadas por los planos A y B y se calculan de la siguiente forma:

$$Ra * \sin\left(\beta - \frac{1}{2\xi}\right) = Rb * \sin\left(\beta + \frac{1}{2\xi}\right) \quad (14)$$

$$Ra * \cos\left(\beta - \frac{1}{2\xi}\right) = Rb * \cos\left(\beta + \frac{1}{2\xi}\right) \quad (15)$$

Si se incluye los parámetros de cohesión de las estructuras, el cálculo se dificulta y para esto existen softwares para realizar análisis determinístico y probabilístico de la estabilidad de cuñas, en donde se puede agregar fuerzas debidas a presión de agua, fuerzas de tensión, carga sísmica, estas pueden ser desarrolladas por procedimientos computacionales como lo es el software Swedge. (Gonzalez de Vallejo, 2004)

3.5.1.5 Modelo probabilístico.

El modelo probabilístico estudia la probabilidad de que el talud falle. Se utiliza una simulación de Montecarlo, en la cual cada variable se expresa como una distribución estadística tal cual explica la sección 3.3.2.

El resultado de esta simulación son parámetros en forma aleatoria de cada distribución y se calcula el factor de seguridad en base a estos valores.

Posteriormente se obtiene una distribución de factores de seguridad, y ahí se determina la probabilidad de que el factor de seguridad sea menor al criterio de aceptabilidad establecido.

3.5.1.6 Métodos no exactos.

Estos métodos son utilizados cuando se está en presencia de un sistema sin control estructural, es decir son estáticamente indeterminados dado que poseen más incógnitas que ecuaciones. El tipo de falla más importante en esta categorización son las susceptibles a generar una falla rotacional o circular.

Para poder generar una aproximación estática de esta problemática se discretiza la posible sección de falla circular a través de dovelas a las cuales se les aplican las características del macizo rocoso.

A cada dovela se le analiza su nivel de estabilidad, lo que permite concluir acerca de la seguridad global del talud. FIGURA 3.10

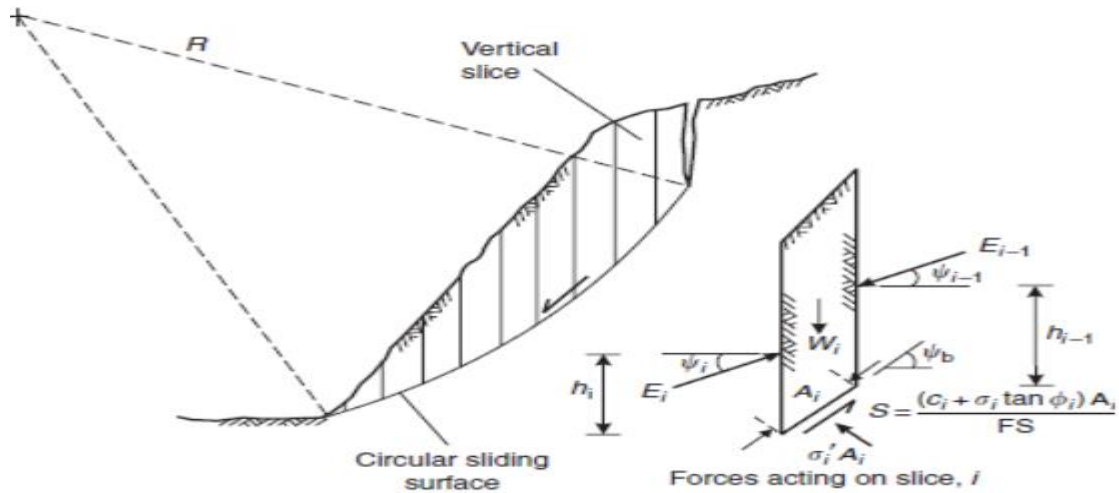


FIGURA 3.10: Representación de métodos de dovelas. Fuerzas actuando en dovela. (Wyllie & Mah, 2004)

El peso de la dovela se descompone en una fuerza tangencial y en una vertical, además actúa una fuerza cortante definida por la ecuación de Mohr-Coulomb, por consiguiente, depende de la fuerza normal la cual está afectada por la presión generada si existe condición de agua. Además, existen interacciones de fuerzas de reacción entre cada dovela. En seguida, se detallan las ecuaciones e incógnitas de este sistema, donde n corresponde al número de dovelas.

TABLA 3.14: Ecuaciones presentes en equilibrio hiperestático, dovelas. (Read & Stacey, 2009)

Ecuaciones	Condición
n	Momento de equilibrio ($\sum M = 0$)
$2n$	Equilibrio horizontal y vertical por dovela. ($\sum F_h$ & $\sum F_v = 0$)
n	Ecuación Mohr-Coulomb
$4n$	Número total de ecuaciones

TABLA 3.15: Incógnitas presentes en equilibrio hiperestático, dovelas. (Read & Stacey, 2009)

Incógnitas	Condición
1	Factor de seguridad
n	Fuerza normal. (A_i)
n	Posición de la N en el plano de la dovela
n	Fuerza cortante (S)
$n-1$	Fuerza horizontal entre dovelas
$n-1$	Fuerza vertical entre dovelas
$n-1$	Línea de empuje
$6n-2$	Número total de incógnitas

Los análisis de discretización por dovelas se dividen en dos sectores según la cantidad de datos utilizados y las suposiciones propuestas para resolver la disyuntiva de indeterminación estática, los cuales son métodos de dovelas aproximados y métodos precisos.

3.5.1.7 Métodos dovelas aproximados.

Dentro de los métodos de dovelas aproximados existe el método ordinario de dovelas (OMS) (Fellenius 1927,1936) es el método más simple y antiguo y el único que puede ser resuelto de manera manual. Este método descuida todas las fuerzas inter-dovelas y no satisface la fuerza de equilibrio para el bloque deslizante. Solo se centra en el equilibrio de momentos.

El método de Bishop (1955) y Janbu's simplificado (1954, 1957,1973) también son solo parciales soluciones de equilibrio. Ambos suponen cero fuerzas entre dovelas reduciendo el número de incógnitas ($4n-1$). Bishop deja la fuerza horizontal en un equilibrio insatisfecho por dovela y Janbu no hace satisfacer completamente el equilibrio de momentos, y plantea un factor de corrección para explicar esta deficiencia. (Read & Stacey, 2009)

3.5.1.8 Métodos dovelas precisos.

Los métodos precisos surgen en la década de los 60 y podemos destacar principalmente el método de Spencer (1967) y Morgenstern-Price (1965). Estos métodos obtienen soluciones exactas del problema, pero con un ajuste predeterminado por suposiciones.

El método de Spencer satisface totalmente el equilibrio de esfuerzos y de momentos, debido que se plantea la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas, estableciéndoles el mismo ángulo de inclinación. Es utilizado para todo tipo de geometría.

De forma similar el método de Morgenstern- Price plantea la suposición que existe una función que relaciona las fuerzas cortantes con las fuerzas normales entre dovelas. Esta función puede considerarse constante, esta metodología es más rigurosa que la de Spencer, pero casi igual de precisa.

3.5.2 Cálculo de estabilidad de taludes por deformaciones.

A diferencia de un análisis de estabilidad por equilibrio límite, el análisis tensión-deformación no se basa solo en la estática, enfocándose en estudiar los esfuerzos deslizantes versus los esfuerzos cortantes, por el contrario, le da importancia a los parámetros de deformación del macizo rocoso tal cual lo define Vallejo (2004):

“el comportamiento tensión-deformación o esfuerzo-deformación de un cuerpo viene definido por la relación entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas y hace referencia a como se va deformando y como va variando el comportamiento del material rocoso a lo largo de la aplicación de la carga, o, dicho de otro modo, como varia la resistencia del material para determinados niveles de deformaciones.” (p.152)

A partir de un análisis tensión-deformación es posible encontrar el comportamiento del material antes de llegar a la rotura, posteriormente determinar la superficie de falla y también el comportamiento después de la rotura de manera de calcular posibles desplazamientos.

Se utiliza la aplicación de modelos numéricos para la resolución de las ecuaciones de elasticidad o plasticidad, donde da como resultado las tensiones, deformaciones y desplazamientos que se van generando en todo el modelo analizado, comparando el estado de equilibrio del talud con la magnitud de los desplazamientos ocurridos en el material.

Este tipo de análisis se concentra en el estudio de taludes compuestos por material con baja consolidación, principalmente suelos o macizos rocosos intensamente fracturados, blandos o poco competentes donde no existan planos de discontinuidad que puedan alterar la naturaleza continua del macizo rocoso, y así generar un bloque preferencial de rotura.

Se aplica también al análisis de taludes rocosos de profundidad importante donde pueden producirse tensiones elevadas, plastificaciones y deformaciones importantes.

3.5.2.1 Modelamiento numérico.

El modelamiento numérico determina principalmente esfuerzos, deformaciones y *stress factor*, a través de cálculos numéricos, con base en una teoría ya observada o estudiada.

Su metodología fundamental se basa en la discretización de elementos, la cual consiste en dividir en pequeños fragmentos un elemento, ya sea de dominio continuo o de borde, y a cada

uno de estos fragmentos asignarle las propiedades físicas del cuerpo al cual constituye. Para así poder ver su comportamiento en forma particular y luego extrapolarlo a un comportamiento general con cada una de las fracciones discretizadas.

Si bien el modelamiento numérico es una herramienta de análisis potente, requiere de una gran fuente de información para poder ser desarrollado al igual que un diseño acorde al caso de estudio. Dicho método requiere los siguientes parámetros de entrada:

- Geometría. (2D Y 3D)
- Geología (Litología)
- Esfuerzos in situ.
- Tipo de modelo.
- Propiedades de los materiales.
- Aproximación Numérica.

Los métodos numéricos de análisis se pueden clasificar en varias categorías, como se muestra en la tabla:

TABLA 3.16: Descripción de métodos numéricos. (Diaz, 1998)

Método	Características	Utilización	Softwares
Elementos Finitos (FEM)	Se asume una malla de elementos con sus respectivos nodos y propiedades elastoplásticas de los materiales.	Se aplica a taludes que puedan considerarse como masas continuas sin bloques.	FLAC, Plaxis,Phase.
Diferencias Finitas (FDM)	Se elabora una malla con una variedad de relación esfuerzo-deformación.	Se utiliza para modelar masa rocosa con un alto grado de fracturación.	FLAC
Elementos Distintos o Discreto (DEM)	Se divide el talud en elementos con sus propiedades internas y de las uniones entre los elementos que se pueden mover libremente.	Se aplica para analizar inclinación de bloques.	FLAC
Elementos de Borde (BEM)	Se discretizan las áreas para poder modelar la ocurrencia de agrietamientos en el talud.	Se utiliza para estudiar problemas de propagación de grietas.	MAP 3D

CAPÍTULO 4 : DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.

4.1 INFORMACIÓN UTILIZADA.

Para el desarrollo de esta memoria la empresa puso a disposición la siguiente información.

- Información geotécnica y geológica de campañas históricas de sondajes.
- Base de datos de mapeos estructurales.
- Información de Ensayos de laboratorio para diferentes unidades geológico-geotécnicas. (Rocktest, Mecanica de Rocas Ltda.)
- Estudio de impacto ambiental del Proyecto Continuidad Mina Gabriela.
- Informe de estabilidad de Rajo China. (INGEROC 2008)
- Modelo de unidades geológicas y estructuras dominantes en software Minesight.
- Diseños propuestos por la empresa de rajos en los sectores China Sur, Tailandia y Japón-India.
- Mapa geológico “Pelusa” (Tecnología y Geociencias)

4.1.1 Levantamiento de información geológica y geotécnica.

El levantamiento de información geológica se realizó a partir de la información presente en los informes geológicos, entregados por la empresa, además de la información descrita en los mapeos históricos de los sondajes de exploración y caracterización establecidos por la compañía minera.

Del mismo modo la información geotécnica es detallada a través de las campañas de sondajes entregadas por la empresa, en la cual se encuentran dos bases de datos, una con 2.452 m de información en 36 sondajes y la otra con 1.092,15 m en 14 sondajes.

En razón a la calidad de información se determinó usar la base de datos que tiene 14 sondajes, debido a que contiene los datos necesarios para determinar una clasificación geomecánica mediante el índice de calidad del macizo rocoso RMR₈₉. En la cual se encuentran: descripción de FF, calidad de las discontinuidades, resistencia a la compresión simple estimada, espaciamiento entre discontinuidades, presencia de molido, tipo de relleno y grado de meteorización.

4.1.2 Unidades litológicas.

Según las características geológicas entregadas por los sondajes, y los estudios geológicos se pueden describir las siguientes unidades litológicas.

- **Gravas (GRAVA):** Corresponde a depósitos aluviales y coluviales modernos consistentes en ripios, gravas y arenas polimícticas, no consolidadas a semi-consolidadas. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2018)
- **Ocoíta (AO):** Andesita basáltica de color pardo con textura porfírica de grano grueso. Podría presentar amígdalas. El espesor oscila entre 200-350 m. Esta unidad no está bien definida si corresponde a roca de origen volcánico o de origen hipabisal, ya que presenta características de ambos tipos de rocas. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2018)
- **Brecha Volcanoclastica (BV):** Esta unidad presenta variaciones en su litología, con un predominio de rocas sedimentarias y rocas volcánicas, con intercalaciones de brechas volcánicas, tobas de color gris verdoso y brechas piroclásticas andesíticas de color violáceo a rojizo. Las rocas sedimentarias se caracterizan por alternancia de capas de areniscas finas a gruesas con intercalaciones de lutitas y conglomerados. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2018)
- **Brecha Tobácea (BT):** Secuencia de brechas y areniscas tobáceas de color gris verdoso a rojizo. Las brechas son clasto-soportadas, y los clastos corresponden a tobas dacíticas, riolíticas, con escasos clastos andesíticos. La matriz está formada por areniscas tobáceas, bien seleccionadas, con algunos fragmentos mayores de similar composición. La alteración de esta unidad corresponde a una silicificación intensa, acompañada en menor cantidad por clorita y arcilla. En el sector, la potencia alcanza hasta los 60 metros. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2018)
- **Andesita Porfírica (AND):** Flujo de andesitas de grano fino a medio y color pardo a pardo-grisáceo, con textura amigdaloidal localmente relleno de sericita, carbonatos y clorita en una masa fundamental afanítica. El espesor alcanza hasta los 140 m en el sector de Japón-India. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2018)

- Flujo de basaltos con intercalaciones de hialoclastitas y peperitas (B): Flujo de basaltos con intercalaciones de hialoclastitas y peperitas, con espesores variables en el cuadrángulo de Japón-India. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2018)
- Tobas y brechas tobáceas andesíticas (TB): Secuencia de color pardo-verdosa, polimíctica, clasto-soportado. Los clastos corresponden a andesitas y tobas. Su potencia alcanza los 200 metros en el sector norte de Tailandia. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2018)
- Monzonitas y Monzodioritas con variaciones texturales y dioritas (MZ-DR): las rocas intrusivas observadas comprenden variedades composicionales de los tipos monzodioríticas, dioríticas y monzoníticas, con sus variedades texturales desde equigranular a tipos porfídicos. Además, se observan sills y diques de composiciones andesíticas. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2018)

4.1.3 Unidades geotécnicas.

Las unidades geotécnicas se definen a partir de la información recopilada, y en conjunto con la empresa se determina que se dividirán de la misma forma que las unidades litológicas. Pero en razón a las diferencias geotécnicas entre las unidades litológicas y los diferentes sectores a estudiar, se plantean 12 unidades geotécnicas, divididas por localización, las cuales se detallan a continuación en la TABLA 4.1 .

TABLA 4.1: Unidades geotécnicas planteadas.

Sector	UG	Descripción
China Sur	GRAVA	Gravas superficiales del sector China Sur
	AO	Ocoítas
Tailandia	GRAVA	Gravas superficiales del sector Tailandia
	AO	Ocoítas
	BV	Brechas volcánicas
	BT	Brechas Tobáceas
	MZ-DR	Dioritas y cuarzo Dioritas
Japón	AND	Andesitas
	AO	Ocoítas
	B	Flujo de basaltos con intercalaciones de hialoclastitas y peperitas
	MZ-DR	Monzonitas y Monzodioritas con variaciones texturales y dioritas
	GRAVA	Gravas superficiales del sector Japón

4.1.4 Caracterización geotécnica.

Para realizar la caracterización geotécnica, se toma en consideración las bases de datos entregadas por la empresa, las cuales constan de información de sondajes de diamantina con características geológicas y estructurales, con ellas es posible calcular el índice de clasificación RMR₈₉, por sobre el índice GSI. Esto debido a que el índice RMR₈₉ puede ser determinado a partir de información proveniente de sondajes, en cambio el GSI demanda información obtenida de forma superficial en las paredes de la roca a estudiar.

4.1.5 Características geomecánicas del macizo rocoso.

Para realizar los estudios de estabilidad es necesario determinar la resistencia a los diferentes esfuerzos que posee el macizo rocoso, esto es posible cuantificarlo, para este caso según un criterio de falla mediante el cálculo de la envolvente de Mohr-Coulomb.

El cálculo de este criterio requiere de características geomecánicas del macizo rocoso, las cuales son el ángulo de fricción y la cohesión. Para establecer estas características es necesario poseer información de las propiedades mecánicas del macizo rocoso. Estas propiedades son obtenidas mediante ensayos de laboratorio los cuales explican el comportamiento de los testigos provenientes de las diferentes unidades geotécnicas, a través de ensayos de compresión simple, compresión triaxial, ensayos de densidad, módulos elásticos, tracción indirecta, velocidad de ondas, etc.

Estos ensayos fueron realizados a un total de 144 muestras provenientes de 15 sondajes, a cargo del laboratorio Rocktest, Mecánica de Rocas Ltda, los cuales son detallados en ANEXO A.

Posteriormente para la obtención de las propiedades geomecánicas cohesión y ángulo de fricción se ejecuta un procesamiento de datos mediante el software RocLab, el cual es un programa de computación que permite determinar los parámetros de resistencia del macizo rocoso, de acuerdo con el criterio de rotura generalizado de Hoek-Brown y a su vez el cálculo de los parámetros equivalentes del criterio de Mohr-Coulomb a partir de la envolvente de rotura de Hoek-Brown.

4.1.6 Información estructural.

Las familias estructurales presentes en los diferentes sectores fueron catalogadas y diferenciadas por medio de mapeo estructural proveniente de los 19 sondajes. Con esta información se pretende realizar análisis de concentración y persistencia estructural mediante red estereográfica.

Ya localizados los sets estructurales principales, es necesario realizar análisis cinemático, y compararlos con la orientación de los taludes a estudiar.

Además, las características geomecánicas establecidas por estimación de datos presentes en otros análisis estructurales según la empresa, son los siguientes:

TABLA 4.2: Propiedades geomecánicas de estructuras. (Fuente: Tecnología y Geociencias.)

Propiedades geomecánicas de estructuras	Cohesión [ton/m²]	Ángulo de fricción [°]	Peso unitario [ton/m³]
RANK 1;2;3;4	10	30	2,8

4.1.7 Diseño Minero.

La empresa plantea la explotación de los diferentes sectores con la siguiente configuración de diseño. Estas configuraciones son elaboradas considerando variables económicas, operativas y de estabilidad.

4.1.7.1 Sector China Sur.

El sector China Sur será explotado por medio de 2 rajos, rajo China Sur 1 y rajo China Sur 2 en seguida se detallan los parámetros de diseño para cada rajo.

China Sur 1 posee un ángulo global variable con un promedio de 40 ° y un ángulo a nivel banco berma fijo de 70°, la altura del talud global varía entre los 40 y 60 m aproximadamente dependiendo de la cara del rajo debido a la diferencia topográfica. La altura de cada banco es variable pero promedia los 20 m.

China Sur 2 tiene un ángulo global variable con un promedio de 38° y como lo es en el diseño de todos los rajos el ángulo a nivel banco berma es de 70°. Las alturas de talud global son

variables de la misma forma que China Sur 1 entre 40 y 60 m. Y la altura a nivel banco berma va desde los 16 a los 22 m.

La superficie total explotada de forma preliminar por ambos rajos es de 19,1 ha.

4.1.7.2 Sector Tailandia.

De manera similar a China Sur, el sector Tailandia será explotado por 2 rajos, Tailandia 1 y Tailandia 2.

En el caso de Tailandia 1 el ángulo de talud global varía entre 35° y 51°, y la profundidad del Pit varía entre los 70 y 85 m. En cambio, el ángulo de talud banco berma como la altura de este talud son fijas con valores de 70° y 20 m respectivamente.

Para Tailandia 2 el ángulo de talud global varía entre 33° y 55° y la altura de talud global varía entre los 37 y 60 m. A su vez la altura de talud a nivel banco berma varía entre 10 y 20 m, según condiciones de topografía.

La superficie total a explotar según diseño es de 72 ha.

4.1.7.3 Sector Japón

El sector Japón será explotado en 3 rajos, los cuales son Japón 1, Japón 2 y Japón Norte. En cuanto a Japón 1 y Japón 2 los ángulos de talud a nivel banco berma son de 70° y la altura promedia los 20 m. Pero en cuanto a talud global existen diferencias ya que en cuanto al ángulo de talud en Japón 1 promedia los 42° y en Japón 2 varía entre los 45° y los 55°, de forma similar existen diferencias en la altura de talud global ya que en Japón 1 varía entre 60 y 80 m, mientras que en Japón 2 fluctúa entre 50 y 90 m debido a la diferencia entre cotas.

Finalmente, Japón Norte posee un ángulo global de diseño que esta entre 30° y 70° y la altura entre 16 y 36 m. En cuanto al nivel banco berma la altura varía entre 15 y 20 m. La superficie que abarca este sector es de 41 ha.

4.1.8 Sismicidad.

El análisis que pretende esta memoria se sustenta bajo un estudio de la estabilidad de taludes sometido a distintos escenarios de tipo estático y pseudoestático, para el segundo caso se

CAPÍTULO 4 : DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.

somete al talud, a condiciones de aceleración producidas por caso de sismicidad operacional y sismicidad máxima la cual se basa en el estudio sismológico de la zona.

Acogiendo la información establecida por la empresa, se consideran los siguientes coeficientes sísmicos horizontal de diseño para el análisis de estabilidad pseudoestático.

TABLA 4.3: Coeficiente sísmico para sismo operacional y máximo. (Tecnología y Geociencias. LTDA., 2016)

Sismo	Coefficiente sísmico horizontal (K_H)
Operacional	0,05
Máximo	0,20

CAPÍTULO 5 : CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.

Según las bases de datos con información geotécnica, entregadas por la empresa se pudo analizar un total de 14 sondajes con una cantidad de 454 muestras de todos los rajos. Por medio de la suma de trozos y el porcentaje de molido se calcula el índice RQD el cual es el primer indicio para determinar una caracterización geotécnica, sumado a la frecuencia de fracturas.

Estos sondajes son categorizados según las respectivas unidades geotécnicas planteadas y se realiza una composición¹ de 1 m, para obtener mayor representatividad según los límites de las unidades geotécnicas. A raíz de esto se obtuvo una base de datos con 1.093 muestras las cuales manifiestan las siguientes distribuciones generales de FF (FIGURA 2.1) y RQD (FIGURA 5.2).

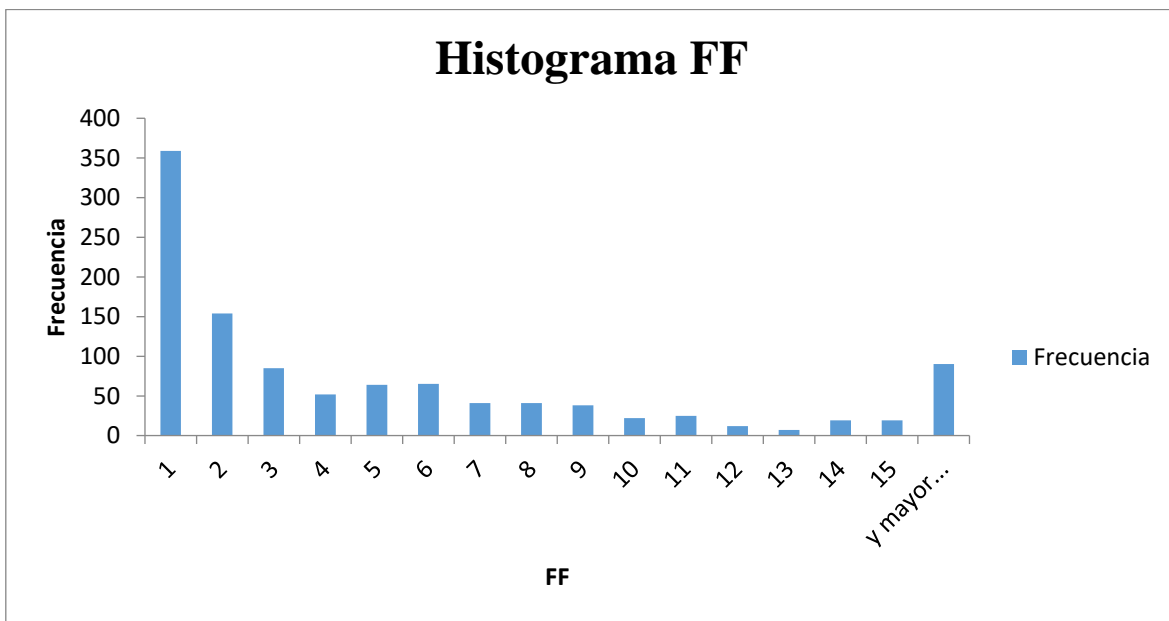


FIGURA 5.1: Histograma FF de datos compositados. (Fuente: Elaboración propia)

La FF posee una distribución en la cual los parámetros se comportan de manera exponencial, con una concentración de muestras con Frecuencia de Fracturas menor o igual a 3, lo que

¹ La composición es una actividad que viene a regularizar al soporte de la variable en estudio (volumen), al realizarse tiende a disminuir la dispersión de los datos (bajan los estadísticos de varianza, desviación estándar, coeficiente de variación). Y se obtiene mayor representatividad de los límites de los diferentes sectores estudiados.

explica a primera instancia que se está en presencia de una matriz rocosa con un material consolidado, con bajo nivel de fracturamiento.

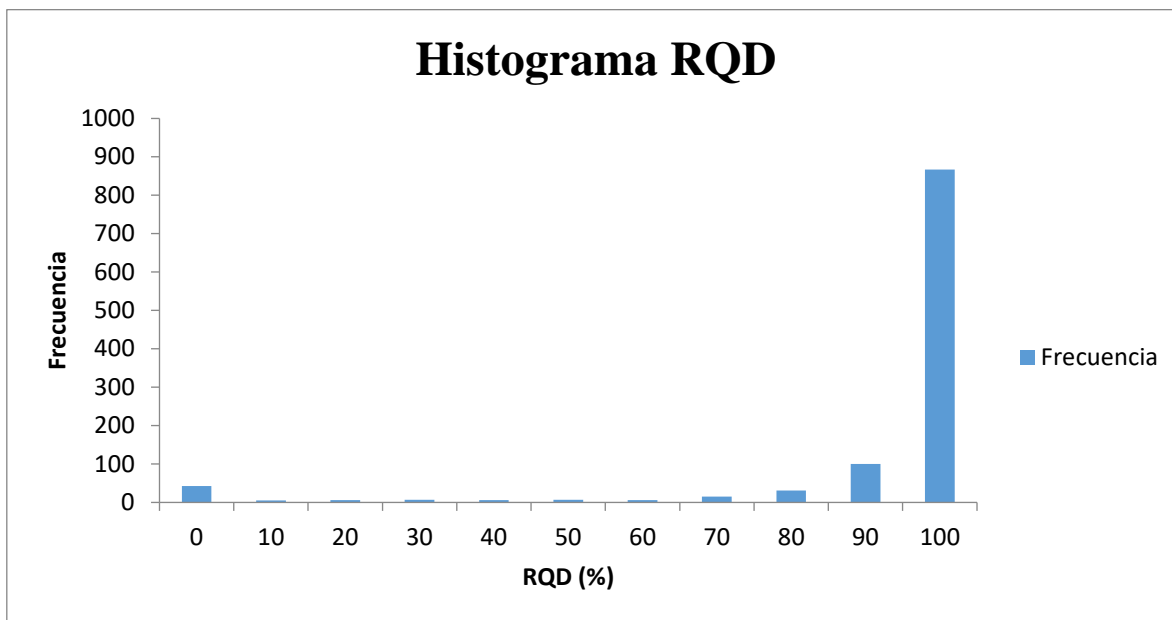


FIGURA 5.2: Histograma RQD de datos compositados. (Fuente: Elaboración propia)

El RQD posee más de un 80% de los datos con un valor igual o sobre 90%, lo que indica que se está en presencia de un yacimiento que posee unidades litológicas con una buena competencia.

De acuerdo con los datos obtenidos se establece la frecuencia de fracturas y el RQD para cada una de las unidades geotécnicas, diferenciadas por sector.

TABLA 5.1: Frecuencia de fracturas y RQD según unidades litológicas y geotécnicas. (UG)
(Fuente: Elaboración propia.)

Sector	UG	Promedio FF	Desv. E	Promedio RQD (%)	Desv. E	N° de datos
China Sur	AO	3,67	5,32	95,07	13,84	320
	GRAVA	25,27	17,07	7,35	21,30	22
Tailandia	AO	4,7	4,87	95,89	8,65	159
	BV	11,3	6,15	86,16	14,11	63
	GRAVA	21,96	11,64	30,12	33,60	25
	BT-TB	5,72	5,80	94,10	8,86	60
	DR	8,15	8,79	91,84	10,10	33
Japón	AND	5,52	5,78	87,31	24,87	190
	AO	2,39	2,94	98,07	5,19	154
	MZ-DR	0,93	0,73	100,00	0,00	14
	B	6,61	7,38	89,83	25,50	51
	GRAVA	19,43	11,13	25,71	24,60	10

5.1 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA.

Mediante el uso de dichas características además de información geológica correspondiente a resistencia a la compresión simple estimada in situ, según ANEXO A e información sobre condición de estructuras, se desarrolla el cálculo del índice de clasificación geomecánica RMR_{89} de Bieniawski acorde a la teoría vista en la sección 3.1.5. Cabe mencionar que un factor importante del cálculo del índice RMR_{89} es la condición de agua, pero para el estudio de esta memoria y acorde a las condiciones climáticas de la zona en donde es ubicado el Proyecto Continuidad Mina Gabriela, se impone que se está en presencia de un macizo rocoso completamente seco. A continuación, se detalla en la FIGURA 5.3 la distribución obtenida de RMR_{89} y en la TABLA 5.2 se muestra el índice obtenido en cada una de las unidades geotécnicas.

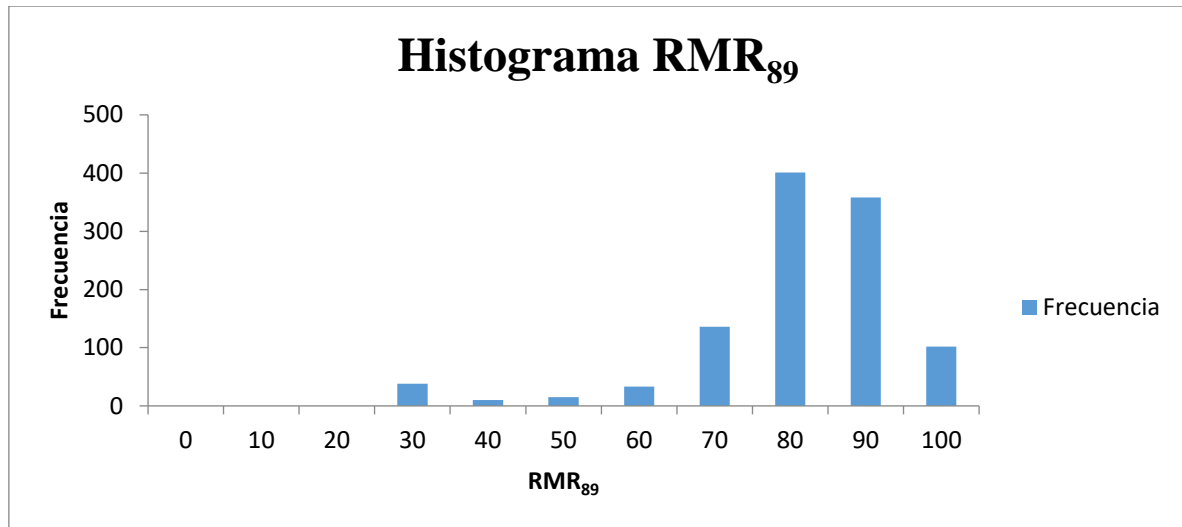


FIGURA 5.3: Histograma RMR₈₉ calculado. (Fuente: Elaboración propia.)

La distribución obtenida posee una concentración de datos con un índice RMR₈₉ igual o superior a 70, lo cual según Bieniawski califican como roca de calidad buena y muy buena. Aunque existe una importante cantidad de datos con un índice bajo, lo cual demuestra que existen unidades geotécnicas con baja calidad de roca.

De esta forma es posible establecer cierta heterogeneidad de la calidad del macizo rocoso en las diferentes unidades geotécnicas, en este caso existe una capa superficial de GRAVA, por ende, este tipo de material es el que posee una calidad baja provocando un sesgo de muestras con un puntaje inferior catalogándolos como rocas de mala calidad.

TABLA 5.2: Índice de calidad geomecánica RMR₈₉ para cada una de las UG. (Fuente: Elaboración propia.)

Sector	UG	Promedio RMR	Desv. E	N° de datos	Clase	Calidad
China Sur	AO	80	10	320	I	Buena
	GRAVA	27	13	22	V	Mala
Tailandia	AO	80	10	159	I	Muy Buena
	BV	68	9	63	II	Buena
	GRAVA	40	19	25	IV	Mala
	BT-TB	73	10	60	II	Buena
	DR	71	13	33	II	Buena
Japón	AND	75	11	190	II	Buena
	AO	81	7	154	I	Muy Buena
	MZ-DR	86	10	14	I	Muy Buena
	B	73	12	51	II	Buena
	GRAVA	35	15	10	I	Mala

Según la clasificación geomecánica a partir del índice RMR_{89} de Bieniawski, se puede visualizar que existe un yacimiento con unidades litológicas y geotécnicas de buena a muy buena calidad, y posee sectores superficiales formados por GRAVA los cuales tienen una mala calidad.

5.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO.

Analizando la información descrita en la sección 4.1.5 referente a los ensayos de laboratorios realizados para la obtención de las propiedades mecánicas del macizo rocoso, se detallan los resultados, para cada uno de los ensayos realizados.

5.2.1 Compresión Uniaxial Simple.

Se realiza 40 ensayos de compresión uniaxial y se produce una falla por estructura en 5 de ellos, en consecuencia, el resto de los ensayos fallan por sistema matriz de la roca y entregan los siguientes resultados para cada UG.

TABLA 5.3: *Resumen resultados ensayos de compresión simple. (Fuente: Elaboración propia)*

Sector	UG	Promedio UCS	Desv. E	Nº Datos
China Sur	AO	79,87	84,14	5
	AO	108,61	19,74	5
Tailandia	BV	60,66	27,60	3
	BT-TB	118,02	64,15	3
Japón	AND	163,27	43,63	5
	AO	142,27	23,53	4
	MZ-DR	91,72	26,87	5
	B	124,45	25,39	5

5.2.2 Compresión Triaxial.

Existen 68 ensayos de compresión triaxial, en ellos se somete al testigo de roca intacta a tres valores de esfuerzo confinante (σ_3), y se observan su comportamiento hasta que este falle,

obteniendo su resistencia a la compresión triaxial. Cabe mencionar que 15 muestras presentaron una rotura por estructura por ende no se consideran como datos válidos.

TABLA 5.4: Resumen ensayos de compresión triaxial. (Fuente: Elaboración propia.)

Sector	UG	Confinamiento σ_3 [MPa]	Promedio Triaxial σ_1 [MPa]	Desv. E	N° Datos
China Sur	AO	0,50	122,64	24,66	2
		1,50	124,88	32,43	2
		3,00	133,37	23,72	3
Tailandia	AO	0,50	141,37	79,94	2
		1,50	111,47	18,91	3
		3,00	119,62	64,55	3
	BV	0,50	59,66	6,58	2
		1,50	47,97	-	1
		3,00	107,62	-	1
	BT-TB	0,50	109,69	24,02	2
		1,50	132,62	-	1
		3,00	136,21	-	1
Japón	AND	1,00	222,45	55,30	3
		3,00	168,33	34,41	3
		5,00	249,63	32,98	3
	AO	1,00	143,10	20,02	3
		3,00	199,47	41,12	3
		5,00	189,24	25,62	3
	MZ-DR	1,00	114,72	9,89	2
		3,00	148,00	8,92	2
		5,00	191,66	8,82	2
B	1,00	113,49	-	1	
	3,00	156,42	46,79	3	
	5,00	155,52	13,03	3	

5.2.3 Tracción indirecta (TI).

El ensayo de tracción indirecta es un ensayo de compresión el cual estima la resistencia a la tracción de un testigo de roca intacta, se realizaron 39 ensayos de tracción indirecta y los resultados se detallan a continuación.

TABLA 5.5: Resumen ensayos de tracción indirecta. (Fuente: Elaboración propia.)

Sector	UG	Promedio TI [MPa]	Desv. E [MPa]	N° Datos
China Sur	AO	6,67	1,97	5
Tailandia	AO	4,52	1,20	5
	BV	5,30	0,93	4
	BT-TB	6,43	2,29	5
Japón	AND	9,65	1,10	5
	AO	7,19	2,17	5
	MZ-DR	6,76	1,43	5
	B	6,46	0,98	5

5.2.4 Modulo elástico.

Se realizan 38 ensayos de velocidad de onda, en los cuales es posible determinar el comportamiento de deformación de los testigos, obteniéndose parámetros dinámicos de Modulo de Young y razón de Poisson.

TABLA 5.6: Resumen ensayos de velocidad de onda. (Fuente: Elaboración propia.)

Sector	UG	Promedio Young[GPa]	Desv. E	Promedio Poisson	Desv. E	N° Datos
China Sur	AO	70,49	7,80	0,20	0,00	5
Tailandia	AO	75,51	14,85	0,21	0,02	5
	BV	58,78	20,19	0,22	0,04	3
	BT-TB	70,38	26,92	0,20	0,02	5
Japón	AND	64,89	7,63	0,25	0,04	5
	AO	70,57	6,93	0,25	0,03	5
	MZ-DR	65,96	10,84	0,21	0,04	5
	B	53,62	12,03	0,25	0,02	5

5.2.5 Peso unitario (PU).

El peso unitario de las diferentes UG, se determinó a partir de 2 tipos de ensayo, el ensayo de peso unitario sumergido en parafina (PUP), y el ensayo de peso unitario geométrico (PUG). Mediante los dos tipos de ensayo se tomó registro de 222 datos, y los resultados se visualizan a continuación.

TABLA 5.7: Resumen ensayos de PUP y PUG. (Fuente: Elaboración propia.)

Sector	UG	Promedio PU [Ton/m ³]	Desv. E	N° Datos
China Sur	AO	2,80	0,04	28
	AO	2,84	0,04	28
Tailandia	BV	2,71	0,04	28
	BT-TB	2,74	0,07	26
Japón	AND	2,69	0,04	28
	AO	2,77	0,04	28
	MZ-DR	2,68	0,02	28
	B	2,79	0,07	28

5.3 CARACTERÍSTICAS GEOMECÁNICAS.

A partir de las propiedades mecánicas obtenidas mediante ensayos de laboratorio, es posible obtener las características y el comportamiento geomecánico del macizo rocoso. Al someterse los testigos de roca intacta a ensayos en los cuales se provoca la falla de la muestra, se obtiene los parámetros geomecánicos de cohesión (c) y ángulo de fricción (ϕ), a través de la envolvente de falla de Mohr-Coulomb. Estos parámetros son necesarios para poder calcular la resistencia del macizo rocoso.

A continuación, se detallan los resultados de los valores de c y ϕ , para cada una de las UG, propuestas, utilizando el software de la Rocscience RocLab, el cual necesita como variables de entrada: GSI², peso unitario, resistencia a la compresión uniaxial y resistencia a la compresión triaxial mediante diferentes valores de esfuerzo confinante ejercido, además de las dimensiones del macizo a estudiar, en este caso, altura del talud.

TABLA 5.8: Parámetros geomecánicos de las diferentes UG. (Fuente: Elaboración propia software RocLab)

Sector	UG	c[Mpa]	Φ°
China Sur	AO	2,65	63
	AO	3,27	61
Tailandia	BV	1,40	56
	BT-TB	2,20	55
Japón	AND	3,67	62
	AO	4,28	62
	MZ-DR	4,44	62
	B	2,57	59

² GSI calculado a partir de ecuación (4), sección 3.1.4.

No se posee información ensayada de la UG GRAVA por ende se toma en consideración la información provista por Ingeroc, en su estudio anterior al proyecto China, para determinar las características geomecánicas de la UG GRAVA.

TABLA 5.9: Parámetros geomecánicos según criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Fuente: (Ingeniería de rocas LTDA., 2008)

Sector	UG	c[Mpa]	Φ°
China Sur	GRAVA	0,12	40
Tailandia			
Japón			

5.4 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES.

La caracterización estructural fue realizada por medio del estudio de los sondajes a través del método Televier el cual consta en registrar la orientación de las estructuras con televisores ópticos y acústicos de alta resolución esto respaldado con información de los mapeos estructurales.

Según Vivanco y González (2015):

“normalmente el tratamiento de la información con Televier considera sólo las estructuras mayores, de acuerdo con la clasificación que entrega este registro en cuatro rangos (Ranks), donde Rank 1 corresponde al registro de la fábrica interna de las rocas, Rank 2 generalmente corresponde a la clasificación del diaclasamiento, mientras que los Ranks 3 y 4 comprenden fallas y fallas mayores respectivamente” (p.438)

Se analizan 19 sondajes desplegados en los diferentes sectores que abarcan el yacimiento de forma representativa, y se da énfasis en las estructuras principales con Rank 3 y 4, las que poseen la siguiente descripción.

TABLA 5.10: *Detalle de estructuras principales Rank 3 Y 4 según sector. (Fuente: Tecnología y Geociencias)*

Sector	Profundidad	Manteo (Dip°)	Dirección de Manteo (Dip Dir °)	Apertura [mm]	Rank
China Sur	40,12	57,14	066,94	79,93	4
	40,42	59,89	045,02	N/A	3
Japón	4,75	57,13	115,49	N/A	3
	7,99	63,26	031,24	90,20	4
	10,12	68,15	046,26	72,24	4
	1,03	15,81	204,35	140,20	4
	3,49	29,15	143,03	N/A	3
	1,21	80,49	018,77	534,73	4
	2,73	59,20	099,48	199,13	4
	13,16	42,33	204,48	N/A	3
Tailandia	18,59	38,45	235,10	171,19	4
	14,87	73,23	240,19	N/A	3
	84,18	79,92	274,17	76,56	4
	6,70	81,16	049,55	89,98	4

Las familias estructurales provenientes de los Rank 1 y 2, se determinan según la concentración³ de polos obtenidos en un análisis estereográfico realizado a cada sector ANEXO B. El cual se detalla a continuación.

TABLA 5.11: *Detalle de set estructurales obtenidos según análisis estereográfico. (Fuente: Elaboración propia.)*

Sector	Set	Dip °	DipDir°
China Sur	1wc	53	057
	2wc	44	027
	3wc	34	049
	4wc	44	359
	5wc	89	247
Tailandia	1wt	82	032
Japón	1wj	35	243
	2wj	85	022
	3wj	82	073
	4wj	69	099

Las propiedades geomecánicas de las estructuras fueron definidas en la sección 4.1.6. Cabe destacar que, según sus características de dimensiones y espesor, para el análisis de estabilidad

³ Se impuso como criterio que una familia estructural está compuesta por una concentración polar mayor o igual a 5 %.

CAPÍTULO 5 : CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.

de taludes por fallas con control estructural a nivel global se utiliza las discontinuidades con Rank 3 y 4, y para análisis de taludes a nivel banco-berma se utilizaron todos los sets estructurales.

CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

6.1 DETERMINACIÓN DE PERFILES.

La elección de las áreas a estudiar se realiza a partir de variables geométricas principalmente, estas áreas se localizan a partir de las dimensiones de talud y los ángulos críticos.

Por ende, en los sectores donde la altura del talud es más elevada o el ángulo global de talud es más inclinado se consideran sectores propensos a generar inestabilidad según su diseño.

Además, otro factor a considerar en el diseño de un rajo, son las áreas en las cuales las paredes forman tramos cóncavos o convexos, principalmente donde ocurre la curvatura en las paredes del rajo. Y por último de acuerdo con condiciones de mayor inestabilidad cinemática.

Sujeto a este tipo de factores se proponen las siguientes secciones para estudiar la estabilidad de los taludes que conforman el rajo.

6.1.1 Perfiles China Sur.

Los perfiles seleccionados para los taludes de China Sur 1 y China Sur 2 se visualizan a continuación:

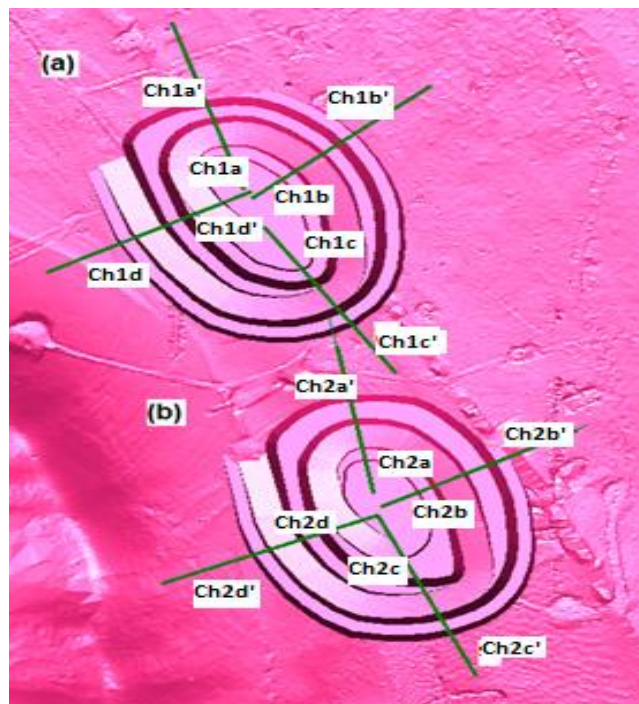


FIGURA 6.1: (a) Secciones propuestas para rajo China Sur 1. (b) Secciones propuestas para rajo China Sur 2.

CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

TABLA 6.1: Características geométricas y de orientación de perfiles propuestos para análisis sector China Sur.

Rajo	Sección Talud	Global			Banco Berma		
		Dip[°]	DipDir[°]	Altura [m]	Dip[°]	DipDir[°]	Altura máxima [m]
China Sur 1	Ch1a	40	162	43,8	70	162	18,5
	Ch1b	38	230	48,9	70	230	20,0
	Ch1c	44	325	58,5	70	325	20,5
	Ch1d	40	063	46,7	70	063	20,0
China Sur 2	Ch2a	36	169	41,7	70	169	16,7
	Ch2b	38	243	45,0	70	243	20,0
	Ch2c	39	335	59,8	70	335	22,3
	Ch2d	41	068	50,3	70	068	20,0

6.1.2 Perfiles Tailandia.

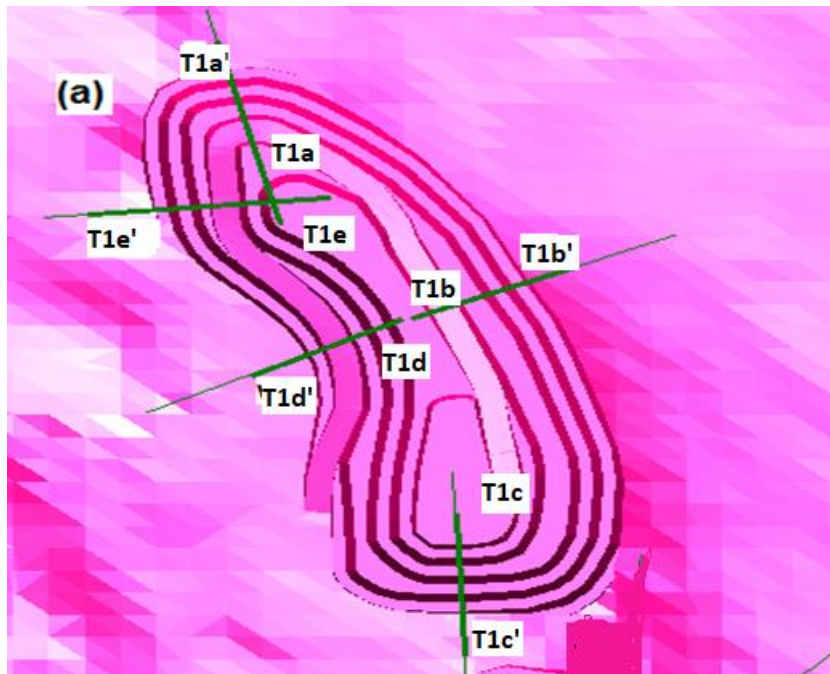


FIGURA 6.2: Secciones propuestas rajo Tailandia 1.

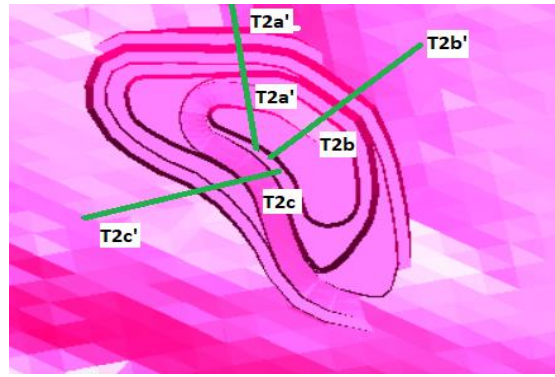


FIGURA 6.3: Secciones propuestas Rajo Tailandia 2.

TABLA 6.2: Características geométricas y de orientación de perfiles propuestos para análisis sector Tailandia.

Rajo	Sección Talud	Global			Banco Berma		
		Dip[°]	DipDir[°]	Altura [m]	Dip[°]	DipDir[°]	Altura máxima [m]
Tailandia 1	T1a	35	165	81,9	70	165	20,0
	T1b	42	248	69,8	70	248	20,0
	T1c	51	357	75,4	70	357	20,0
	T1d	46	085	83,3	70	085	20,0
	T1e	45	065	69,1	70	065	20,0
Tailandia 2	T2a	44	187	67,7	70	187	20,0
	T2b	54	226	45,3	70	226	20,0
	T2c	33	058	40,6	70	058	10,6

6.1.3 Perfiles Japón.

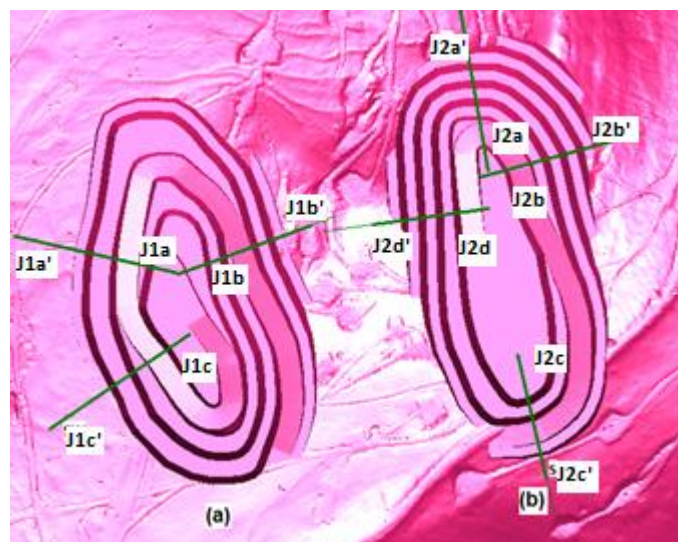


FIGURA 6.4: a) Secciones propuestas para rajo Japón 1. (b) Secciones propuestas para rajo Japón 2.

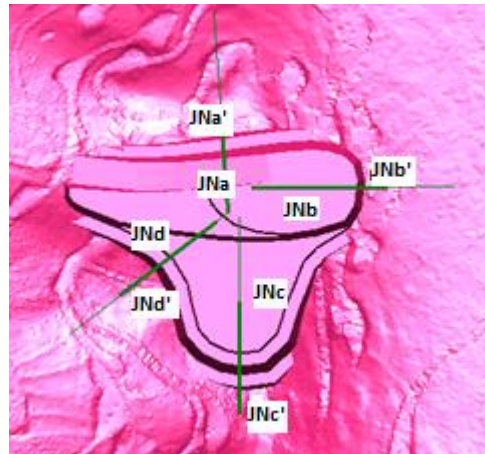


FIGURA 6.5: Secciones propuestas rajo Japón Norte.

TABLA 6.3: Características geométricas y de orientación de perfiles propuestos para análisis sector Japón-India.

Rajo	Sección Talud	Global			Banco Berma		
		Dip[°]	DipDir[°]	Altura [m]	Dip[°]	DipDir[°]	Altura máxima [m]
Japón 1	J1a	40	103	61,5	70	103	20,0
	J1b	43	250	79,5	70	250	22,0
	J1c	42	056	58,6	70	056	20,0
Japón 2	J2a	45	170	90,2	70	170	20,0
	J2b	44	255	82,3	70	255	20,0
	J2c	42	347	47,8	70	347	20,0
	J2d	55	082	77,3	70	082	20,0
Japón Norte	JNa	65	176	26,2	70	176	16,8
	JNb	70	270	15,9	70	270	15,9
	JNc	43	360	30,9	70	360	20,0
	JNd	29	052	36,3	70	052	16,3

6.2 ANÁLISIS CINEMÁTICO PARA FALLAS CON CONTROL ESTRUCTURAL.

Es necesario realizar un análisis cinemático para poder visualizar las áreas susceptibles a generar algún tipo de falla, ya sea plana, cuña o *toppling*. Dicho análisis se ejecuta considerando los sets estructurales descritos en la sección 5.4, con los parámetros de orientación de los taludes de cada perfil además del ángulo de fricción que se les asignan a los sets estructurales. De este modo se realiza una comparación de ángulos entre talud, estructuras

CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

y ángulo de fricción decretando las condiciones para que se genere el deslizamiento de un bloque.

A continuación, se mostrará los resultados de los análisis cinemáticos realizados a cada una de las secciones, donde se generan las condiciones para provocar una falla de algún tipo, a nivel de talud global y nivel banco berma.

TABLA 6.4: Resultados análisis cinemático talud nivel banco berma, Rank 1,2,3 y 4.

Rajo	Sección Talud	Dip[°]	Dip Dir[°]	Falla Plana	Falla Cuña	Falla Toppling
China Sur 1	Ch1c	70	325		✓	
	Ch1d	70	063	✓	✓	
	Ch1b	70	230			✓
China Sur 2	Ch1c	70	335	✓	✓	
	Ch2b	70	243		✓	✓
	Ch2d	70	068	✓	✓	✓
Tailandia 2	T2a	70	187			✓
	T2b	70	226			✓
Japón 1	J1a	70	103	✓	✓	✓
	J1b	70	250	✓		✓
Japón 2	J2a	70	170		✓	
	J2b	70	255	✓		✓
	J2d	70	082	✓	✓	
Japón Norte	JNa	70	176		✓	✓
	JNb	70	270	✓		✓
	JNc	70	360			✓

CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

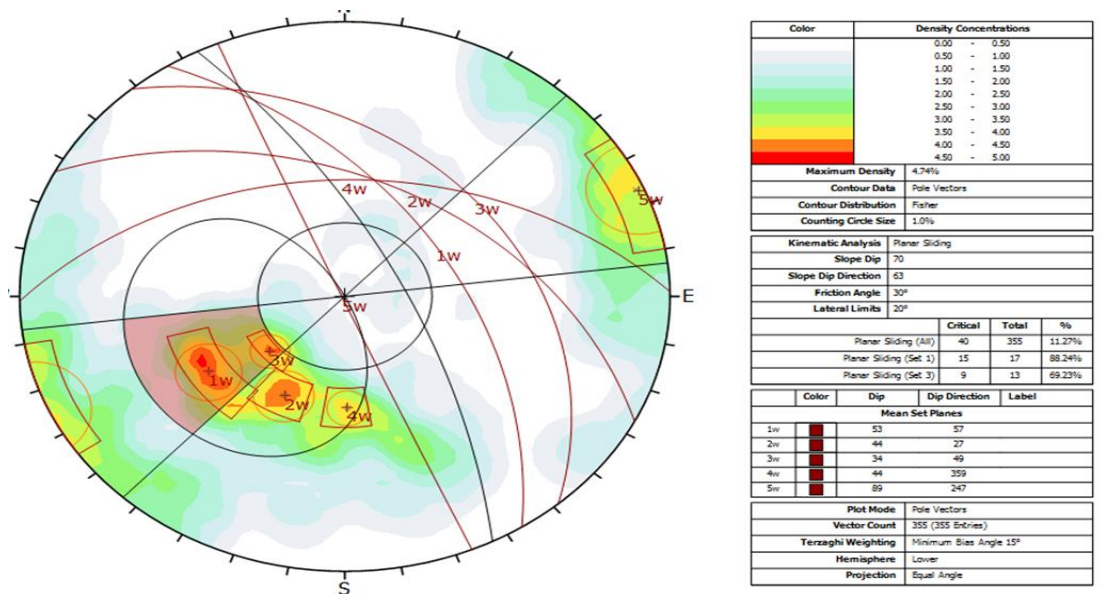


FIGURA 6.6: Representación de análisis cinemático para falla tipo plana, en talud nivel banco berma referente a sector China Sur 1, Dip 70°, Dip Dir 63°. Fuente: (Elaboración Propia, Software Dips)

TABLA 6.5: Resultados análisis cinemático talud nivel global, Rank 3 y 4.

Rajo	Sección	Dip[°]	Dip Dir[°]	Falla Plana	Falla Cuña	Falla Toppling
Tailandia 1	T1b	42	248	✓		✓
	T1d	46	085			✓
	T1e	45	065			✓
Tailandia 2	T2b	54	226	✓		✓
Japón 2	J2a	45	170		✓	
	J2d	55	082		✓	
Japón Norte	JNa	65	176		✓	
	JNb	70	270			✓

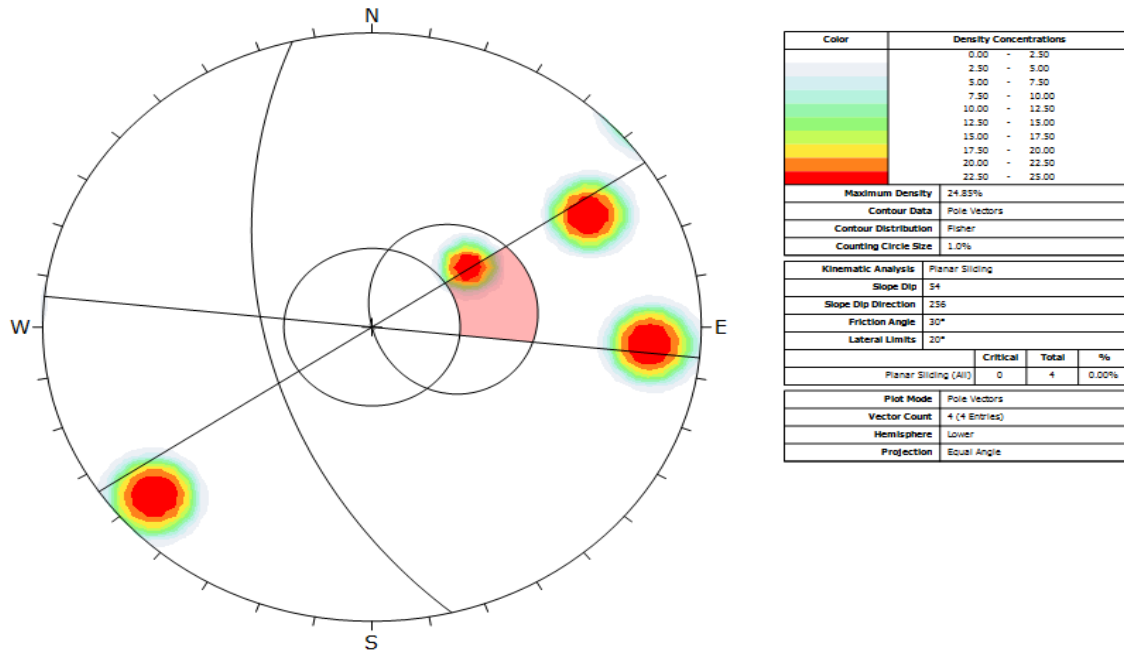


FIGURA 6.7: Representación de análisis cinemático para falla tipo plana, en talud a nivel ángulo global referente a sector China Sur 1, Dip Dir 256°, Dip 54°. Fuente: (Elaboración Propia, Software Dips)

6.3 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD PROPUESTO.

Los valores admitidos de Factor de Seguridad y probabilidad de falla dependen de la evaluación de las posibles consecuencias que podría generar un evento de falla, y de cómo se verían afectados las personas, las instalaciones y los equipos. Por lo tanto, dependiendo de la evaluación de peligrosidad en cuanto a una inestabilidad se determinan diseños más o menos conservadores.

A partir de esto, se resumen los criterios de aceptabilidad establecidos para los rajos del Proyecto Continuidad Mina Gabriela, bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas.

FIGURA 6.8: Criterios de aceptabilidad para rajos de Proyecto Continuidad Mina Gabriela. (Fuente: EIA, Tecnología y Geociencias)

Condición.	Factor de Seguridad.	Probabilidad de Falla.
Estática	F.S. $\geq 1,40$	PF $\leq 15\%$
Sismo operacional	F.S. $\geq 1,25$	PF $\leq 25\%$
Sismo máximo probable	F.S. $\geq 1,10$	PF $\leq 30\%$

6.4 ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE BAJO MODELAMIENTO DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO, PARA FALLAS CON CONTROL ESTRUCTURAL.

Ya establecidos los sectores en los cuales es posible que se generen fallas con control estructural, se desarrolla un análisis de equilibrio límite tanto determinístico, como probabilístico para evaluar fallas de tipo plana y cuña, acogiéndose a los diseños propuestos en la sección 4.1.7, y a las características geomecánicas obtenidas en la sección 5.3 para determinar la estabilidad de los bloques verificados en el análisis cinemático, rigiéndose bajo el criterio de aceptabilidad propuesto. En el caso del análisis por modelamiento probabilístico, se asigna como parámetros estadísticos de las características intrínsecas del macizo rocoso y de las propiedades geomecánicas, para lo cual se utiliza la siguiente metodología:

- La desviación estándar, se considera como un 10% del valor promedio, con unos límites inferiores y superiores referentes al 30% del valor promedio.

6.4.1 Equilibrio límite, perfiles China Sur.

Ya detectados los posibles bloques a deslizar por análisis cinemático, se realiza un análisis de equilibrio límite para evaluar el F.S. y la PF. En la TABLA 6.6 se resumen los resultados de la evaluación realizada para el caso de falla plana y falla cuña, en condiciones estáticas y pseudoestáticas, para el nivel banco-berma. Además, se consideran solo las fallas en las cuales el F.S. y/o PF es más bajo, dado que una misma sección analizada puede contener más de una falla de cada tipo.

TABLA 6.6: Resumen análisis equilibrio límite, para falla tipo plana y cuña en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a nivel banco-berma Sector China Sur. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane)

Rajo	Perfil	Orientación		Falla Plana F.S.			Falla Plana PF			Falla Cuña F.S.			Falla Cuña PF			Ca
		Dip[°]	DipDir[°]	Est.	Op.	Máx.	Est.	Op.	Máx.	Est.	Op.	Máx.	Est.	Op.	Máx.	
China	Ch1c	70	325	-	-	-	-	-	-	1,72	1,59	1,29	0%	0%	0,7%	✓
Sur 1	Ch1d	70	063	1,88	1,72	1,38	0%	0%	0%	1,81	1,66	1,31	0%	0%	0,3%	✓
China	Ch2c	70	335	1,59	1,48	1,32	0%	0%	0,4%	1,79	1,66	1,34	0%	0%	0%	✓
Sur 2	Ch2d	70	068	1,88	1,72	1,36	0%	0%	0%	1,78	1,63	1,29	0%	0%	0%	✓

Nota: Abreviaciones **Est:** Estático, **Op:** Sismo Operacional, **Max:** Sismo Máximo, **Ca:** Criterio de aceptabilidad.

CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

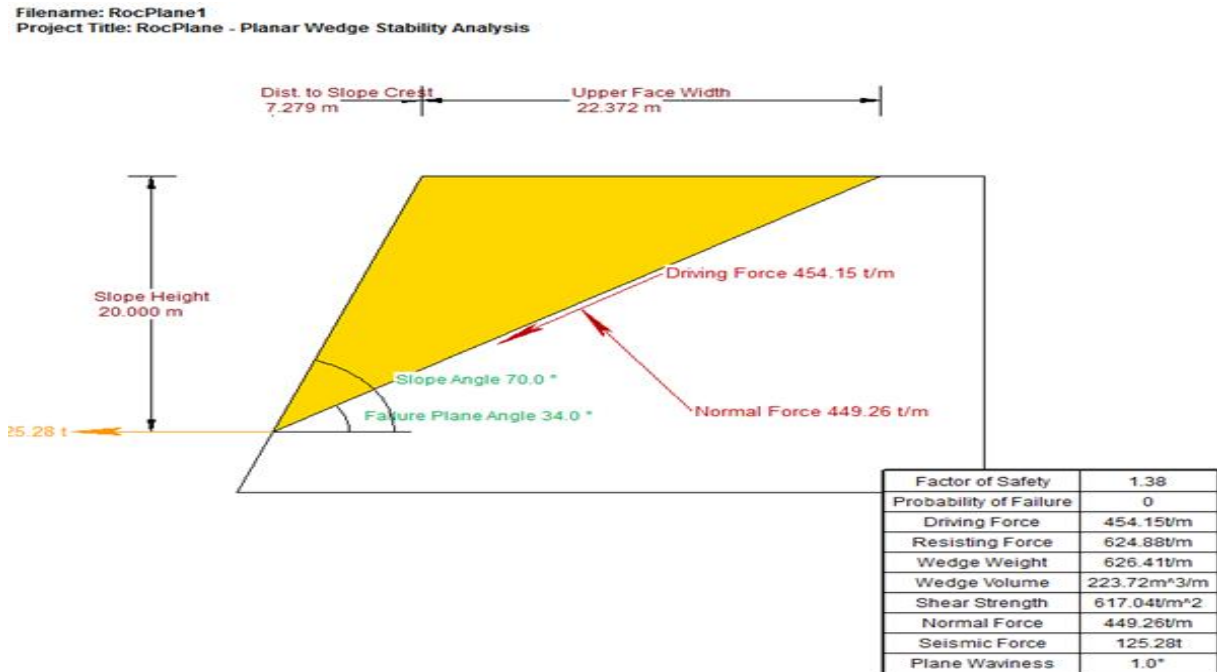


FIGURA 6.9: Esquema de equilibrio límite de la pared con dirección Dip/DipDir 63°/070° con estructura 34°/049° la cual genera bloque de deslizamiento, análisis en condición de sismo máximo, rajo China Sur 1. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane)

Dado que, según el análisis cinemático, no se visualizan sectores con fallas con control estructural a nivel de talud global, no es necesario realizar un análisis de equilibrio límite de falla tipo plana o cuña debido a que no se genera el bloque deslizante.

6.4.2 Equilibrio límite, perfiles Tailandia.

En el caso de Tailandia, las familias estructurales no intersecan con los taludes evaluados a nivel banco berma por ende no se distinguen sectores proclives a fallas por control estructural tipo plano o cuña según análisis cinemático, no obstante, las estructuras mayores si producen bloques de deslizamiento en los taludes a nivel global en los rajos Tailandia 1 y 2, por ende a continuación en la TABLA 6.7 se resumen los resultados obtenidos en el análisis en estado estático y pseudoestático.

TABLA 6.7: Resumen análisis equilibrio límite, para falla tipo plana en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a nivel talud global. Sector Tailandia. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane)

Rajo	Sección	Orientación		Falla Plana F.S.			Falla Plana PF			Ca
		Dip[°]	DipDir[°]	Est	Op	Max	Est	Op	Max	
Tailandia 1	T1b	42	248	2,85	2,66	2,19	0%	0%	0%	✓
Tailandia 2	T2b	54	225	1,51	1,39	1,11	0%	0%	3,3%	✓

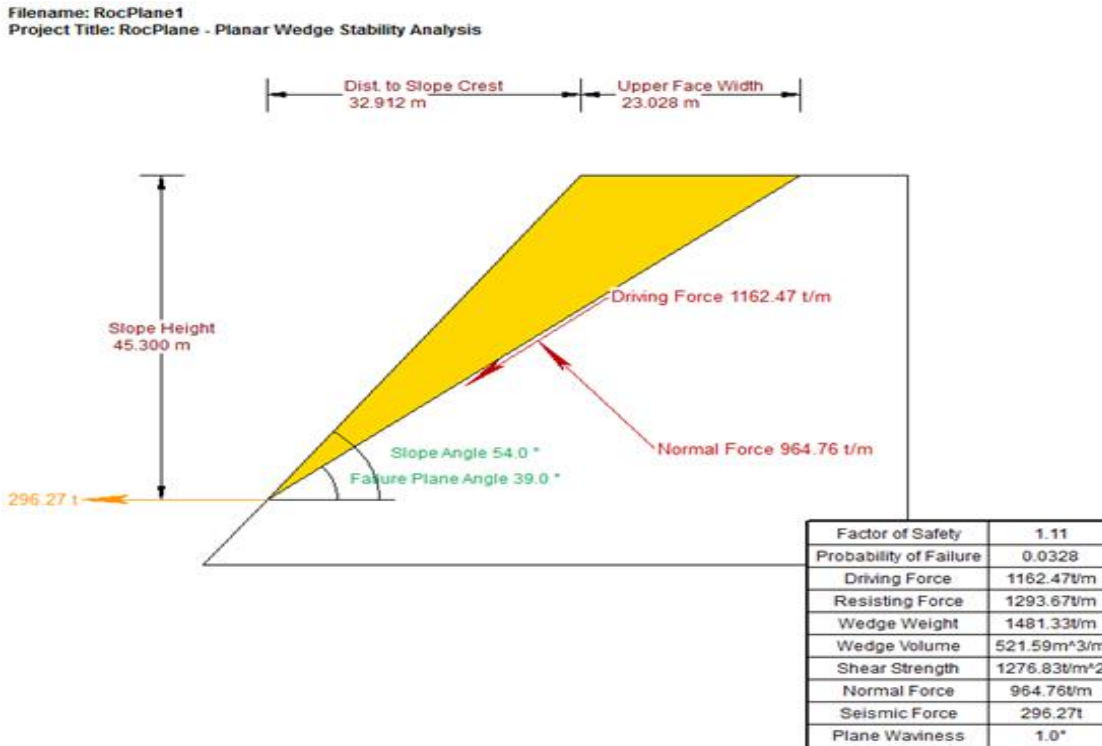


FIGURA 6.10: Esquema de equilibrio límite de la pared con dirección Dip/DipDir 54°/226° con estructura 39°/236° la cual genera bloque de deslizamiento, análisis en condición de sismo máximo, rajo Tailandia 2. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane)

6.4.3 Equilibrio límite, perfiles Japón.

Para el sector Japón las estructuras principales y las familias estructuras menores interceptan con las paredes de los taludes en ambos niveles de análisis que propone esta memoria. Existen fallas tipo plana únicamente a nivel banco-berma en los 3 rajos referentes a este sector, y falla tipo cuña se puede encontrar tanto a nivel banco-berma como a nivel global. A continuación, en la TABLA 6.8 se resumen los resultados referentes a los análisis pseudoestático y estático a nivel talud banco-berma y en la TABLA 6.9 los resultados del análisis a nivel talud global.

CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

TABLA 6.8: Resumen análisis equilibrio límite, para falla tipo plana y cuña en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a nivel talud banco-berma. Sector Japón. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane)

Rajo	Perfil	Orientación		Falla Plana F.S.			Falla Plana PF			Falla Cuña F.S.			Falla Cuña PF			Ca
		Dip[°]	DipDir[°]	Est.	Op.	Máx.	Est.	Op.	Máx.	Est.	Op.	Máx.	Est.	Op.	Máx.	
Japón 1	J1a	70	103	>20,0	>20,0	>20,0	0%	0%	0%	18,66	17,63	15,12	0%	0%	0%	✓
	J1b	70	250	1,80	1,65	1,32	0%	0%	0%	-	-	-	-	-	-	✓
Japón 2	J2a	70	170	-	-	-	-	-	-	18,84	17,8	15,27	0%	0%	0%	✓
	J2b	70	255	1,89	1,74	1,38	0%	0%	0%	-	-	-	-	-	-	✓
	J2d	70	082	>20,0	>20,0	19,2	0%	0%	0%	>20,0	>20,0	>20,0	0%	0%	0%	✓
Japón Norte	JNa	70	176	-	-	-	-	-	-	>20,0	>20,0	17,38	0%	0%	0%	✓
	JNb	70	270	2,17	2,00	1,61	0%	0%	0%	-	-	-	-	-	-	✓

Filename: RocPlane1
Project Title: RocPlane - Planar Wedge Stability Analysis

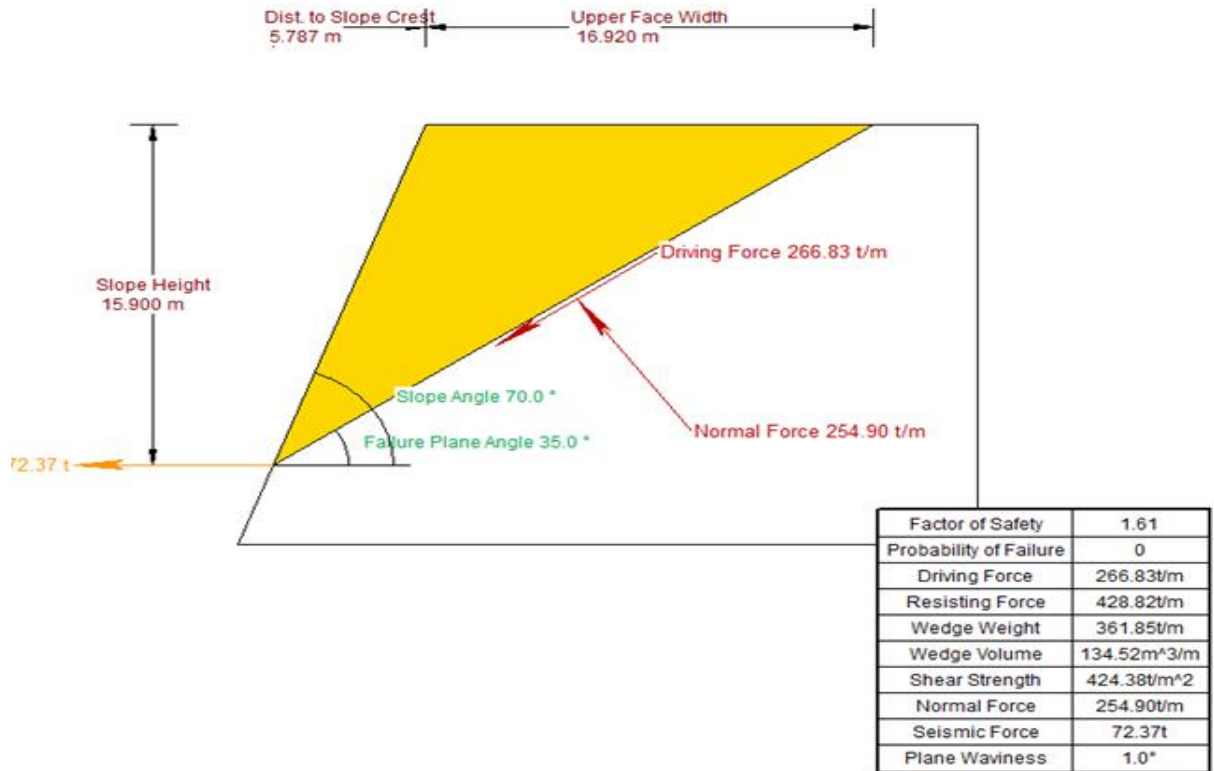


FIGURA 6.11: Esquema de equilibrio límite de la pared con dirección Dip/DipDir 70°/270° con estructura 35°/243° la cual genera bloque de deslizamiento, análisis en condición de sismo máximo, rajo Japón Norte. (Fuente: Elaboración propia, Software: Rocplane)

TABLA 6.9: Resumen análisis equilibrio límite, para falla tipo cuña en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a nivel talud global. Sector Japón. (Fuente: Elaboración propia, Software: Swedge v4)

Rajo	Perfil	Orientación		Falla Cuña F.S.			Falla Cuña PF			Ca
		Dip[°]	DipDir[°]	Est.	Op.	Máx.	Est.	Op.	Máx.	
Japón 2	J2a	45	170	1,61	1,48	1,16	0%	0%	4%	✓
	J2d	55	082	8,89	7,82	5,73	0%	0%	0,2%	✓
Japón Norte	JNa	65	176	1,64	1,51	1,20	0%	0%	0,7%	✓

6.5 ANÁLISIS TENSION-DEFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE EQUILIBRIO LÍMITE BAJO MODELAMIENTO DETERMINÍSTICO Y PROBABILISTICO DE FALLAS SIN CONTROL ESTRUCTURAL.

Ya realizado un análisis de estabilidad a los sectores susceptibles a fallar por control estructural, se considera establecer un análisis de fallas sin control estructural. Dicho análisis consiste en definir una superficie de corte mediante la resolución de un modelo numérico de elementos finitos y un análisis tensión-deformación, por medio de esta metodología se encuentran las áreas del talud con menor resistencia al esfuerzo cortante, detectando los sectores críticos de inestabilidad según la deformabilidad y el desplazamiento del material.

En razón a las áreas de inestabilidad encontradas se realiza un esbozo de falla preferente de tipo estructural, y esta se compara con un análisis de equilibrio límite mediante el método de las dovelas preciso Morgenstern-Price (GLE) ajustando el área de análisis a la superficie propuesta.

Para determinar el nivel de falla más crítico se evalúa en condiciones pseudoestáticas de sismo máximo, bajo las características obtenidas en el CAPÍTULO 5, de este modo se establece la superficie de falla sin control estructural ⁴la cual será evaluada a nivel talud global, en el cual se dará como suposición que a escala general el macizo se comportara de forma plástica, y a nivel talud banco-berma se enfoca en la unidad geológica GRAVA, debido a que esta es la que posee la consolidación más pobre en razón a sus características geomecánicas.

⁴ La falla determinada puede ser del tipo rotacional o de forma irregular, basándose en la resistencia al esfuerzo cortante del material sometido a diferentes condiciones de esfuerzo.

6.5.1 Análisis talud banco-berma.

Debido a que la condición principal para que ocurran falla sin control estructural es que sea un material poco consolidado, o una evaluación de diseños a gran escala, para el análisis del nivel banco berma se realiza a nivel superficial en los sectores en los cuales se encuentra la unidad geológica GRAVA, dado que esta posee una baja consolidación y una baja caracterización según el índice RMR₈₉ obtenido.

A continuación, se resumen los resultados de los análisis obtenidos de los sectores en los cuales se encuentra la unidad geológica GRAVA, en este caso son los referidos a los rajos China 1 y 2, Tailandia 1 y Japón 1.

TABLA 6.10: Resumen de resultados de la comparación de análisis tensión-deformación con análisis de equilibrio límite, a nivel banco-berma referente a taludes con UG GRAVA, sector China Sur 1 y 2, Tailandia 1 y Japón 1.

Rajo	Sección	Banco-Berma			Análisis deformación			Equilibrio Límite (GLE)				Ca
		Dip[°]	DipDir[°]	Altura Grava [m]	Est	Op	Max	Est	Op	Max	Todos los casos	
					F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	PF	
China Sur 1	Ch1a	70	162	13,30	3,74	3,59	2,94	3,51	3,42	2,81	0%	✓
	Ch1b	70	230	10,90	5,60	5,31	4,07	5,75	5,71	4,89	0%	✓
	Ch1c	70	325	5,70	6,85	6,33	5,01	5,72	5,49	4,89	0%	✓
	Ch1d	70	063	2,67	11,17	10,40	8,52	12,82	12,01	9,88	0%	✓
China Sur 2	Ch2a	70	169	0,90	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	✓
	Ch2b	70	243	5,31	11,89	11,06	8,85	12,32	12,00	11,48	0%	✓
	Ch2c	70	335	7,37	5,07	4,73	3,94	5,43	5,07	4,16	0%	✓
	Ch2d	70	068	0,00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	✓
Tailandia 1	T1a	70	165	54,49	1,93	1,80	1,46	1,94	1,85	1,45	0%	✓
	T1b	70	248	3,54	10,48	9,78	8,02	13,43	8,82	8,32	0%	✓
	T1c	70	357	0,00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	✓
	T1d	70	085	17,42	3,96	3,83	2,66	3,94	3,68	3,00	0%	✓
	T1e	70	065	40,55	1,90	1,72	1,36	1,92	1,79	1,47	0%	✓
Japón 1	J1a	70	103	6,23	10,30	9,50	7,10	11,30	10,68	9,64	0%	✓
	J1b	70	250	0,00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	✓
	J1c	70	056	18,5	2,58	2,42	1,87	2,52	2,40	1,95	0%	✓

CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

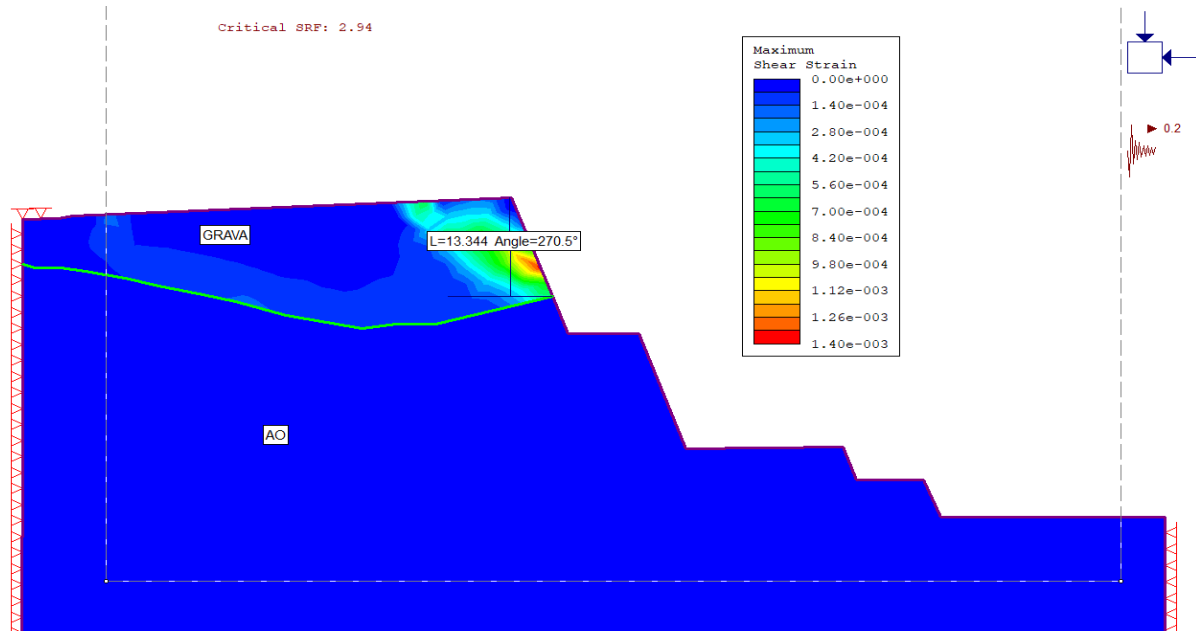


FIGURA 6.12: Ejemplo de análisis tensión -formación a sección **Ch1a** para establecer superficie de corte en sector que posee unidad geológica GRAVA. En dicho ejemplo se somete a un análisis pseudoestático con sismo máximo, y se determina que la falla crítica ocurre con un F.S. de 2,94. (Fuente: Elaboración propia, Software: Phase 2.0 v8)

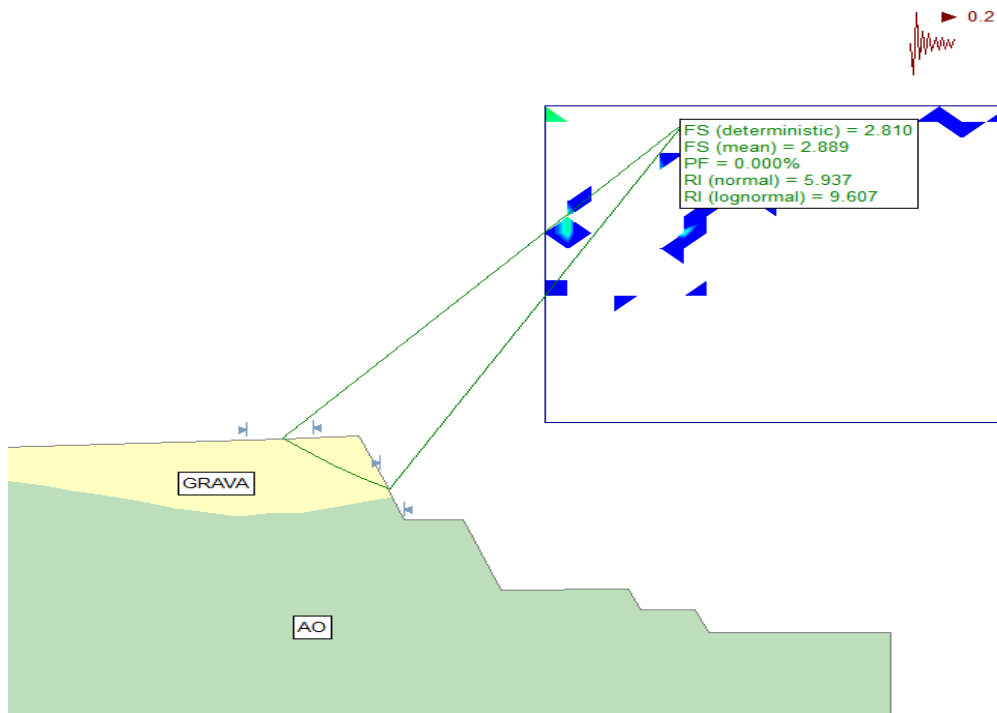


FIGURA 6.13: Ejemplo de análisis de equilibrio limite método GLE, para sección **Ch1a**, ajustando el análisis a la superficie de corte obtenida en análisis tensión deformación. En dicho ejemplo se somete a un análisis pseudoestático con sismo máximo, y se determina que la falla crítica ocurre con un F.S. de 2,81. (Fuente: Elaboración propia, Software: Slide v6)

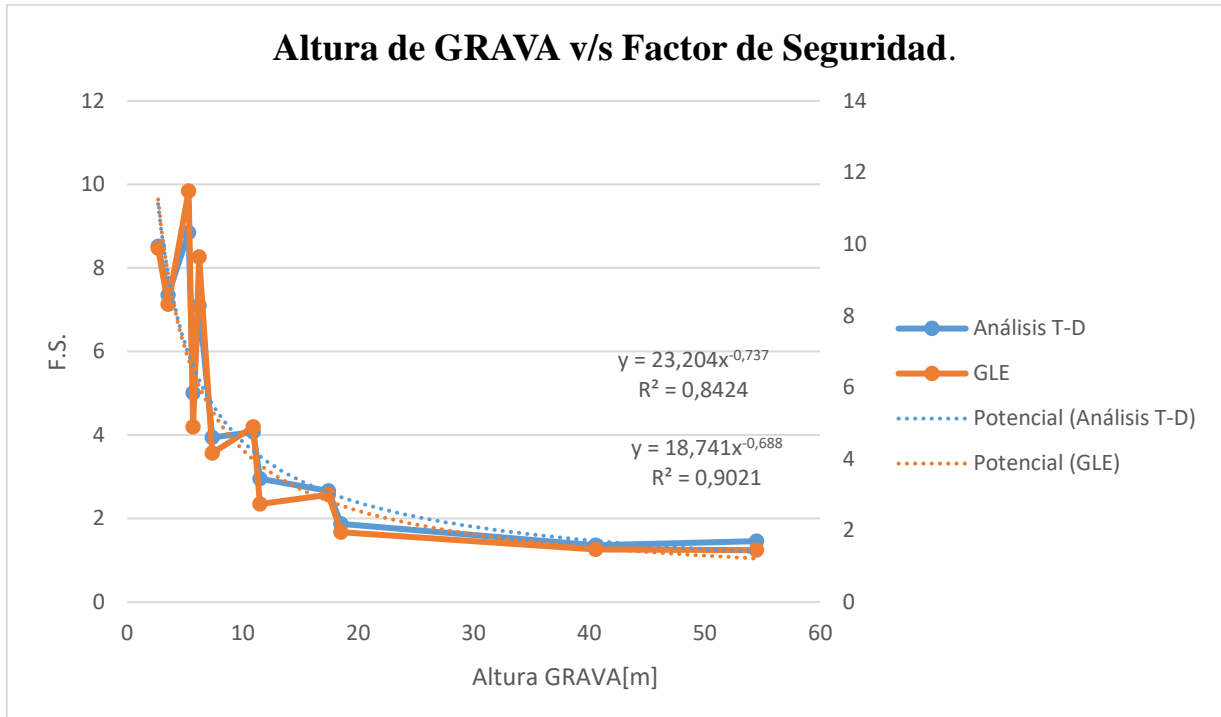


FIGURA 6.14: Correlación entre altura de GRAVA presente en análisis banco-berma, con Factor de Seguridad obtenido bajo análisis de equilibrio límite GLE, y análisis tensión-deformación, en condiciones de sismo máximo.

Según el gráfico obtenido se aprecia que a medida que va incrementando la altura de talud construido en la UG GRAVA el factor de seguridad va disminuyendo, si bien para los casos de análisis tensión-deformación como el GLE entregan resultados muy similares, se realiza un ajuste que describa el comportamiento de estas variables y se determina como expresión con un R^2 de 90,2% la siguiente función.

$$F.S = 18,741 \times h^{-0,688}$$

h : Altura de Grava (16)

Por medio de dicha ecuación se estima que la altura máxima de GRAVA para construir un talud en estos sectores es de 60,8 m.

6.5.2 Análisis talud nivel global.

Basándose en las diferencias en las propiedades geomecánicas de las unidades geológicas y de las características de diseño, se evalúa la estabilidad a nivel talud global, restringiendo el área de análisis como punto final de ruptura el pie del ultimo banco de cada rajo, además se establece que en razón al criterio de análisis se sostiene que las unidades geológicas con roca competente se comportan de manera plástica.

TABLA 6.11: Resumen de resultados de la comparación de análisis tensión-deformación con análisis de equilibrio límite, a nivel talud global para todos los rajes propuestos en los sectores China Sur, Tailandia y Japón.

Rajo	Sección	Global			Análisis deformación			Equilibrio Límite (GLE)				Ca
		Dip[°]	DipDir[°]	Altura [m]	Est	Op	Max	Est	Op	Max	Todos los casos	
					F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	PF	
China Sur 1	Ch1a	40	162	43,8	19,16	17,59	13,71	19,27	17,32	12,54	0%	✓
	Ch1b	38	230	48,9	16,30	14,77	11,17	16,68	15,21	11,98	0%	✓
	Ch1c	44	325	58,5	14,28	13,01	9,99	14,87	13,64	10,83	0%	✓
	Ch1d	40	063	46,7	15,09	14,48	11,32	16,09	15,61	12,65	0%	✓
China Sur 2	Ch2a	36	169	41,7	20,83	18,8	14,24	21,24	19,29	15,08	0%	✓
	Ch2b	38	243	45,0	17,75	15,98	12,06	18,52	16,80	13,88	0%	✓
	Ch2c	39	335	59,8	14,02	12,76	9,82	14,32	13,10	10,33	0%	✓
	Ch2d	41	068	50,3	15,15	13,76	10,34	15,94	14,65	11,71	0%	✓
Tailandia 1	T1a	35	165	81,9	13,00	11,87	9,25	9,15	8,57	7,20	0%	✓
	T1b	42	248	69,8	8,43	7,72	6,12	9,14	8,41	6,71	0%	✓
	T1c	51	357	75,4	10,35	9,54	7,65	12,08	11,24	9,27	0%	✓
	T1d	46	085	83,3	11,57	10,59	8,19	14,00	12,97	10,58	0%	✓
	T1e	45	065	69,1	10,48	9,66	7,53	10,92	10,07	8,12	0%	✓
Tailandia 2	T2a	44	187	67,7	22,69	19,94	14,15	26,54	23,09	16,32	0%	✓
	T2b	54	226	45,3	18,65	17,08	13,61	19,95	18,27	14,52	0%	✓
	T2c	33	058	40,6	25,67	22,70	25,67	27,10	24,24	18,18	0%	✓
Japón 1	J1a	40	103	61,5	19,77	17,88	13,39	20,50	18,63	14,51	0%	✓
	J1b	43	250	79,5	13,48	12,39	9,75	15,47	14,14	11,63	0%	✓
	J1c	42	056	58,6	19,17	17,35	13,35	17,50	16,02	12,76	0%	✓
Japón 2	J2a	45	170	90,2	12,64	11,65	9,13	13,17	12,17	9,85	0%	✓
	J2b	44	255	82,3	11,14	10,35	8,29	13,88	12,89	10,51	0%	✓
	J2c	42	347	47,8	17,98	16,36	12,51	19,68	17,76	13,71	0%	✓
	J2d	55	082	77,3	11,91	11,05	8,81	13,65	12,53	10,34	0%	✓
Japón Norte	JNa	65	176	26,2	23,34	21,71	17,19	28,96	26,73	21,62	0%	✓
	JNb	70	270	15,9	25,14	23,45	18,87	35,30	29,92	24,73	0%	✓
	JNc	43	360	30,9	20,56	18,72	14,78	27,70	25,63	20,36	0%	✓
	JNd	29	052	36,3	33,74	29,51	20,71	34,72	30,18	21,52	0%	✓

CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

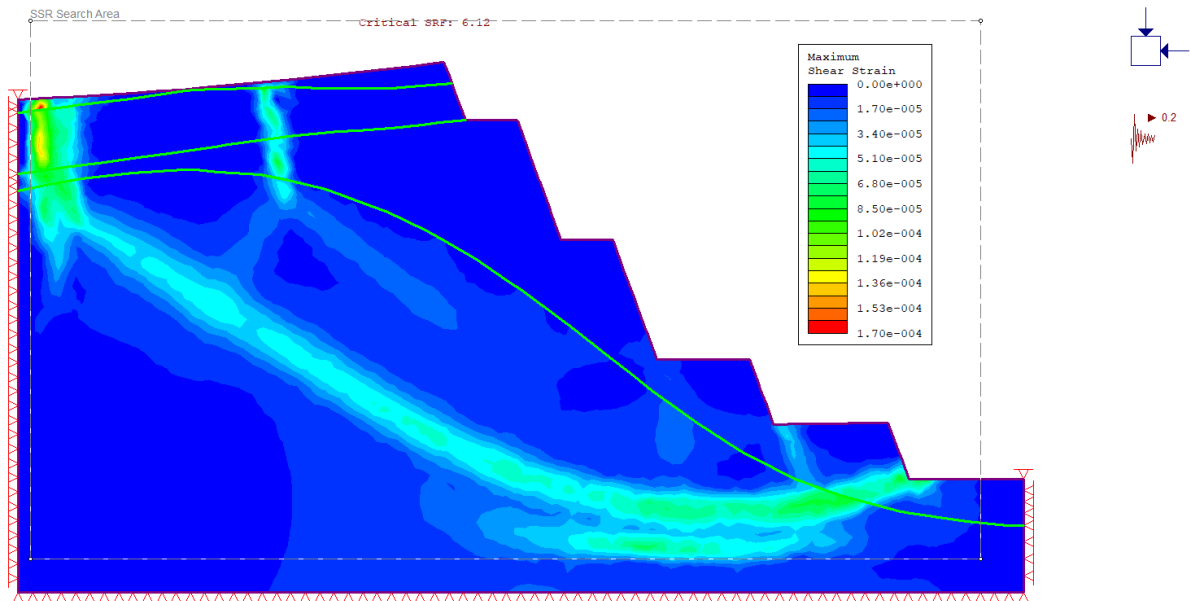


FIGURA 6.15: Ejemplo de análisis tensión -deformación a sección **T1b** para establecer superficie de corte a nivel talud global. En dicho ejemplo se somete a un análisis pseudoestático con sismo máximo, y se determina que la falla crítica ocurre con un F.S. de 6,12. (Fuente: Elaboración propia, Software: Phase 2.0 v8)

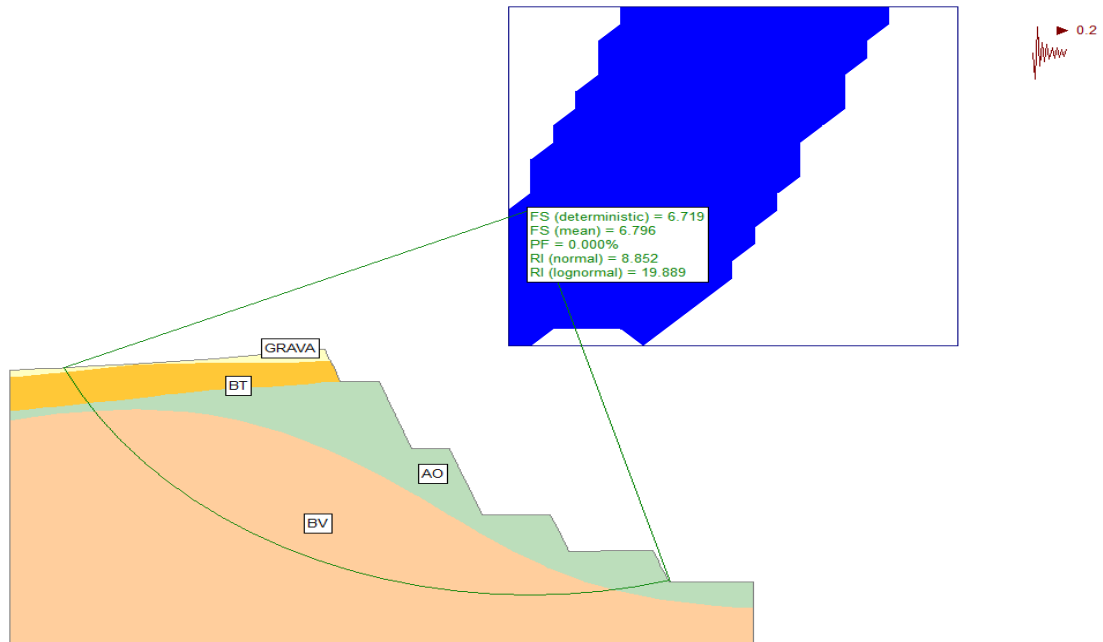


FIGURA 6.16: Ejemplo de análisis de equilibrio limite método GLE, para sección **T1b**, ajustando el análisis a la superficie de corte obtenida en análisis tensión deformación. En dicho ejemplo se somete a un análisis pseudoestático con sismo máximo, y se determina que la falla crítica ocurre con un F.S. de 6,71. (Fuente: Elaboración propia, Software: Slide v6)

6.6 EVALUACIÓN DE CAMBIO DE ÁNGULO DE TALUD GLOBAL, PARA FALLAS CON CONTROL ESTRUCTURAL.

Para la reducción de la razón estática mineral se propone en esta memoria plantear sugerencias en la modificación del ángulo de talud global, en los sectores en los cuales exista riesgo de falla por control estructural ajustándose a los criterios de aceptabilidad propuestos. Como ha sido reiterado en esta memoria, se evaluará el caso crítico el cual ocurre en condiciones pseudoestáticas de sismo máximo. Y se establecerá mediante análisis determinístico bajo el criterio de falla de Mohr-Coulomb las variaciones en los ángulos para satisfacer el criterio de aceptabilidad.

6.6.1 Caso falla plana.

En razón a los resultados obtenidos en la sección 6.4 se puede determinar que existe riesgo de falla plana a nivel talud global solo en las paredes evaluadas en las secciones T1b y T2b, ubicada en el sector Tailandia. A continuación, se resume el ángulo obtenido para modificar el diseño ajustándose a un F.S. de 1.1 y una PF de 30%, solo en el caso de T1b dado que T2b cumple con el criterio de aceptabilidad mínimo para el caso de sismo máximo.

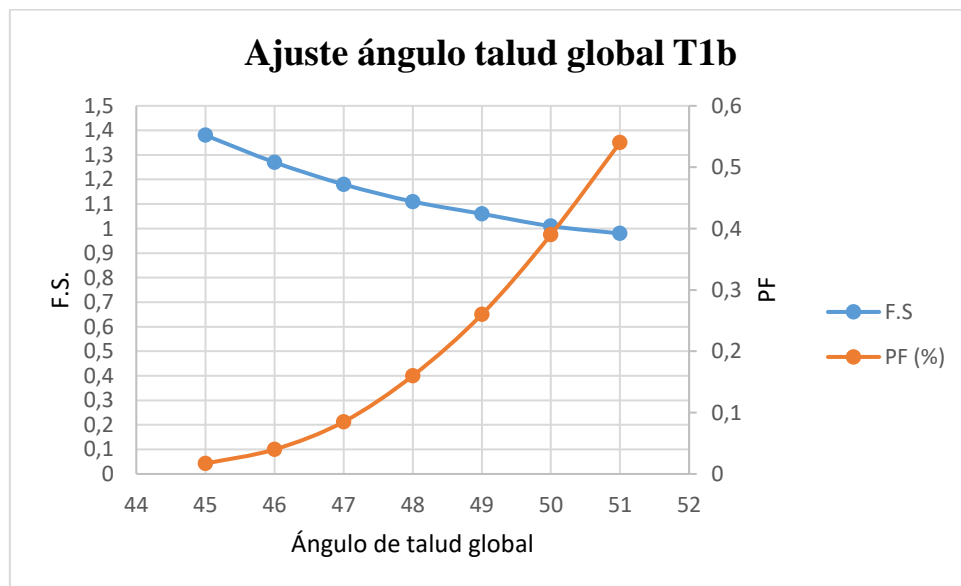


FIGURA 6.17: Gráfico de variación de ángulo de talud global con factor de seguridad y probabilidad de falla obtenido, para sección T1b de rajo Tailandia 2.

Las paredes de la sección del talud ubicado en el azimut 69° con un rango de 30° de límite lateral para la evaluación, puede modificar el ángulo de diseño global a un valor máximo de 48° obteniendo un F.S. de 1.1 y una PF de 15%.

6.6.2 Caso falla cuña.

En cuanto al riesgo de producirse falla del tipo cuña, generada por la intersección de 2 planos estructurales, da como resultado que es posible que se provoque una falla de tipo cuña a nivel talud global en los rajes Tailandia 2, Japón 2 y Japón Norte.

La sección J2a ya cumple con la condición límite del criterio de aceptabilidad para el caso de sismo máximo, por ende, las secciones en las cuales puede ser modificado su inclinación de ángulo global, son J2d y JNa. A continuación, se resumen la variación en la configuración angular de dichas secciones para satisfacer el criterio de aceptabilidad.

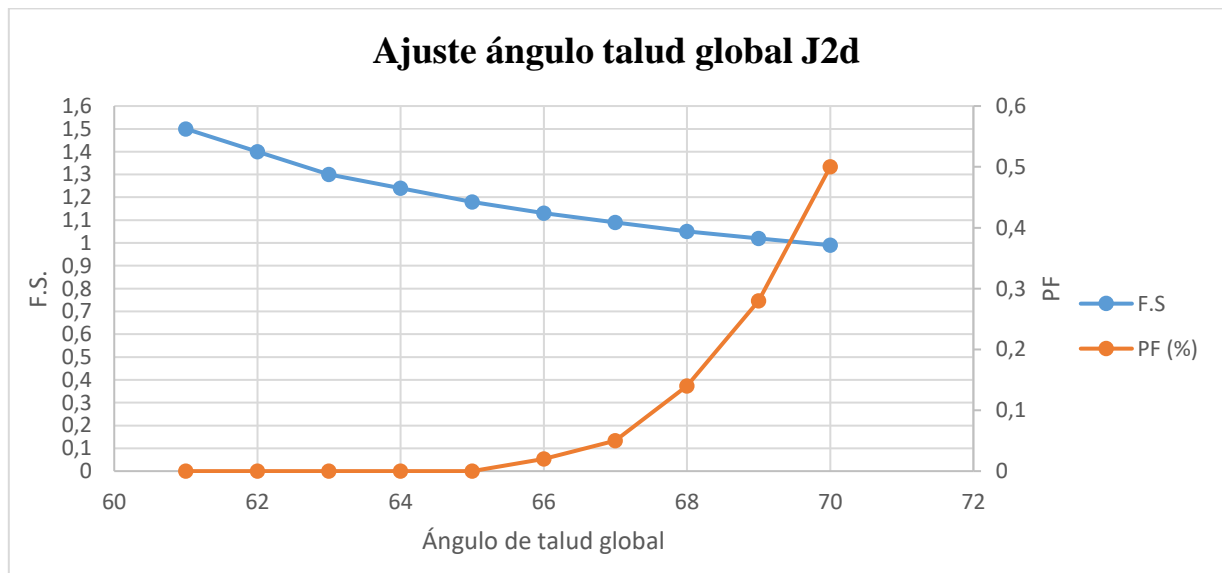


FIGURA 6.18: Gráfico de variación de ángulo de talud global con factor de seguridad y probabilidad de falla obtenido, para sección J2d de rajo Japón 2.

El talud con las paredes ubicadas entre el azimut 232° y 292° puede realizar una modificación en la configuración de diseño del ángulo de talud a un máximo de 66° satisfaciendo el criterio de aceptabilidad para el caso crítico de sismo máximo.

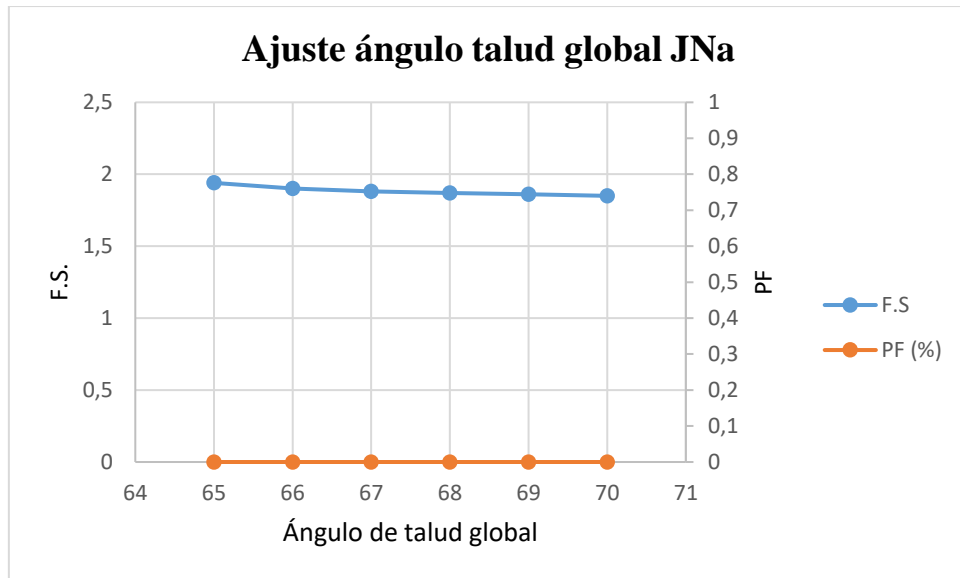


FIGURA 6.19: Gráfico de variación de ángulo de talud global con factor de seguridad y probabilidad de falla obtenido, para sección JNa de rajo Japón Norte.

El talud que conforma las paredes ubicadas entre el azimut 326° y 26° no posee grandes variaciones en la estabilidad al cambiar el ángulo de talud global bajo análisis determinístico y probabilístico, por ende, se propone realizar una variación del ángulo de talud a 70° , ajustándose al criterio límite en condiciones de evaluación como si fuera un talud a nivel banco-berma.

CAPÍTULO 7 : ANÁLISIS DE RESULTADOS.

7.1 REFERENTE A LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.

Dentro de toda el área analizada se distinguen 11 unidades geológicas las cuales se diferencian en sus características geomecánicas. Tanto China Sur como Tailandia y Japón, poseen una capa superficial de GRAVA, la cual tiene una baja calidad y competencia de acuerdo con los datos obtenidos de índice RMR_{89} y propiedades mecánicas, en ella se distingue un promedio de RMR_{89} que se aproxima a los 30 puntos.

Además el diseño de los rajos enfocándose en la profundidad de estos, interactúa principalmente con 3 unidades geológicas en la cual se distingue: Andesitas Porfírica, Andesitas Ocoítas y Brecha Volcanoclásticas, estas se encuentran clasificadas con una calidad buena a muy buena según su índice RMR_{89} el cual para estas UG tiene valores entre los 68 y 81 puntos, además poseen propiedades geomecánicas altas, según el criterio de falla de Mohr-Coulomb, para determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los taludes que serán desarrollados en cada una de las rocas clasificadas en estas unidades geológicas.

Las propiedades mecánicas de estas unidades geológicas fueron obtenidas mediante ensayos de laboratorio, pero cabe destacar que en el caso del ensayo de compresión uniaxial simple, como el ensayo de compresión triaxial, se aprecian muestras en las cuales el ensayo no es satisfactorio dado que su método de ruptura es por sistema estructural y no matriz, esto entrega datos erróneos para obtener la competencia de la roca, basándose en las características geomecánicas obtenidas con el criterio de Mohr-Coulomb. En consecuencia, los datos de resistencia al esfuerzo principal mayor y menor para las unidades geológicas Andesita Ocoíta y Brecha Volcanoclástica poseen desviaciones elevadas dado la reducida cantidad de datos utilizada para la obtención de dichas características.

Para los macizos rocosos categorizados en las unidades geológicas anteriormente mencionadas las cuales son las que conformaran los taludes, poseen un ángulo de fricción que promedia los 62° pero poseen diferencias en la cohesión, según el sector analizado, en resumen la Andesita Ocoíta tiene cohesiones de 2,54 , 3,27 y 4,28 [MPa] para los sectores de China Sur, Tailandia y Japón respectivamente en cuanto a la Andesita Porfírica la cual está presente solo en los rajos diseñados en el sector Japón tiene una cohesión de 3,67 [MPa].

En cuanto a la unidad geológica superficial GRAVA al ser un material poco competente sus propiedades geomecánicas se dispusieron en 40° de ángulo de fricción y 120 [KPa] de cohesión.

La caracterización estructural se determina a partir de un análisis bajo dos clasificaciones: en la primera se evalúan las estructuras principales medidas con el método televiwer con Rank 3 y 4, para realizar el análisis de estabilidad de talud a nivel global; y las estructuras menores agrupadas en los Rank 1 y 2, se evalúa para establecer un análisis de estabilidad a nivel banco-berma. En el caso de las estructuras menores dado la gran cantidad de datos se determina los sets de familias estructurales visualizando estas en la red estereográfica y agrupándolas según una concentración polar igual o superior a 5%.

Bajo estas condiciones da como resultado que China Sur posee 2 estructuras mayores y 5 sets estructurales menores, ambos afectan preferencialmente a los taludes ubicados en la zona SW de los rajos, en el caso de Tailandia posee 4 estructuras mayores afectando los taludes del sector E y SW, y 1 set estructural menor que se ubica en el SW y por último Japón tiene 8 estructuras mayores y 4 set estructurales menores dirigidas principalmente a la zona S, E y W.

7.2 REFERENTE A LA ESTABILIDAD DE TALUDES.

De acuerdo con los criterios de aceptabilidad determinados para las situaciones de estudio de estabilidad de taludes en caso estático y pseudoestático de cada uno de los rajos y para las secciones planteadas, se obtiene como resultados para el tema de fallas controlados por estructuras, que todas las secciones evaluadas cumplen con los valores mínimos de aceptabilidad según análisis determinístico y probabilístico. En resumen, para los casos de sistemas de falla tipo planar en la cual su ocurrencia se debe a los sets estructurales menores presentes en los sectores de China Sur y Japón, la evaluación a nivel banco-berma supera los factores de seguridad límites que plantea el criterio de aceptabilidad, dando como caso más bajo la susceptible falla producida en la sección Ch2c y J1b ubicadas en las paredes sur y este respectivamente de cada uno de los rajos China Sur 2 y Japón 1, en ellas el F.S. para el análisis de sismo máximo es de 1,32 dejando como criterio de aceptabilidad un límite de 1,10. En cuanto a las estructuras mayores que generan falla tipo planar se concentran en el sector Tailandia, donde su evaluación a nivel talud global tiene como caso más crítico la sección T2b

afectando la pared Este del rajo Tailandia 2, en ella se obtiene un F.S. de 1,11 alcanzando el límite de aceptabilidad propuesto por el criterio en el caso de sismo máximo.

Continuando con los análisis de fallas por control estructural, en cuanto al caso de análisis tipo cuña, este se presenta a nivel de talud global exclusivamente en el sector de Japón donde las fallas más críticas poseen un F.S. de 1,20 y 1,12 en el análisis pseudoestático de sismo máximo, para las secciones JNa y J2a las cuales se encuentran en el sector norte de los rajos. Y a nivel banco-berma los casos críticos ocurren en el sector de China Sur principalmente en las paredes ubicadas en el sur y oeste dando como resultado valores de F.S. mínimos de 1,29 bajo sismo máximo lo cual concluye que son rajos conformados por taludes estables.

Por otro lado, los resultados para fallas sin control estructural bajo metodologías de análisis tensión-deformación y equilibrio límite por método de dovelas preciso GLE, muestran que existe una marcada tendencia a la reducción a la resistencia del esfuerzo cortante, en la unidad geológica GRAVA mientras va aumentando la altura de los taludes diseñados en este tipo de material, en resumen el sector más crítico en el cual se produce una falla tipo circular ocurre en el rajo Tailandia 2 en las secciones T1a y T1e las cuales afectan las paredes norte y oeste, en ellas la altura de GRAVA supera los 40 m con un límite máximo que alcanza los 55 m, bajo estas condiciones se obtiene un F.S. en caso de sismo máximo de 1,46 y 1,36. En el análisis de tensión-deformación se alcanzó diferencias de 0,11 en F.S. con el análisis GLE, cumpliendo el criterio de 1,1.

En cuanto a la evaluación de talud global tiene F.S. superiores a 10 debido a que la roca que compone los taludes posee propiedades geomecánicas competentes lo cual establece una alta resistencia al corte.

Finalmente, la evaluación para establecer una variación del diseño en los rajos en cuanto al ángulo de talud global, acogiéndose a los límites de criterio de aceptabilidad se puede concluir que la pared norte-este del rajo Tailandia 1, puede ser modificado el ángulo de talud global a 48° y en el caso de Japón 2 puede ser cambiado el ángulo a 66° en la pared sur-oeste.

También es posible modificar el ángulo de la pared norte del rajo Japón Norte a un ángulo de 70° debido a que la altura del talud global no supera los 27 m, y puede considerarse como un talud con características banco-berma según los rasgos de diseño y de la roca en la cual se construye.

CONCLUSIONES.

El objetivo principal de esta memoria pretendió determinar la estabilidad de los taludes que conforman un sistema de explotación de 7 rajos con la ayuda de una caracterización geotécnica.

Por medio de una clasificación de información de sondajes en conjunto con una sincronización de datos geológicos, se encuentran 11 unidades geológicas en las cuales 3 constituyen GRAVA de mala calidad según la categorización basada en el índice RMR_{89} y 8 son rocas de buena a muy buena calidad, de acuerdo con el índice citado. Además, esta categorización se sustenta con los resultados obtenidos de propiedades geomecánicas de las unidades geológicas, en donde se alcanzaron valores altos de cohesión y ángulo de fricción de acuerdo con el criterio de falla de Mohr-Coulomb.

El análisis de estabilidad se basó en primera instancia en detectar las posibles fallas por control estructural sometiendo las secciones propuestas a un análisis cinemático tomando como información los datos obtenidos de la caracterización geotécnica. Posteriormente se realizó una evaluación determinística y probabilística de equilibrio límite en donde se concluye que todos los taludes ya sea a nivel banco-berma como a nivel global son estables, para los casos de posibles fallas tipo plana y cuña en condiciones estáticas y pseudoestáticas.

En cuanto a las fallas no controladas por estructuras, las áreas en las cuales existe menor resistencia al corte se encuentran en la superficie formada por la UG GRAVA, en ella se aprecia una altura máxima de 54 m y el F.S. es de 1,46 conservando la estabilidad de acuerdo con los criterios de aceptabilidad para el caso de sismo máximo el cual es 1,10.

Se estima con un R^2 de 0.9 de acuerdo con la curva generada por los datos obtenidos, que la altura máxima de GRAVA para construir un talud en los sectores en los cuales están ubicados estos rajos es de 60,8 m.

Por otro lado, el análisis-tensión deformación a nivel talud global descarta completamente la posibilidad de fallas sin control estructural dado la alta resistencia al corte que poseen las unidades geológicas que componen dichas profundidades.

En consecuencia, se plantea como recomendación respaldándose bajo un análisis de variación angular a nivel talud global para fallas con control estructural tipo plana y cuña, que pueden ser modificados los ángulos referentes a los rajos Tailandia 1 en su pared norte-este

CONCLUSIONES

incrementando el ángulo en 6° , Japón 2 en su pared sur-oeste aumentando el ángulo en 11° y Japón Norte en su pared norte aumentando el ángulo en 5° , dichas modificaciones cumplen con los criterios de aceptabilidad propuestos por ende siguen considerándose estables.

Enfocándose en el nivel de logro de objetivos cabe mencionar que todos son desarrollados en un alto nivel de cumplimiento, entregando como resultados valores cuantitativos que pueden ser sustentados con evidencia teórica y empírica, los cuales dan cumplimiento de manera significativa a los lineamientos que rigen la seguridad estructural de los taludes mineros, pedidos por el SERNAGEOMIN.

Por contraste, en esta tesis ocurrió una dificultad debido a que la metodología utilizada para determinar la estabilidad de los taludes consideró para el caso de las propiedades geomecánicas de las estructuras valores de un estudio anterior. Por ende, se añade como recomendación realizar una actualización de la información estructural por medio de ensayos de corte directo, como también someter una mayor cantidad de muestras a ensayos de compresión simple y compresión triaxial para disminuir la desviación producida por la rotura estructural y no matriz de estas muestras.

La continuación de esta línea investigativa se puede extender realizando nuevos mapeos geológicos-geotécnicos para mejorar la caracterización geotécnica, además plantear una evaluación de caída de rocas, para verificar las condiciones de seguridad que entregan las bermas entre taludes. Como también calcular la obtención de las propiedades geomecánicas con metodologías distintas a Mohr-Coulomb, lo cual provocaría diferencias en la resistencia de las rocas. Por otro lado, en cuanto a los análisis tensión-deformación pueden mejorarse con metodologías tridimensionales ya sea de elementos finitos o de borde, incorporando la información estructural al análisis.

REFERENCIAS.

- Diaz, J. S. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga.
- E.T.Brown, & E.Hoek . (2003). Estimación de la resistencia de macizos rocosos en la práctica.
- Gonzalez de Vallejo, L. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Prentice Hall, 715.
- Ingeniería de rocas LTDA. (2008). *Estudio de estabilidad de taludes proyecto China*. Santiago de Chile.
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for open pit slope design*. CSIRO, 496.
- Servicio Nacional de Geología y Minería-SERNAGEOMIN. (s.f.). *portalgeo.sernageomin.cl*. Obtenido de <http://portalgeo.sernageomin.cl/geoportal/catalog/search/resource/resumen.page?uuid=%7BC81A4198-D90B-43DC-9064-1F3F39593DF5%7D>
- Tecnología y Geociencias. LTDA. (2016). *Estudio de impacto ambiental. Proyecto Continuidad Mina Gabriela*.
- Tecnología y Geociencias. LTDA. (2018). *Geología de China Sur, Japón-India y Tailandia*.
- Tecnología y Geociencias. LTDA. (s.f.). *Instructivo de mapeo por tramos geotécnicos*.
- Valencia, Y, Assis, A, & Carvalho, J. (2005). *Estudo do efeito da intemperização na estabilidade de um talude de solo metamórfico aplicando métodos probabilísticos. II Simpósio sobre solos tropicais e processos erosivos no centro-oeste*. Goiânia.
- Vivanco, M, & Gonzalez, F. (2015). Modelamiento de Sistemas y Dominios Estructurales para la categorización geotécnica del yacimiento dominga, region de coquimbo. *Congreso geologico chileno*, 348.
- Wyllie, D. C, & Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering civil and mining*, 431.
- Z.T.Bieniawski. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: Wiley.

ANEXOS.

ANEXO A: PROCESAMIENTO DE DATOS Y METÓDOLOGIAS.

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

ANEXO A: PROCESAMIENTO DE DATOS Y METODOLOGÍAS.

UBICACIÓN ESPACIAL DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA.

Los datos obtenidos de la información proveniente de los sondajes poseen la siguiente configuración espacial en cada uno de los *Pits* analizados.

Por motivos de limitaciones del software utilizado, se elimina el prefijo “KPE” en la visualización de los collares de los sondajes.



FIGURA A. 1: Visualización de collares de los sondajes perteneciente al sector China Sur, en la parte superior se encuentra el rajo China Sur 1 y en el inferior el rajo China Sur 2.



FIGURA A. 2: Visualización de collares de los sondajes perteneciente al sector Tailandia, en la parte superior se encuentra el rajo Tailandia 1 y en el inferior el rajo Tailandia 2.

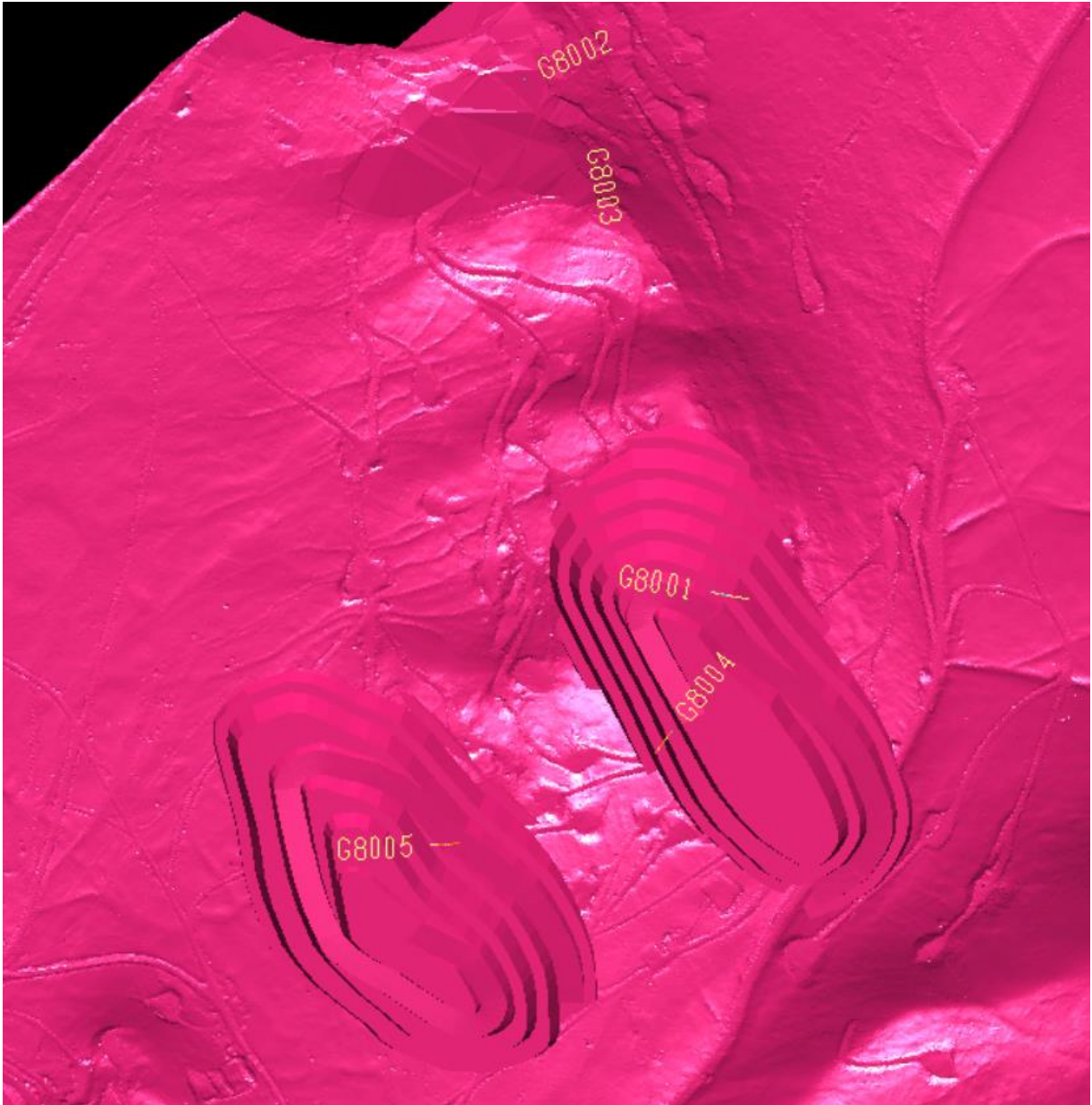


FIGURA A. 3: Visualización de collares de los sondajes perteneciente al sector Japón, en la parte superior se encuentra el rajo Japón 1 y en el inferior el rajo Japón 2.



FIGURA A. 4: Visualización de collares de los sondajes perteneciente al sector Japón, específicamente el rajo Japón Norte.

ENSAYOS DE LABORATORIO.

Los ensayos realizados conforman una totalidad de 144 muestras provenientes de 15 sondajes, el encargado de realizar los ensayos fue el laboratorio Rocktest, perteneciente a la empresa Mecánica de Rocas Ltda. A continuación, se detalla la configuración de ensayos realizados a las muestras clasificadas en cada sondaje.

TABLA A. 1: Desglose de los ensayos realizados a cada uno de los sondajes.

Sondaje	Ensayos						
	Muestras	UCS	Compresión Triaxial	Módulo elástico	Tracción Indirecta	Velocidad de ondas	Peso Unitario
KPEG17-286	4	1	1	1	2	1	4
KPEG17-288	5	2	2	2	1	2	8
KPEG17-291	5	1	4	1	-	1	10
KPEG17-294	5	1	2	1	2	1	6
KPEG17-295	13	4	7	3	6	3	22

Sondaje	Ensayos						
	Muestras	UCS	Compresión Triaxial	Módulo elástico	Tracción Indirecta	Velocidad de ondas	Peso Unitario
KPEG17-296	16	4	7	3	5	3	22
KPEG17-297	13	4	8	4	3	4	24
KPEG17-298	7	3	4	3	-	3	14
KPEG18-1	8	2	2	2	4	2	8
KPEG18-2	3	2	1	2	-	2	6
KPEG18-3	19	4	12	4	3	4	32
KPEG18-4	20	6	9	6	5	6	30
KPEG18-5	6	2	2	2	2	2	8
KPEG18-6	2	-	2	-	-	-	4
KPEG18-7	18	4	6	4	6	4	24

ESTIMACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESION UNIAIXIAL EN SITU.

La metodología para estimar la resistencia a la compresión uniaxial simple, de los datos obtenidos de las campañas de sondaje por parte de la empresa polaca dueña de la mina, se detalla en el siguiente instructivo.

Grado	Descripción	Identificación de Terreno	Rango Aproximado de Resistencia a la Compresión Uniaxial (Mpa)
S1	Arcilla Muy Blanda	Fácilmente penetrable varias pulgadas con el puño.	<0,025
S2	Arcilla Blanda	Fácilmente penetrable varias pulgadas con el pulgar.	0,025-0,05
S3	Arcilla Firme	Puede ser penetrada varias pulgadas con el pulgar, con esfuerzo moderado.	0,05-0,10
S4	Arcilla Rígida	Fácilmente marcada por el pulgar, solamente puede ser penetrada con gran esfuerzo.	0,10-0,25
S5	Arcilla Muy rígida	Fácilmente marcada por la uña.	0,25-0,50
S6	Arcilla Dura	Marcada con dificultad por la uña.	>0,50
R0	Roca Extremadamente Débil	Marcada por la uña.	0,25-1,0
R1	Roca Muy Débil	Se disgrega por un golpe fuerte de la punta del martillo geológico, puede ser escarbada por el cortaplumas.	1,0-5,0
R2	Roca Débil	Puede ser escarbada por el cortaplumas con dificultad, se deforma o disgrega por un fuerte golpe de la punta del martillo.	5,0-25
R3	Roca Medianamente Fuerte	No puede ser escarbada o disgregada por una cortaplumas, la muestra se fractura con un solo golpe firme del martillo geológico.	25-50
R4	Roca Fuerte	La muestra requiere más de un golpe del martillo geológico para ser fracturada.	50-100
R5	Roca Muy Fuerte	La muestra requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturada.	100-250
R6	Roca Extremadamente Fuerte	La muestra solo puede ser astillada con el martillo geológico.	>250

FIGURA A. 5: Criterios para estimación de la resistencia del material. (Tecnología y Geociencias. LTDA.)

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

ANÁLISIS CINEMÁTICO CON RED ESTEREOGRÁFICA.

A continuación, se mostrarán las familias estructurales planteadas luego de realizar una proyección de todas las estructuras menores y trazar como familia estructural donde existe una concentración polar superior al 5%.

Sector China Sur estructuras menores análisis banco-berma.

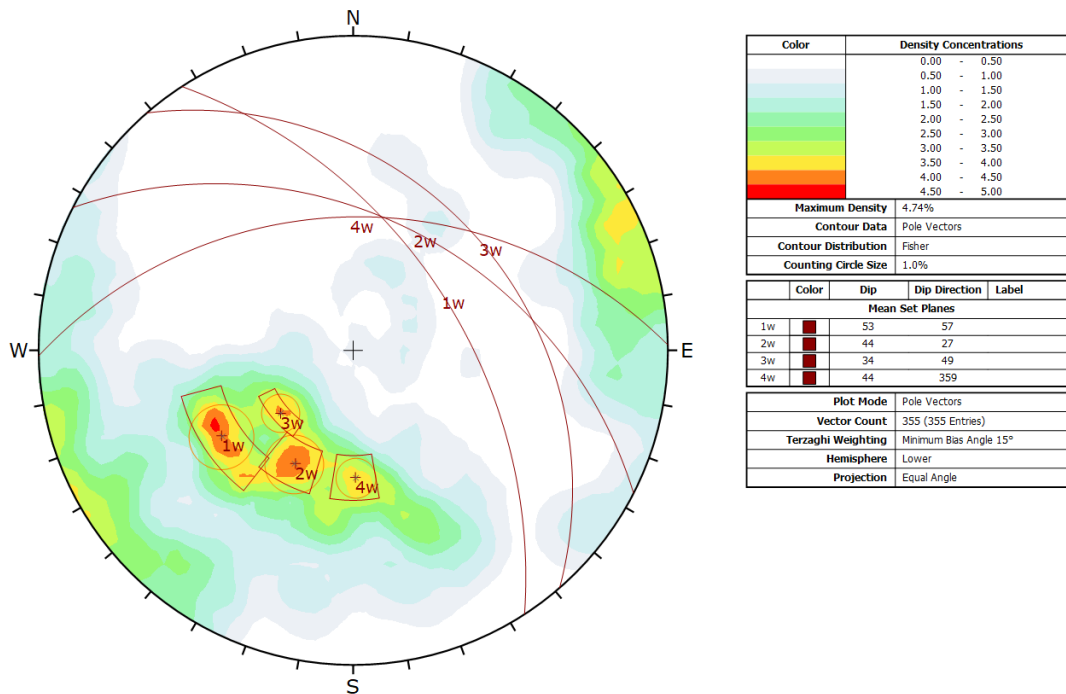


FIGURA B. 1: Proyección estereográfica de sector rajo China Sur en ella se representa la familia estructural de las estructuras menores.

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

Análisis cinemático taludes críticos.

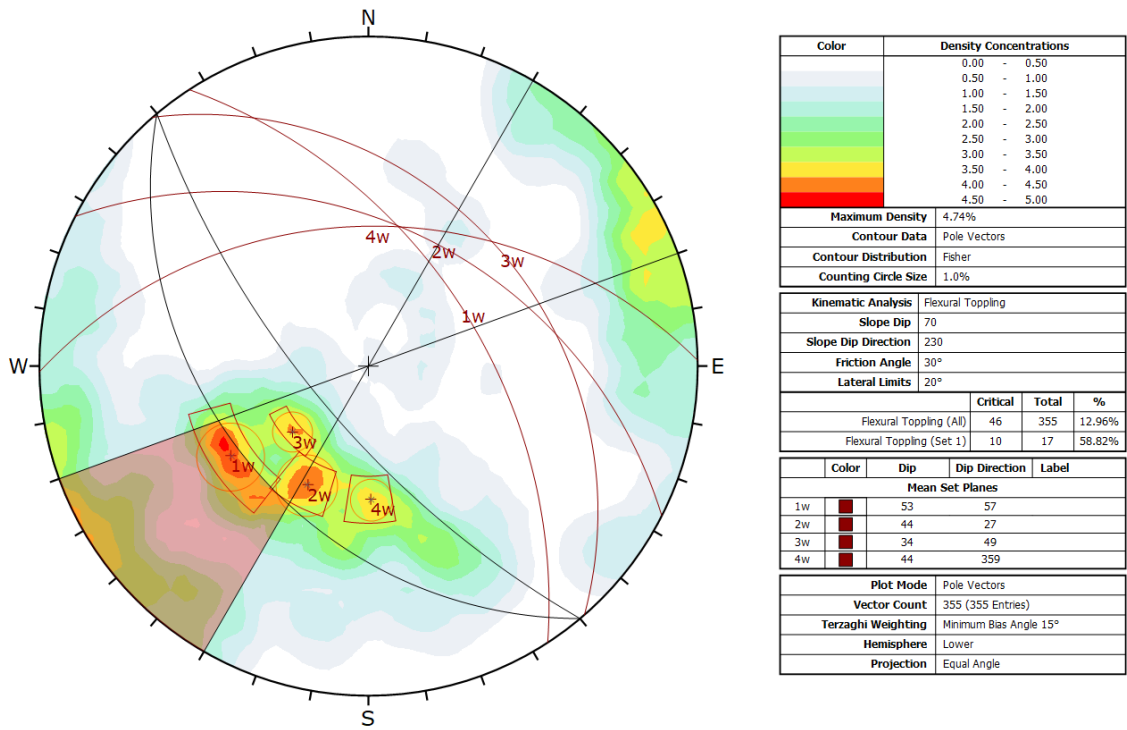


FIGURA B. 2: Detección de susceptible falla tipo toppling, talud Dip/DipDir 70°/230°, rajo China Sur 1.

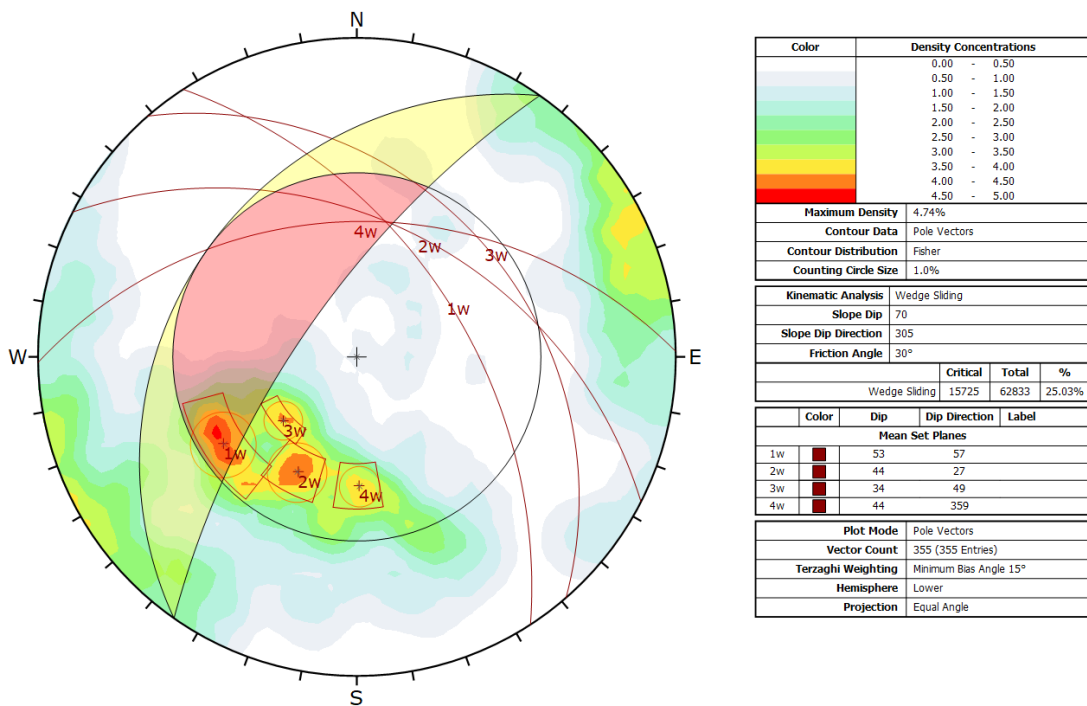


FIGURA B. 3: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/325°, rajo China Sur 1.

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

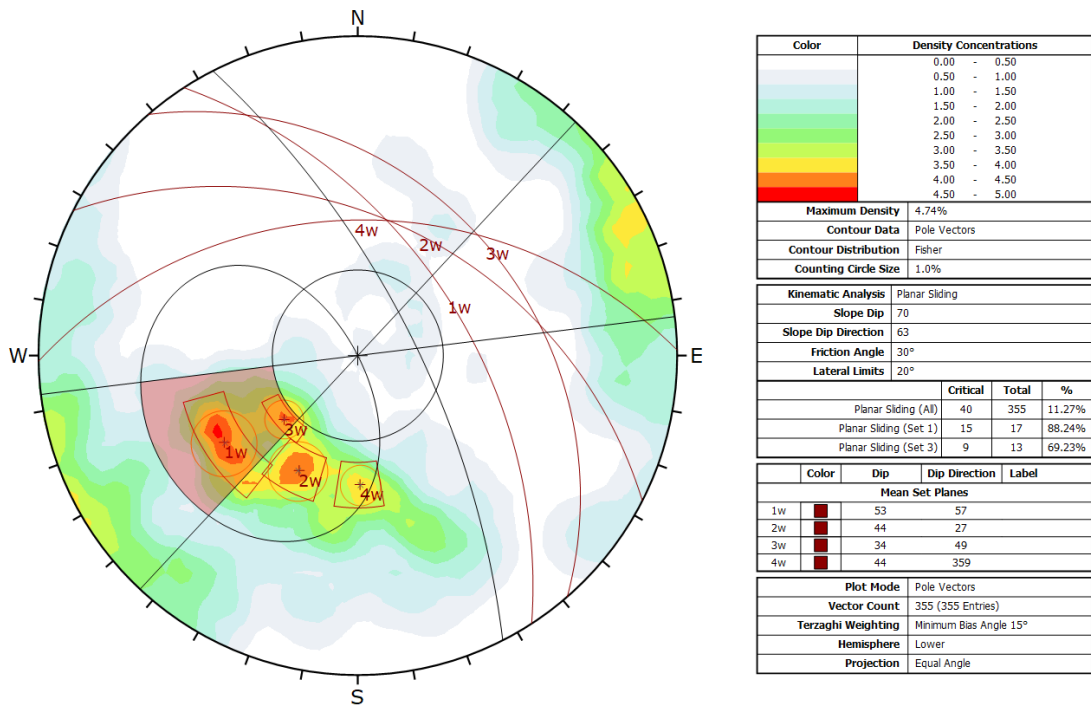


FIGURA B. 4: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/63°, rajo China Sur 1.

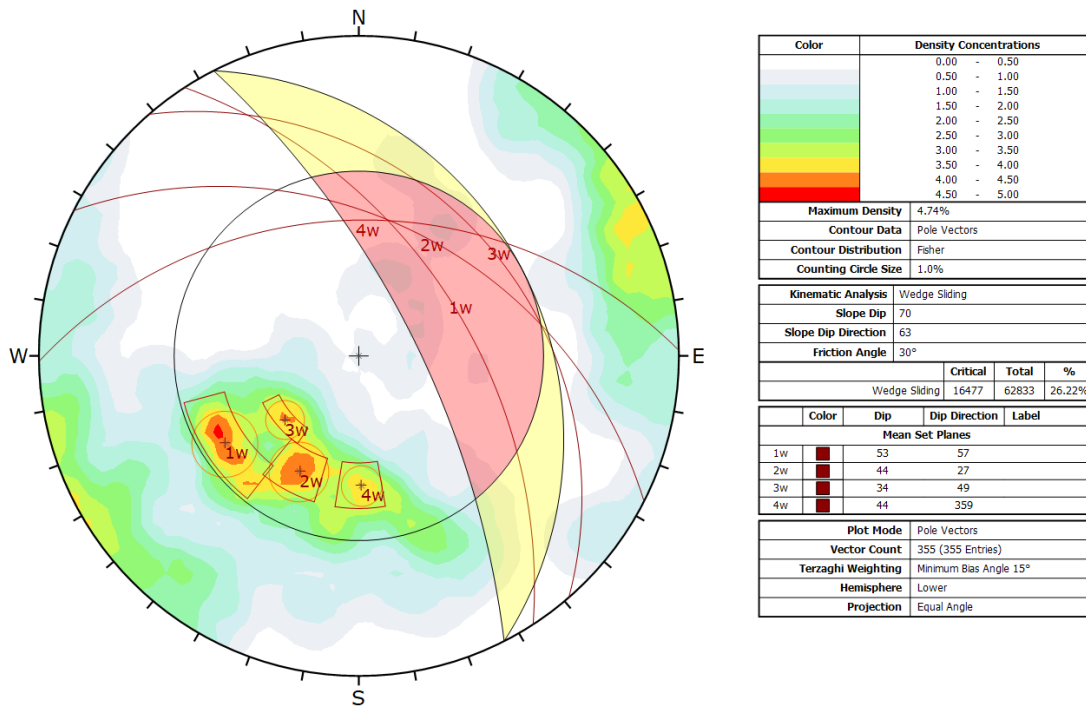


FIGURA B. 5: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/63°, rajo China Sur 1.

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

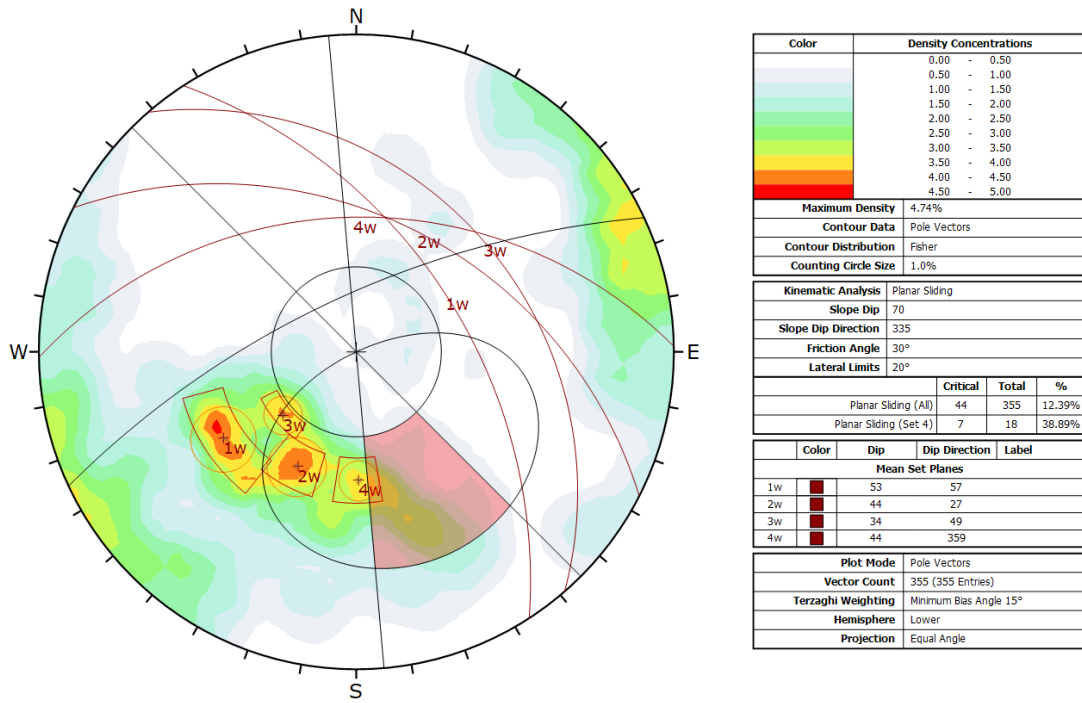


FIGURA B. 6: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/335°, rajo China Sur 2.

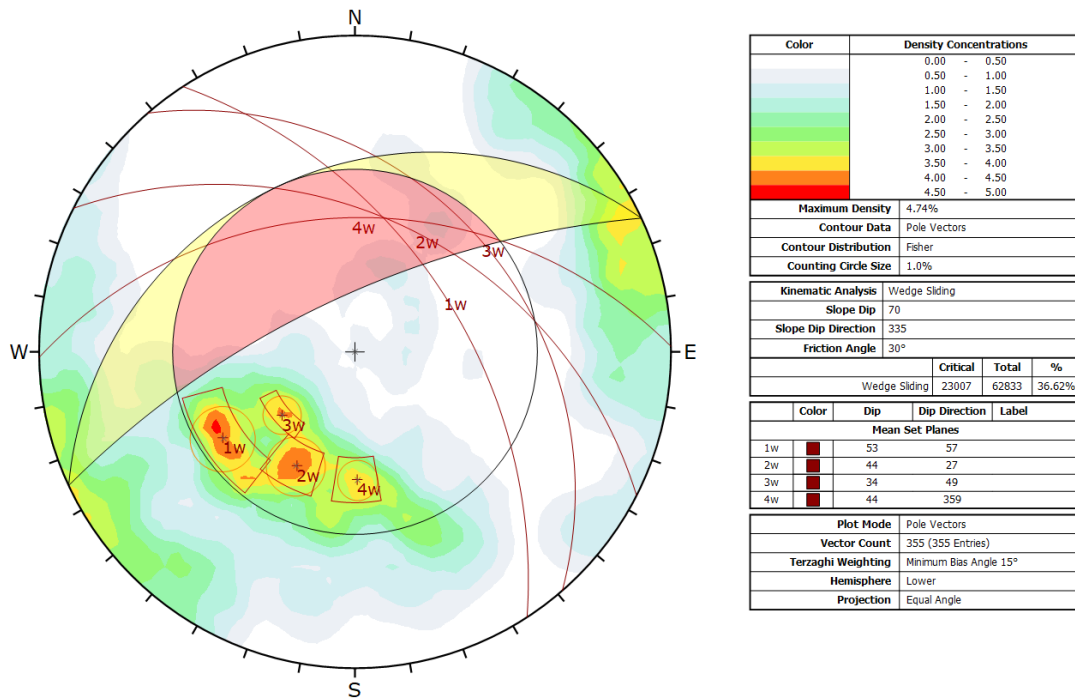


FIGURA B. 7: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/335°, rajo China Sur 2.

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

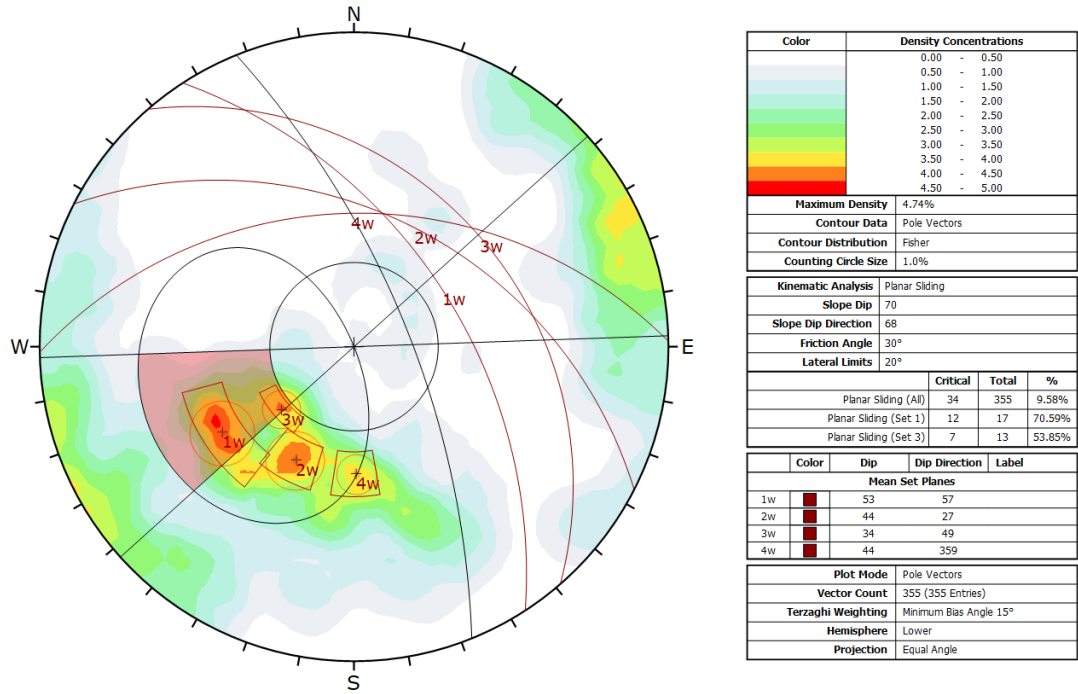


FIGURA B. 8: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/68°, rajo China Sur 2.

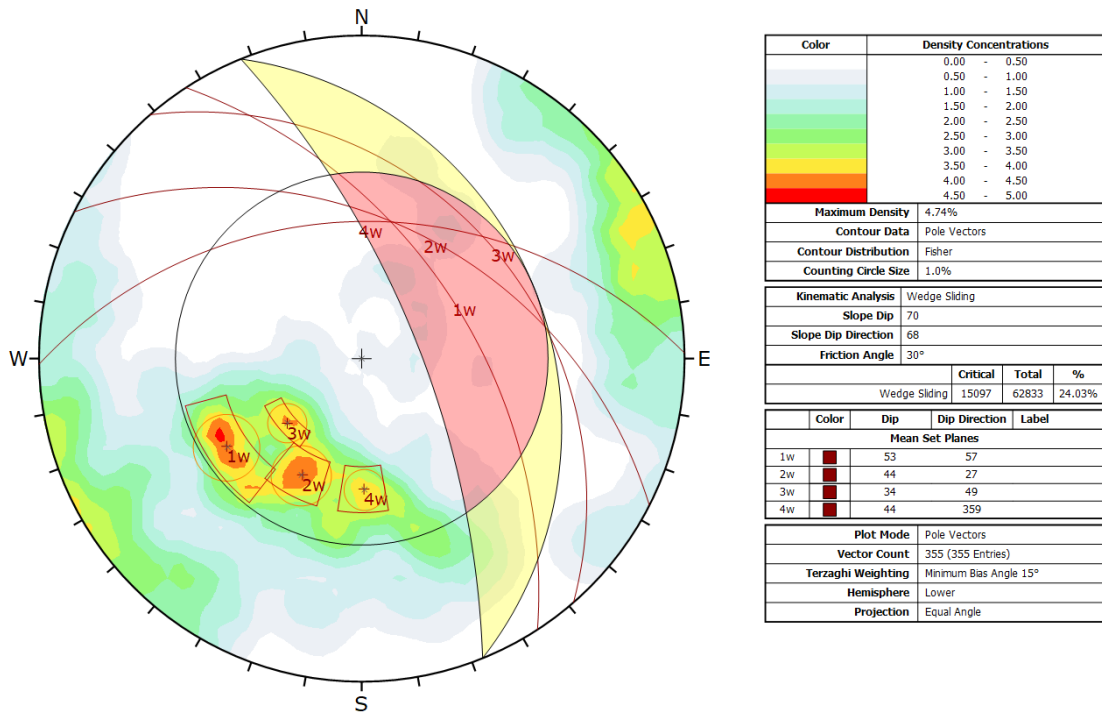


FIGURA B. 9: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/68°, rajo China Sur 2.

Sector Japón estructuras menores análisis banco-berma.

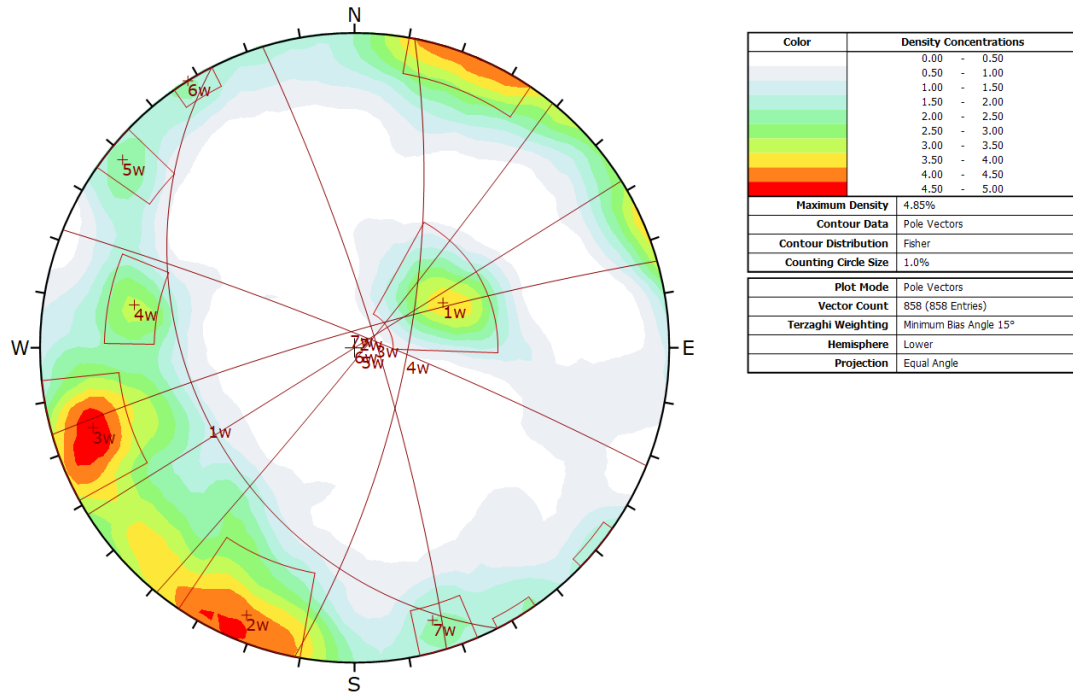


FIGURA B. 10: Proyección estereográfica de sector rajo Japón en ella se representa la familia estructural de las estructuras menores.

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

Análisis cinemático taludes críticos.

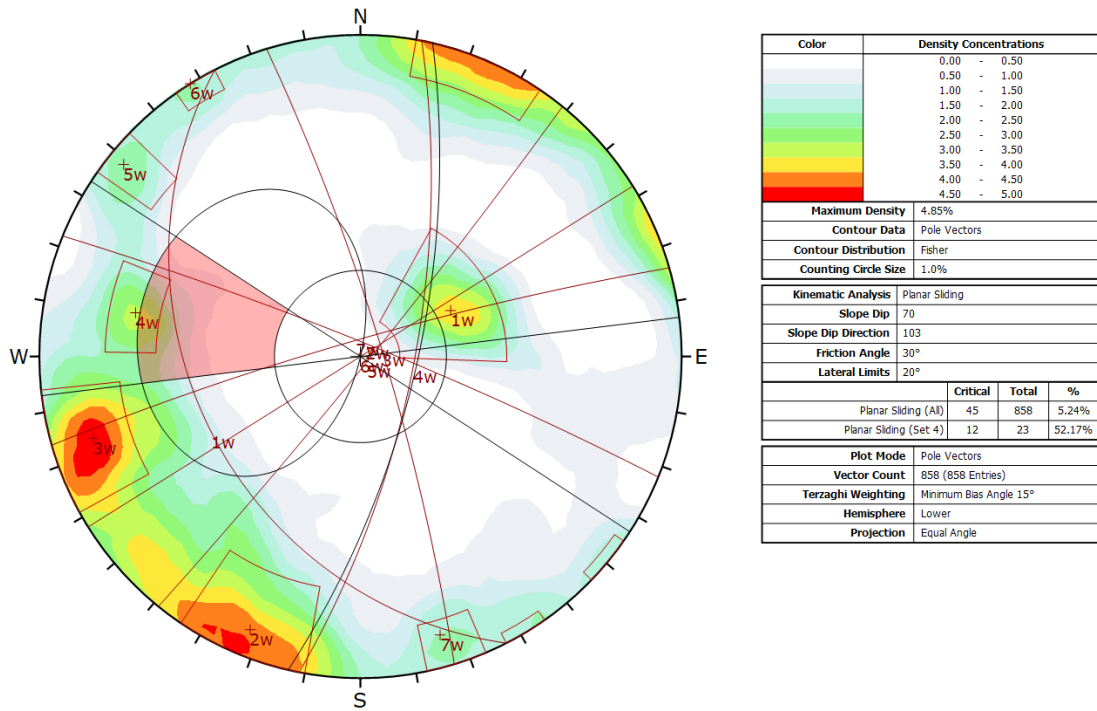


FIGURA B. 11: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/103°, rajo Japón 1.

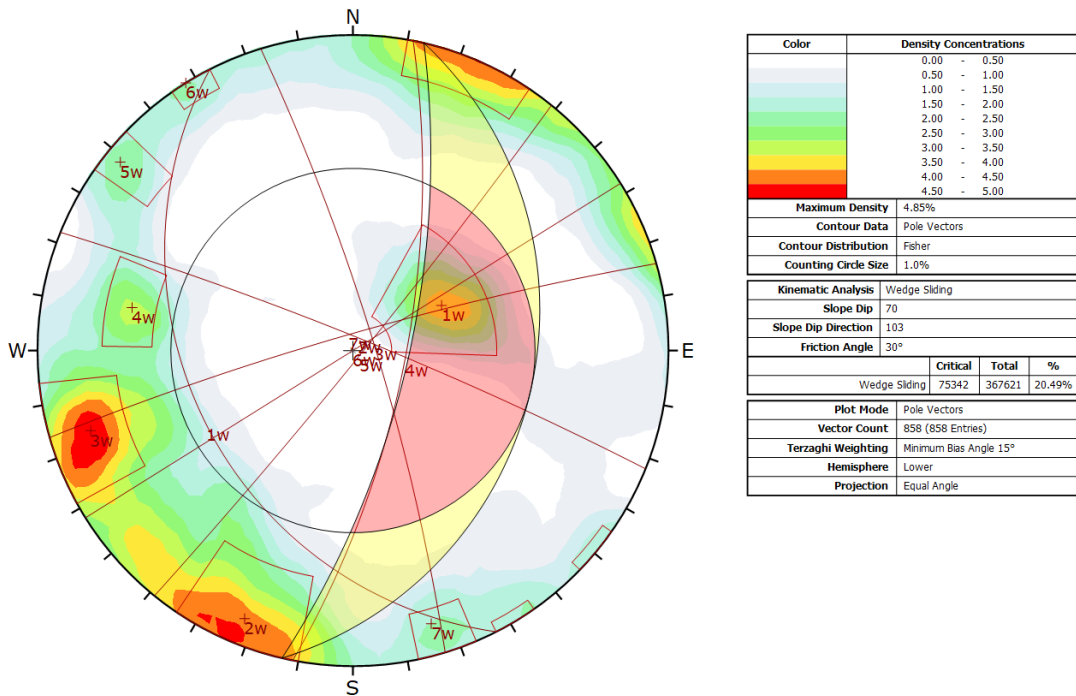


FIGURA B. 12: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/103°, rajo Japón 1.

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

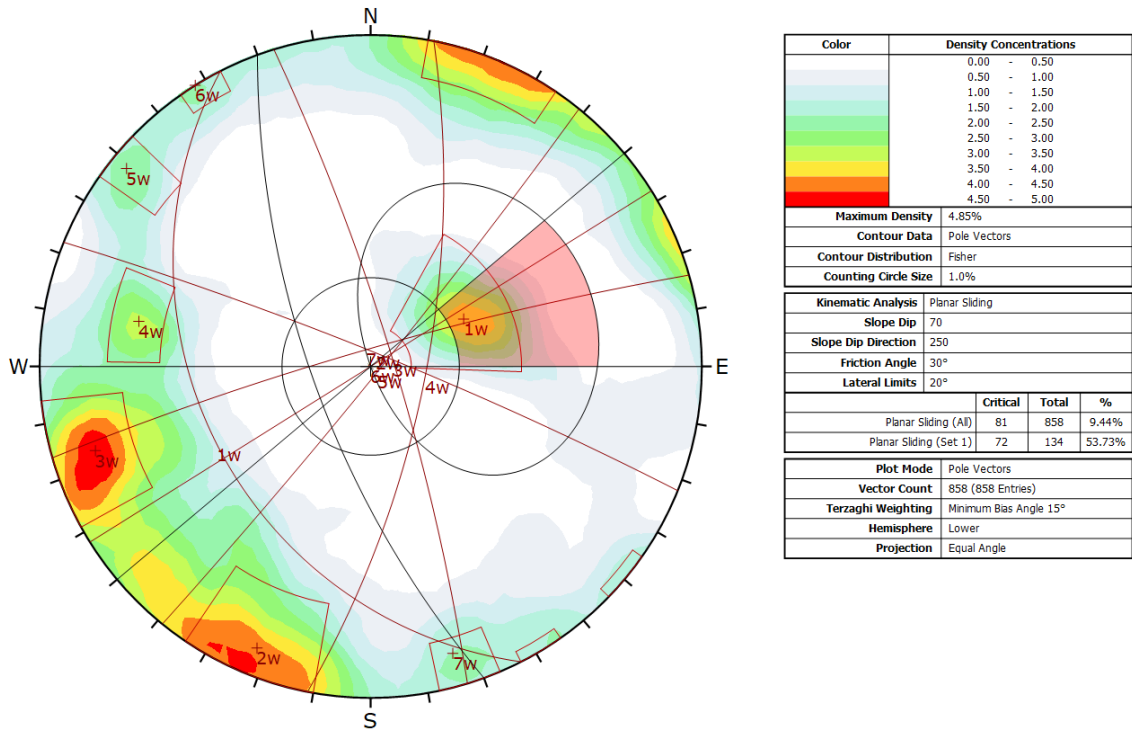


FIGURA B. 13: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/250°, rajo Japón 1.

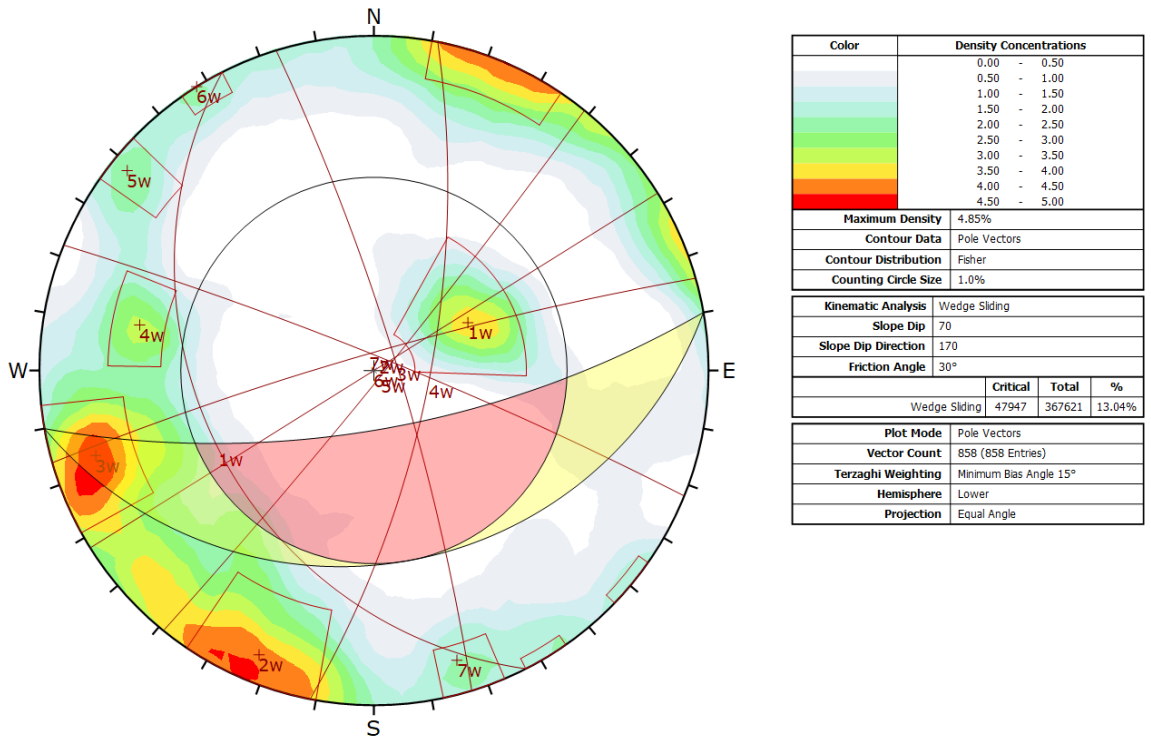


FIGURA B. 14: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/170°, rajo Japón 2.

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

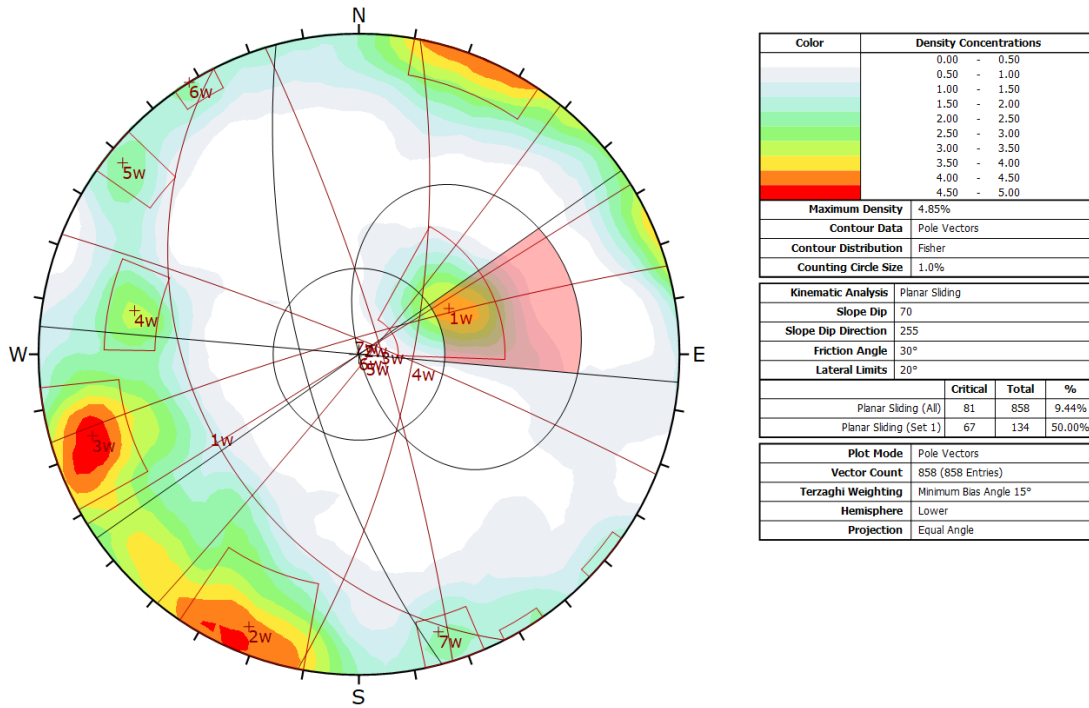


FIGURA B. 15: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/255°, rajo Japón 2.

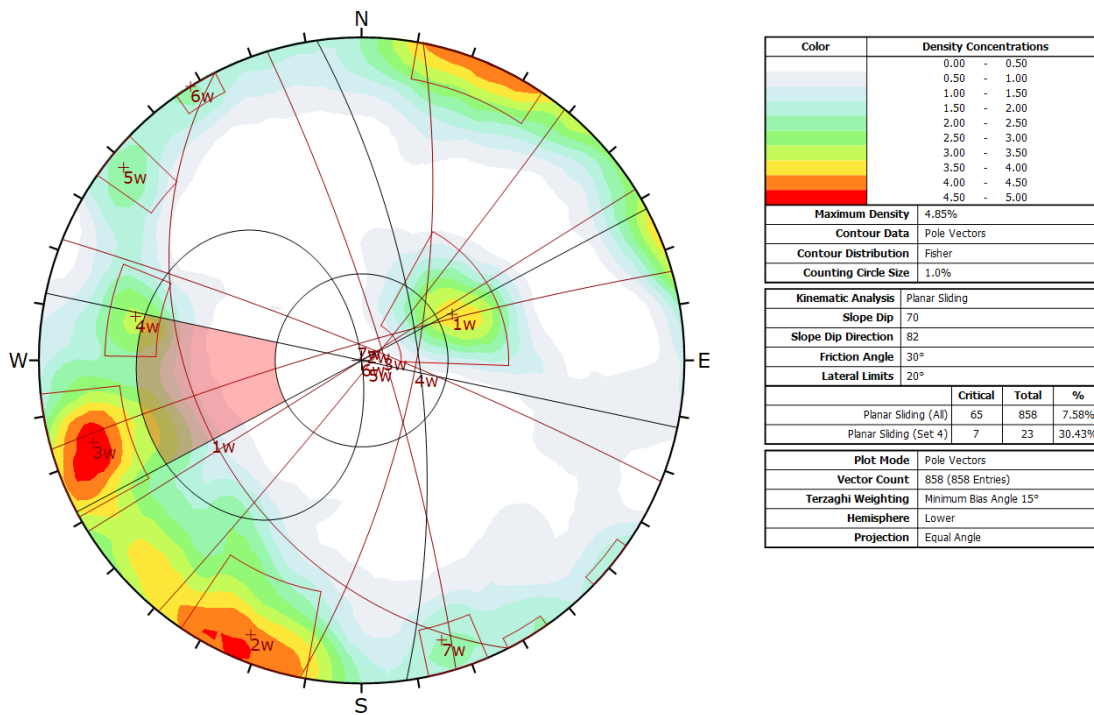


FIGURA B. 16: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/82°, rajo Japón 2.

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

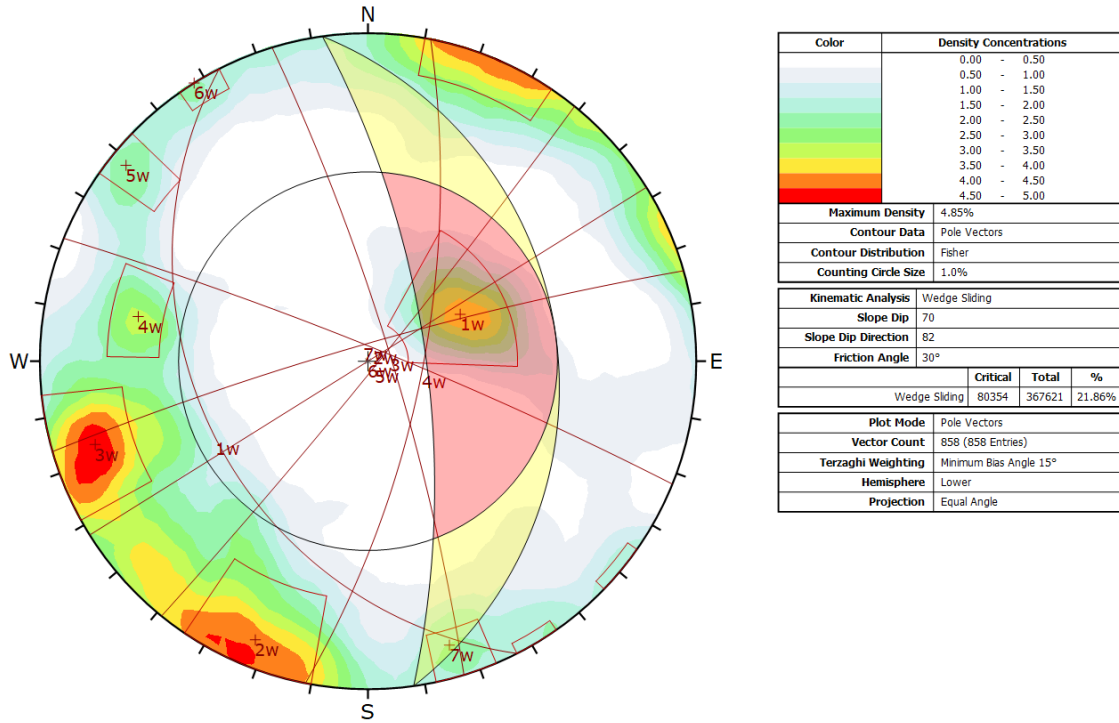


FIGURA B. 17: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/82°, rajo Japón 2.

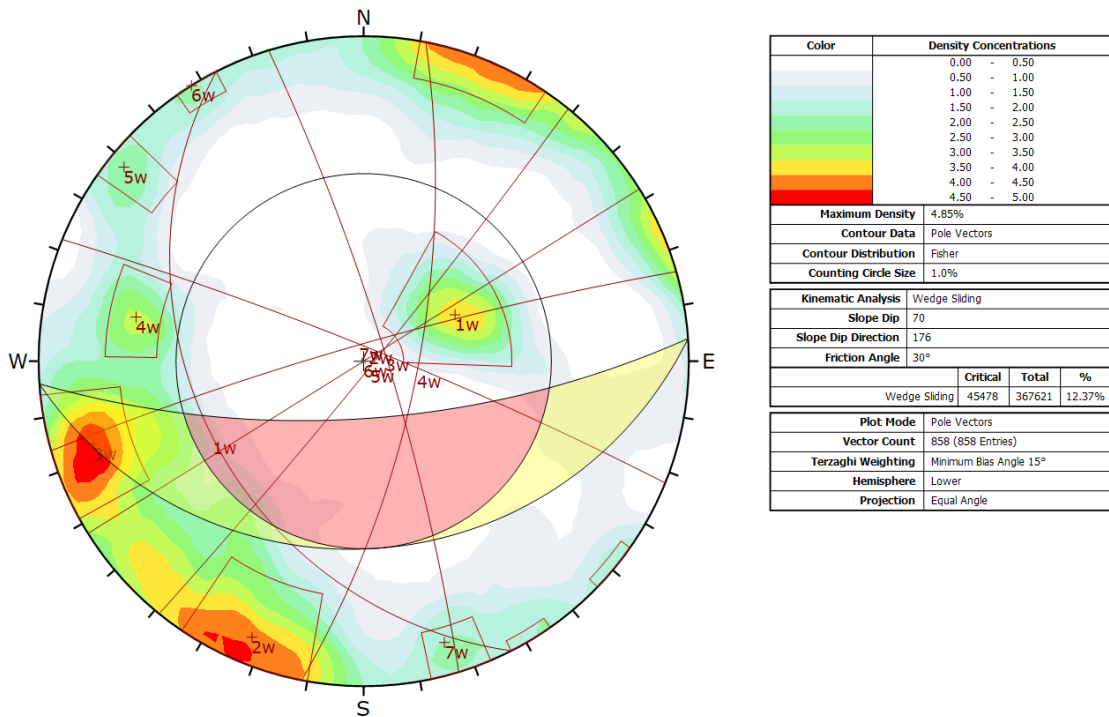


FIGURA B. 18: Detección de susceptible falla tipo cuña, talud Dip/DipDir 70°/176°, rajo Japón Norte.

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

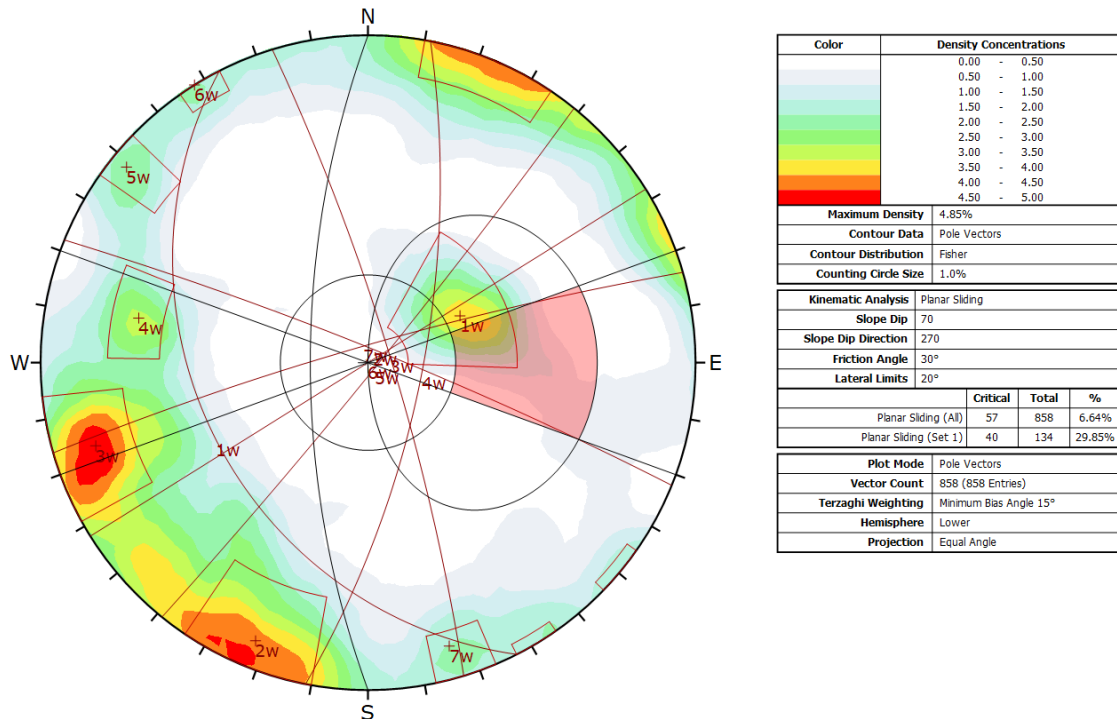


FIGURA B. 19: Detección de susceptible falla tipo plana, talud Dip/DipDir 70°/270°, rajo Japón Norte.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TENSIÓN-DEFORMACIÓN.

A continuación, se visualizarán los análisis tensión-deformación realizados a las secciones de los diferentes *pits* para evaluar la estabilidad a nivel banco-berma en los bancos formados por GRAVA y a nivel talud global en los taludes conformados por las unidades geológicas con roca más competente.

Evaluación a nivel banco-berma UG GRAVA.

Debido a su baja calificación según la clasificación del índice geomecánico RMR_{89} la unidad geológica GRAVA supone un comportamiento poco competente a la resistencia al corte, en una evaluación de estabilidad. Por ende, se realiza una evaluación particular de estos sectores para determinar la resistencia al corte mediante métodos de tensión-deformación. De manera complementaria debido a que la UG GRAVA se localiza de forma superficial en los yacimientos, se enfoca la evaluación a nivel banco-berma.

Sector China Sur.

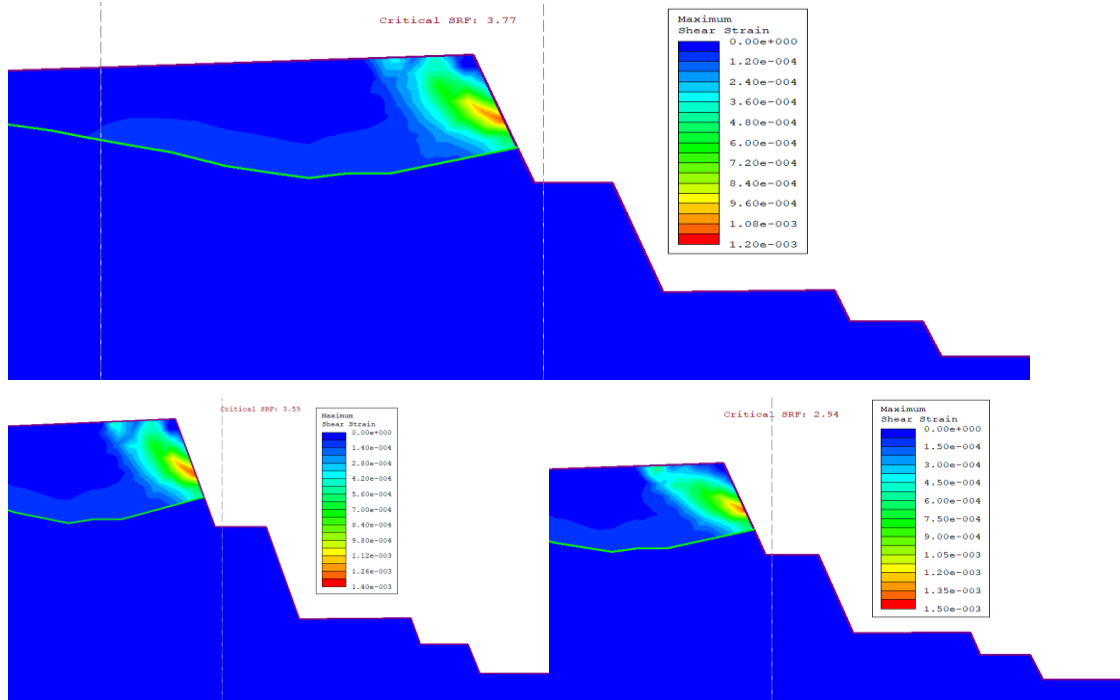


FIGURA B. 20: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch1a bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)

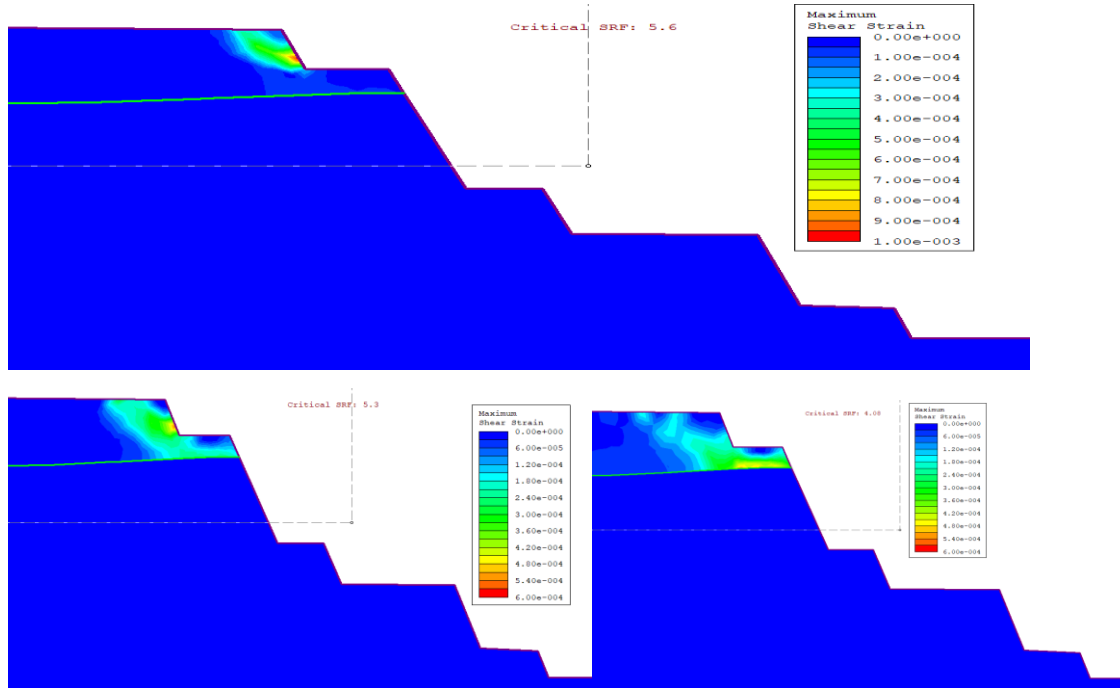


FIGURA B. 21: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch1b bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

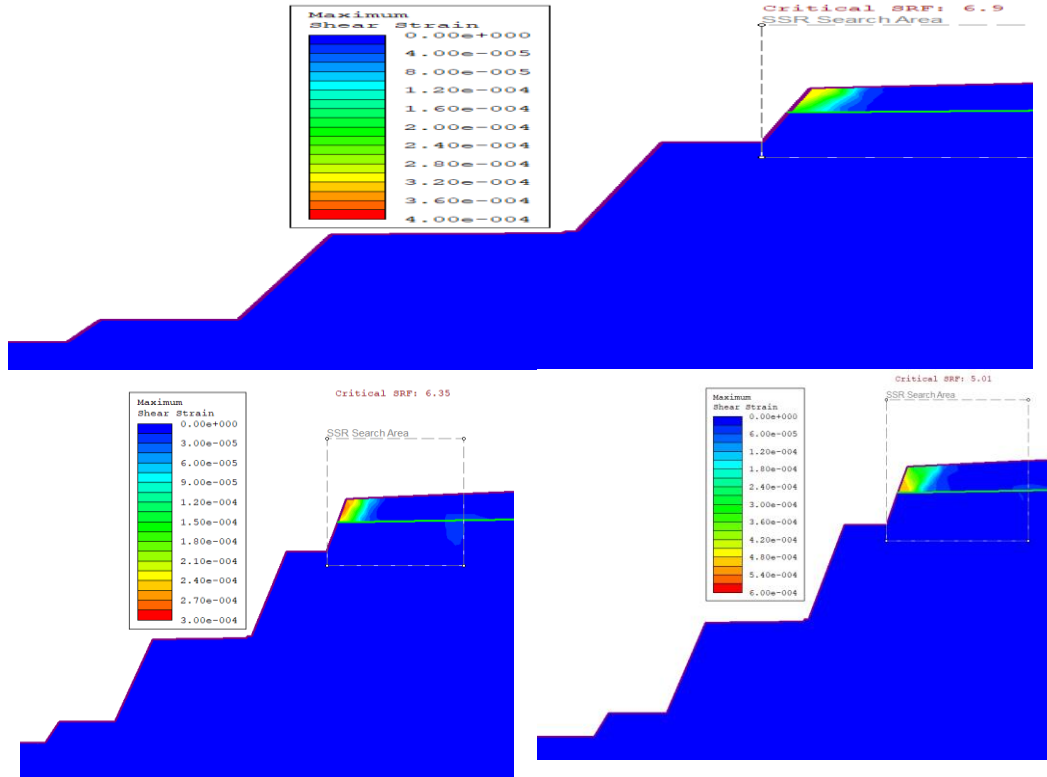


FIGURA B. 22: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch1c bajo caso estático, sismo operacional y máximo. (Phase 2.0 v8)

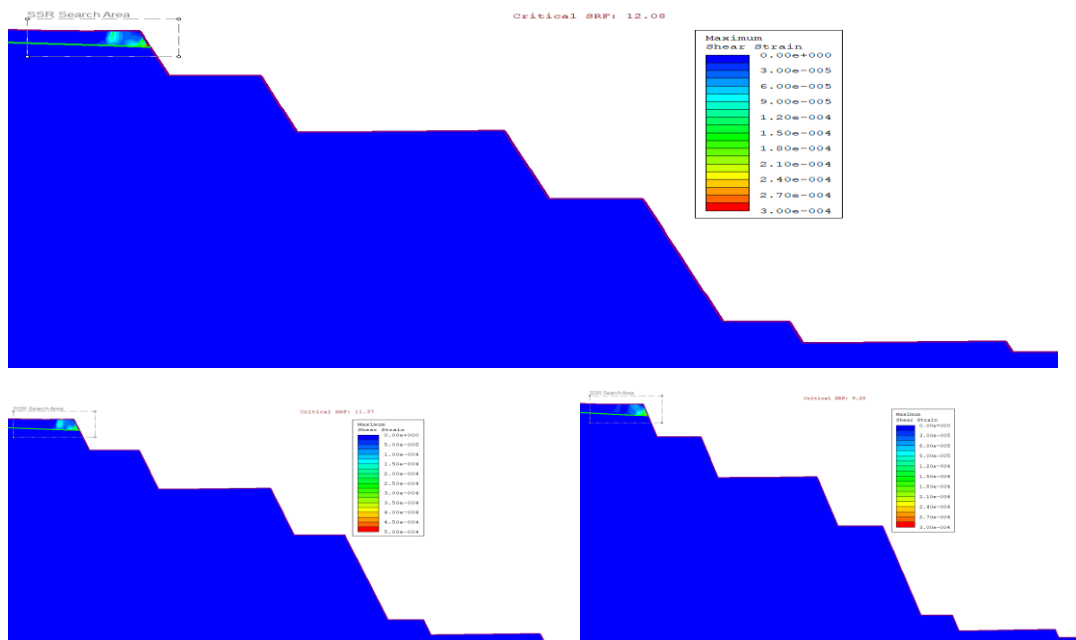


FIGURA B. 23: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch1d bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

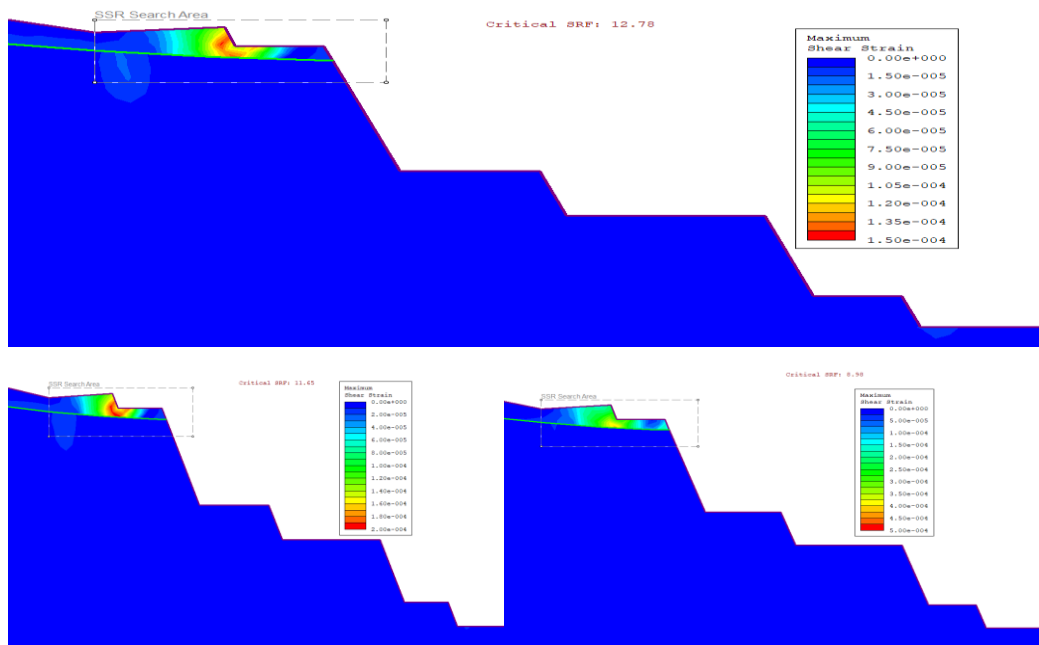


FIGURA B. 24: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch2b bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)

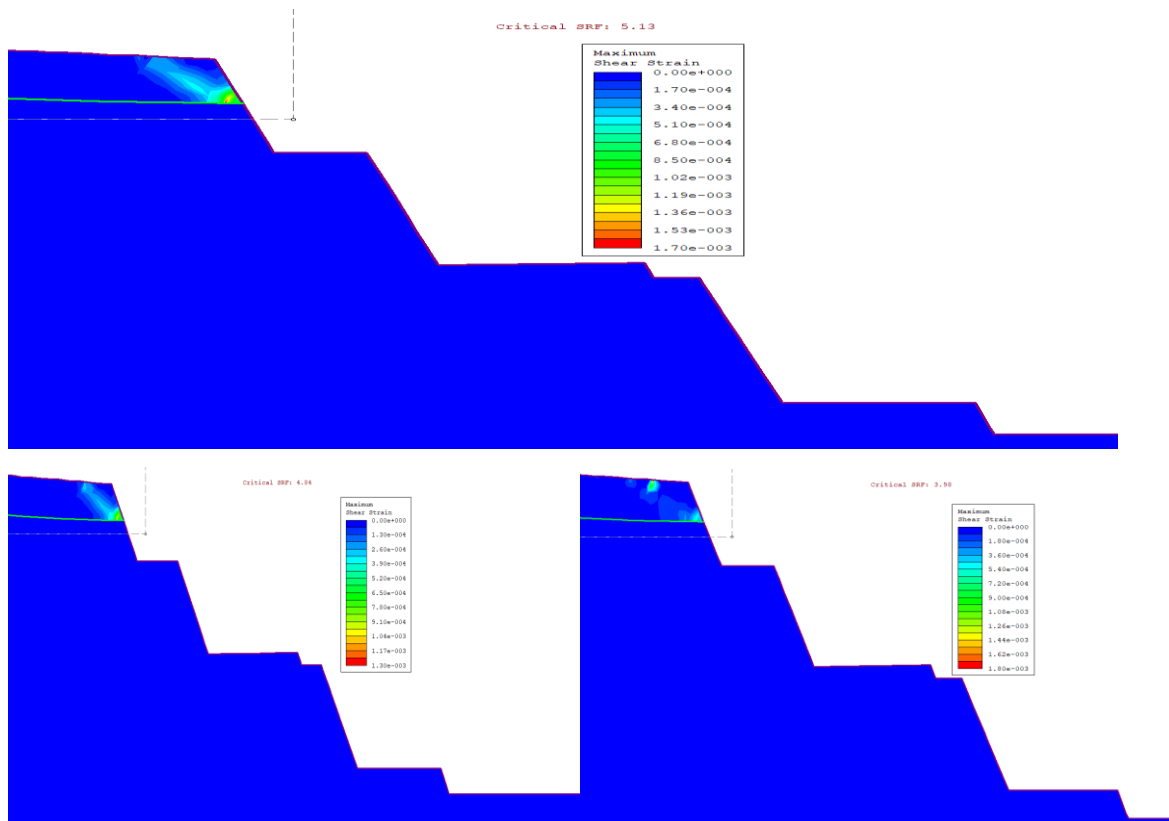


FIGURA B. 25: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, Ch2c bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)

Sector Tailandia.

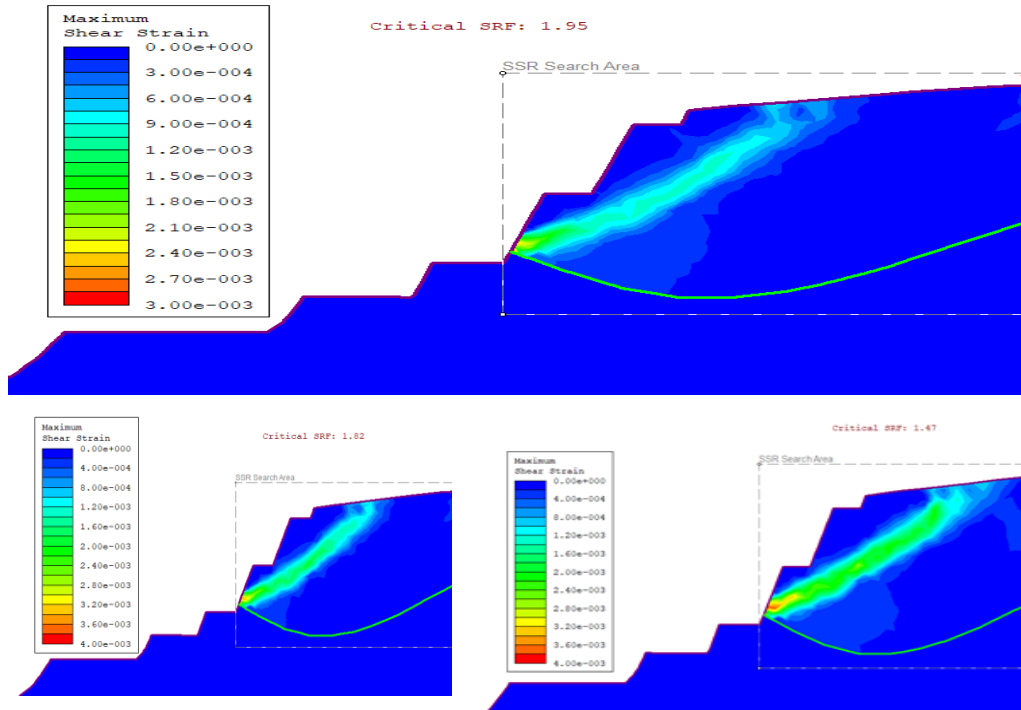


FIGURA B. 26: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, T1a bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)

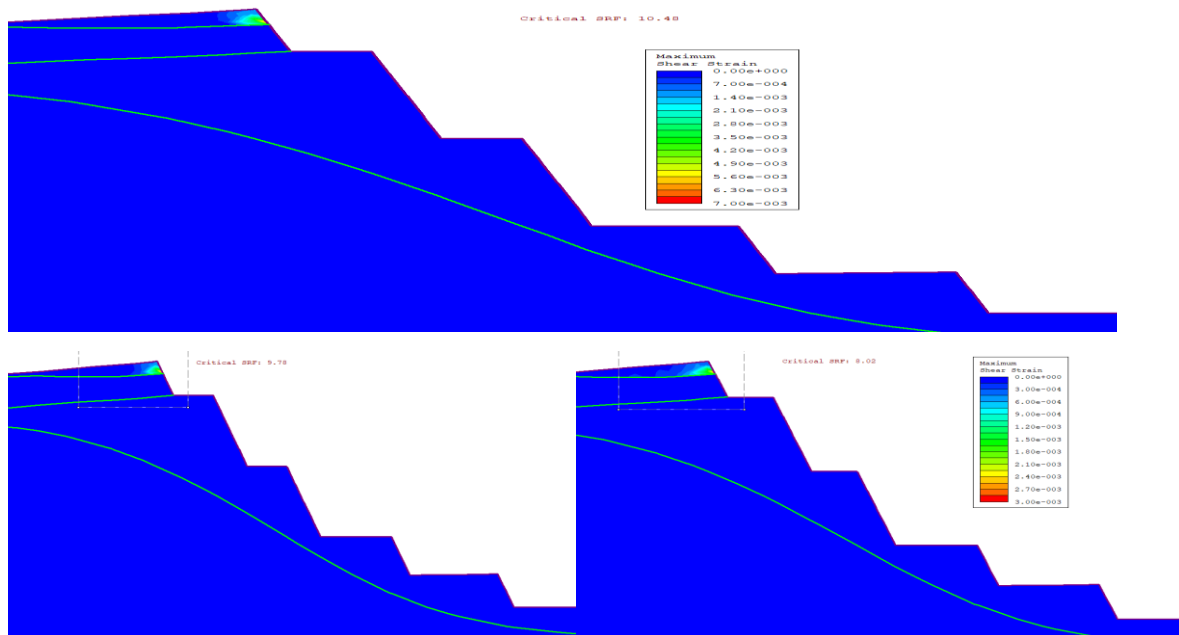


FIGURA B. 27: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, T1b bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)

ANEXO B: ANÁLISIS REALIZADOS.

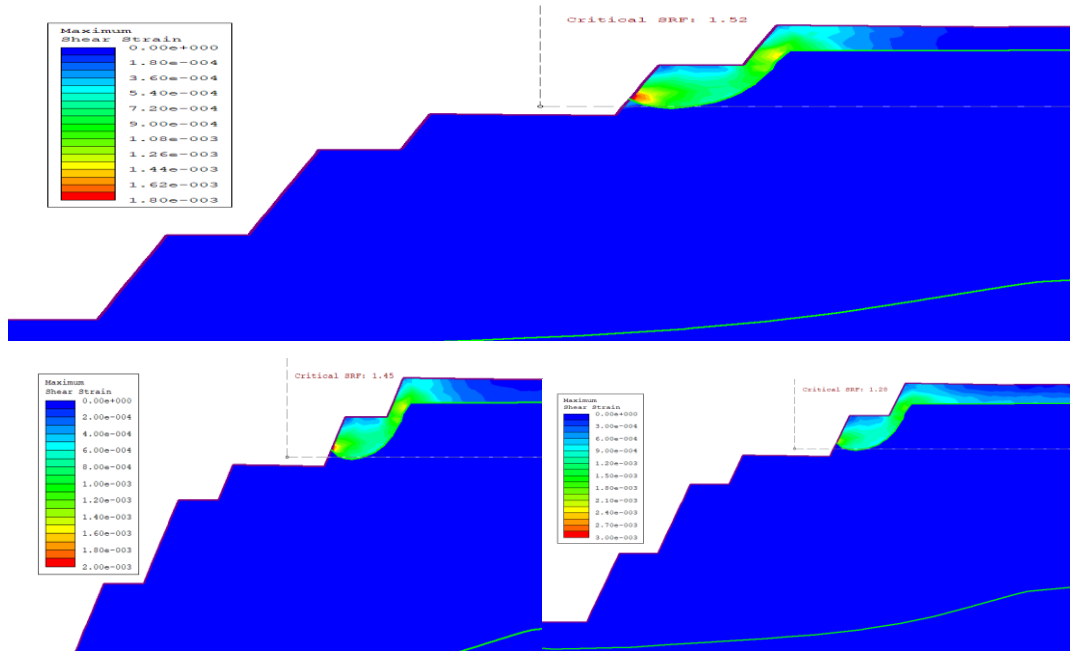


FIGURA B. 28: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, T1d bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)

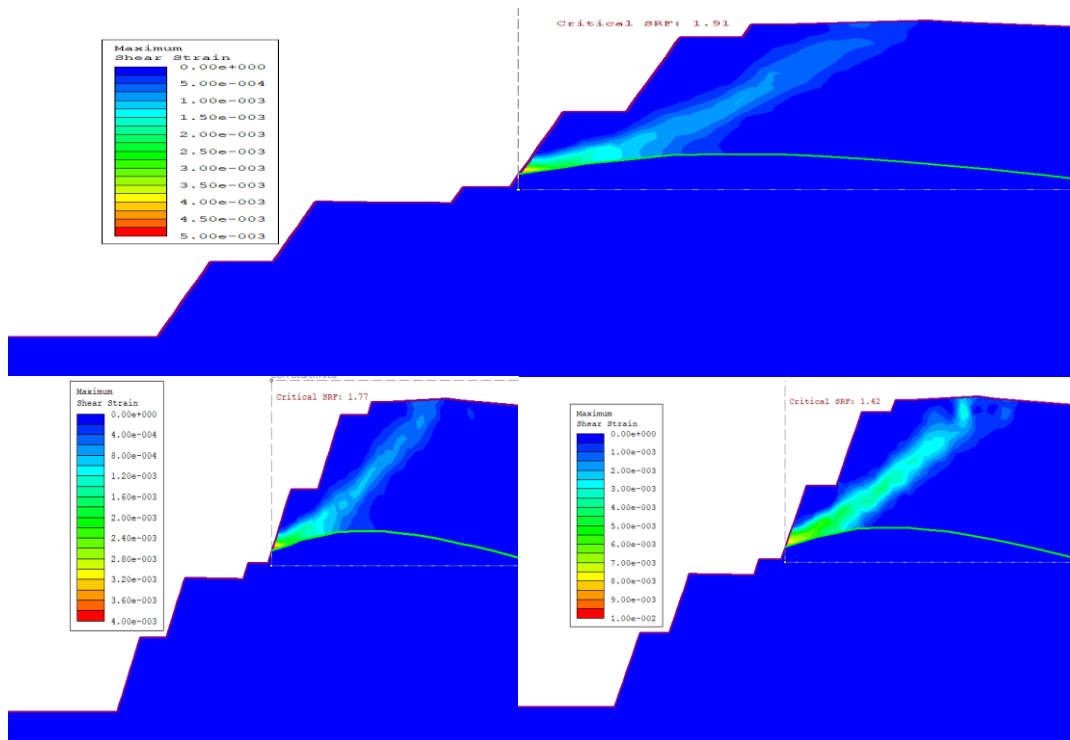


FIGURA B. 29: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, T1e bajo caso estático, sismo operacional y máximo.(Phase 2.0 v8)

Sector Japón.

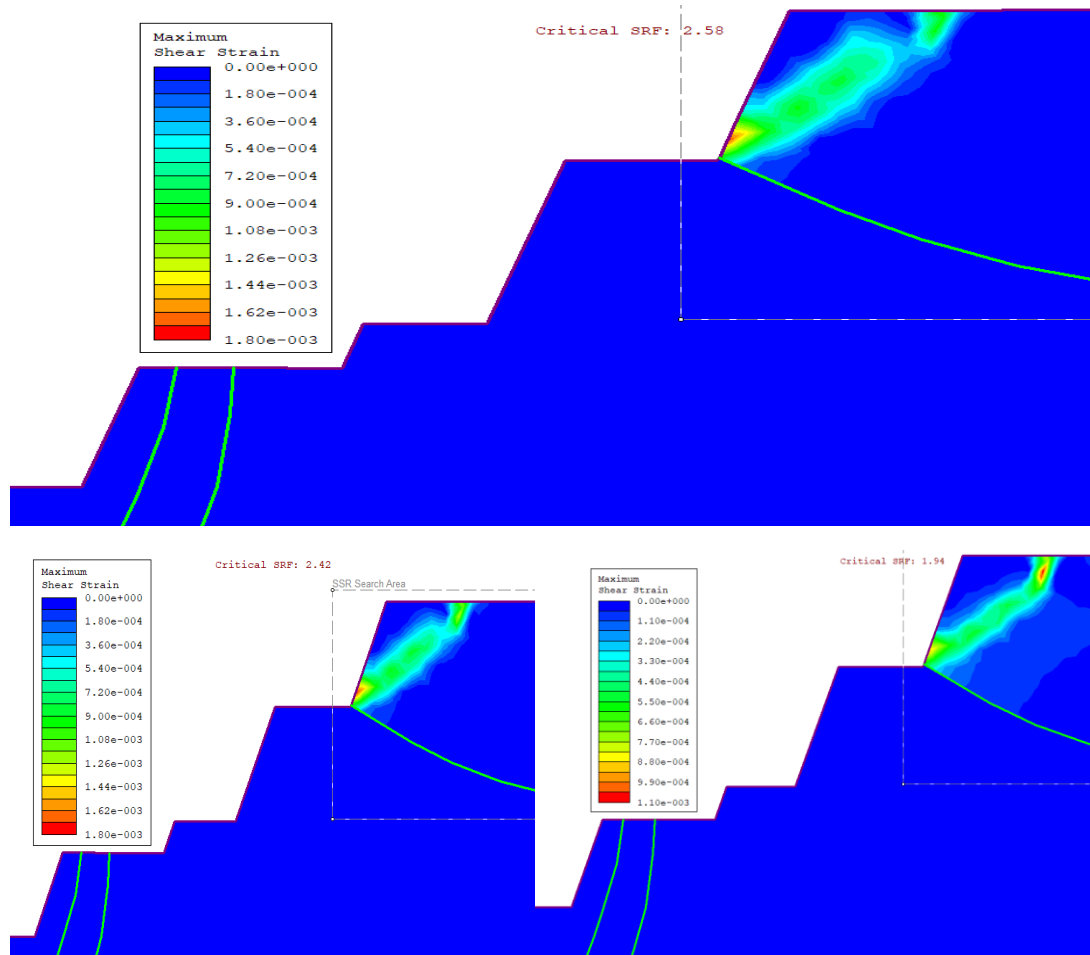


FIGURA B. 30: Evaluación tensión-deformación UG GRAVA, J1c bajo caso estático, sismo operacional y máximo. (Phase 2.0 v8)