

UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD PARA BOTADEROS DE ESTÉRIL - PROYECTO
DE CONTINUIDAD MINA GABRIELA

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS**

PROFESOR GUÍA: CLAUDIO MARTÍNEZ ESPINOZA

PROFESOR CO-GUÍA: MAURICIO JARA ORTIZ

NICOLE ANDREA DURÁN ÓRDENES

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 UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2020

AGRADECIMIENTO

Primero que todo quisiera agradecer a TYG Ltda. y Claudio Martínez por haberme dado la oportunidad de desarrollar el tema de esta memoria, como también a don Claudio por ser mi profesor guía y por el tiempo dedicado.

Quisiera también mencionar a Luis, por ser mi más multifacético apoyo a lo largo de estos seis años. Por desempeñar el papel de profesor particular cuando lo necesité hasta el papel de amigo dándome consejos cuando me desanimaba. Sin duda los mejores momentos y mejor compañía que me ha dejado esta etapa.

Por otro lado, agradecer a mi familia por todo el apoyo que me han brindado y su amor incondicional, los sacrificios que hicieron para que llegara hasta este momento. Todos aportaron su granito de arena, así que gracias infinitas.

Finalmente agradecer especialmente a mi padre, Fernando Durán, por ser mi gran ejemplo de vida, sin duda eres la persona que más admiro. Gracias por mantener siempre la confianza en mi persona. A vísperas de esas sabias palabras: “el verdadero desafío comienza ahora”, gracias por todos tus consejos y anécdotas de tu tiempo en la universidad.

RESUMEN

La evaluación de estabilidad de botaderos correspondiente al “Proyecto Continuidad Mina Gabriela” tiene como principal motivación prolongar el uso de la planta de procesos del proyecto Gabriela. Bajo esta premisa se define el objetivo principal de evaluar el diseño de los botaderos que se incluyen en el Proyecto de Continuidad Mina Gabriela. Por ende, los hitos abordados para el desarrollo del objetivo principal se desglosan en una primera instancia en determinar los sectores críticos susceptibles a falla de los botaderos Tailandia, China Sur y Japón/India. Posteriormente, mediante modelamiento numérico se identifica el plano preferente de la progresión de la falla. Para finalmente, realizar un análisis de estabilidad, por medio de equilibrio límite sobre la superficie donde ocurre una mayor deformación al corte.

La metodología desarrollada consiste, inicialmente en identificar los datos preliminares del diseño de los botaderos, esto con el fin de determinar las secciones críticas mediante criterios geométricos. Luego, estas secciones críticas se evalúan, por medio de dos métodos de cálculo correspondientes al modelamiento numérico donde se obtiene un factor comparable, la resistencia mínima de las propiedades del suelo de fundación, del botadero y la trayectoria que sigue la falla. Por otra parte, el equilibrio límite desarrolla un análisis sobre la superficie de mayor deformación al corte, integrando en este punto el resultado gráfico obtenido del modelamiento numérico. No obstante, el análisis se somete a efectos de un sismo para establecer el comportamiento de los botaderos y la estabilidad física a largo plazo. Cabe señalar que el desarrollo realizó en base a antecedentes proporcionados por la empresa, no ahondando en una caracterización desde el punto de vista geológico y geotécnico, así como tampoco se considera una redefinición de altura.

En relación con la obtención de los resultados, se integran los métodos de cálculo con el propósito de evaluar y cuantificar las reducciones de resistencias al corte, por medio del equilibrio límite sobre la superficie crítica, además de representar visualmente a la mayor deformación al corte o plano preferente de la falla. Para tal efecto, se evalúa el diseño bajo condiciones estáticas y pseudoestática, para el caso de una condición estática la sección más desfavorable presenta factores de seguridad de valor 1,84. Por otra parte, para el análisis pseudoestático se realizan dos escenarios uno de sismo operacional y otro de sismo máximo probable. Para la condición de sismo operacional se obtiene que la sección más desfavorable tiene un factor de seguridad de 1,55, mientras que para un sismo máximo probable el factor de seguridad tiene un valor de 1,29.

Se concluye que las secciones seleccionadas para cada botadero son estables, como también el comportamiento del diseño bajo condiciones estáticas y pseudoestática de evaluación. Puesto que el valor mínimo aceptado para el escenario estático es de 1,2, mientras que para un pseudoestático de 1,1 en la condición de sismo operacional y 1,0 para la condición de sismo máximo probable siendo los factores obtenidos por el modelamiento superiores, por lo tanto, se garantiza una estabilidad asociada al diseño de los botaderos. Finalmente, las recomendaciones de la presente memoria son, en análisis posteriores adicionar factores que generen un escenario de inestabilidad física como, por ejemplo: la presencia de agua.

Palabras claves: Estabilidad de botaderos, Modelamiento numérico, Equilibrio límite, Método de reducción de resistencia al corte, método de las dovelas.

ABSTRACT

In order to extend in time, the use of the Mina Gabriela's infrastructure, it has been agreed that the height of the existing dumps has to be increased and the stability of said dumps has to be verified.

Under this consideration, the main purpose of this study is to analyze the dump slopes design of the dumps Tailandia, China Sur y Japón/India that are part of said project. The first main task completed was to find the critical sections of the dumps, the second task was to model by numerical methods said critical areas, and finally to find if at all, the area involved in an instability using the limit equilibrium method, along the highest deformation occurs.

The working method was to find the data set used for the initial dump design share the critical sections found considering geometrical criteria. After that, critical sections were analyzed by conventional and numerical methods, and the safety factors resulting were compared, attending also the ground properties, the mechanical properties and the theoretical slide surface. The limit equilibrium method was completed considering the maximum deformation, and in that way the graphic results of the numerical analysis were compared with said limit equilibrium method.

In order to find the stability condition in the long term, a seismic analysis was completed, based on the data delivered by the company and no additional studies were completed from the geological and geotechnical point of view.

The methodology developed consists, initially, on identifying the preliminary data of the design of the dumps, in order to determine the critical sections by geometric criteria. After that, these critical sections are evaluated, by means of two calculation methods corresponding to conventional and numerical modeling, both delivering a safety factor, value that were compared and whose results show the minimum resistance of the ground of foundation of the dump and the trajectory that follows the failure.

In relation with the obtention of the results, the calculation methods are integrated with the purpose of evaluating and quantifying the reductions of resistance to the cut, by means of the limit of the critical surface, besides representing visually the greater deformation to the cut or plane preferential to the failure. For this purpose, the design is evaluated under static and pseudostatic conditions, for the case of a static condition, the most unfavorable section presents the safety factors of the value 1.84. On the other hand, for the pseudostatic analysis, an operational seism scenario and a probable maximum earthquake scenario was performed. For the operational seism condition, it is obtained that the most unfavorable section has a safety factor of 1.55, while for a probable maximum seism, the safety factor has a value of 1.29.

It is concluded that the sections selected for each dump are stable, as well as the design behavior under the static and pseudostatic evaluation condition, since the minimum accepted value for the static scenario is 1.2, while for a pseudostatic of 1.1 it is the condition of an

operational earthquake and 1.0 for the earthquake condition is likely to be greater than the effects obtained by superior modeling, therefore, long term stability is expected.

Finally, the recommendations after this work consider that a specific analysis under saturated conditions should be added to the analysis.

Key words: Dumps stability, Numerical Modeling, Limit Equilibrium, Shear Strength Reduction (SSR), Method of the Voussoirs

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.....	1
1.2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.3	SOLUCIÓN PROPUESTA	2
1.4	OBJETIVOS	2
1.4.1	Objetivo general.....	2
1.4.2	Objetivos específicos	2
1.5	ALCANCES	2
1.6	METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS	3
1.7	RESULTADOS ESPERADOS	3
1.8	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	3
1.8.1	Antecedentes teóricos.....	3
1.8.2	Antecedentes generales	4
1.8.3	Metodología propuesta	4
1.8.4	Resultados	4
1.8.5	Conclusiones.....	4
2	ANTECEDENTES TEÓRICOS	5
2.1	INTRODUCCIÓN	5
2.2	BOTADERO DE ESTÉRILES MINEROS	7
2.3	FALLAS SIN CONTROL ESTRUCTURAL	7
2.3.1	Caída de Rocas.....	7
2.3.2	Falla Circular	7
2.3.3	Falla no Circular.....	8
2.4	FACTOR DE SEGURIDAD.....	9
2.4.1	Criterio de aceptabilidad	9
2.5	PROBABILIDAD DE FALLA	10
2.5.1	Criterios de aceptabilidad	10
2.6	ANÁLISIS SÍSMICO	11
2.7	CALCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES.....	12
2.8	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	14

2.8.1	Métodos de Equilibrio Límite.....	15
2.8.2	Métodos numéricos	21
3	ANTECEDENTES GENERALES.....	25
3.1	PROYECTO CONTINUIDAD MINA GABRIELA	25
3.2	UBICACIÓN Y ACCESO AL ÁREA	25
3.3	GEOLOGÍA.....	27
3.4	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	29
3.5	DEPÓSITOS DEL SUELO DE FUNDACIÓN.....	30
4	METODOLOGÍA PROPUESTA	33
4.1	INTRODUCCIÓN	33
4.2	MÉTODOS DE ANÁLISIS	34
4.2.1	Análisis estático.....	34
4.2.2	Análisis pseudoestático sismo operacional.....	34
4.2.3	Análisis pseudoestático sismo máximo	35
4.3	PERFILES SELECCIONADOS	35
4.3.1	Botadero China Sur	35
4.3.2	Botadero Japón/India	36
4.3.3	Botadero Tailandia	37
4.4	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	39
4.5	CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD	41
4.6	SISMICIDAD.....	42
5	RESULTADOS.....	43
5.1	Modelamiento numérico	43
5.2	Método de equilibrio limite	55
6	CONCLUSIONES.....	69
7	REFERENCIAS	73
8	ANEXOS.....	74
8.1	ANEXO A.....	74
8.2	ANEXO B.....	77
8.3	ANEXO C.....	80
8.4	ANEXO D.....	83
8.5	ANEXO E.....	85

8.6	ANEXO F	87
8.7	ANEXO G	89
8.8	ANEXO H	91
8.9	ANEXO I	94
8.10	ANEXO J	96
8.11	ANEXO K	98
8.12	ANEXO L	100
8.13	ANEXO M	102
8.14	ANEXO N	103
8.15	ANEXO Ñ	104

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 2.1: Clasificación de taludes.....	6
Figura 2.2: Casos que requieren análisis de estabilidad de taludes (L., 2009).....	6
Figura 2.3: Proyección estereográfica de rotura rotacional (Lopez, 2016).....	8
Figura 2.4: Esquema de falla rotacional no circular. (SERNAGEOMIN, 2018).....	8
Figura 2.5: Formulación del método pseudoestático.....	12
Figura 2.6: Esquema métodos de cálculo para estabilidad de taludes.....	13
Figura 2.7: Fuerzas actuando sobre una superficie de rotura en talud (Luis I. González de Vallejos, 2004).....	17
Figura 2.8: Formulación del método de Bishop simplificado (Véliz).....	18
Figura 2.9: Formulación del método de Jabu (Véliz).....	20
Figura 2.10: Formulación del método de Morgenstern-Price (Véliz).....	21
Figura 2.11: Desarrollo del método de elementos finitos (Brady, 2004).....	22
Figura 2.12: Envoltorio de falla según criterio de Mohr-Coulomb (Dawson et al., 1999). 23	23
Figura 3.1: Ubicación PCMG.....	26
Figura 3.2: Localización de las concesiones de PCMG en la carta geológica general.....	27
Figura 3.3: Mapa de la geología distrital.....	28
Figura 3.4: Carta Altamira (Servicio Nacional de Geología y Minería).....	29
Figura 3.5: Geología de la roca basal, Botadero China Sur.....	31
Figura 3.6: Geología de la roca basal, Botadero Tailandia.....	32
Figura 4.1: Etapas para realizar un estudio de estabilidad de taludes.....	33
Figura 4.2: Esquema general de metodología propuesta.....	34
Figura 4.3: Imagen representativa del Botadero China Sur, donde se muestran las secciones evaluadas.....	36
Figura 4.4: Imagen representativa del Botadero Japón/India, donde se muestran las secciones evaluadas.....	37
Figura 4.5: Imagen representativa del Botadero Tailandia, donde se muestran las secciones evaluadas.....	38
Figura 4.6: Identificación de los materiales correspondientes a la Sección A del Botadero China Sur (Software Phase2).....	39
Figura 4.7: Identificación de los materiales correspondientes a la Sección D del Botadero Japón/India (Software Phase2).....	40
Figura 4.8: Identificación de los materiales correspondientes a la Sección G del Botadero Tailandia (Software Phase2).....	40
Figura 4.9: Coeficiente sísmico correspondiente a PCMG.....	42
Figura 5.1: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección A del Botadero China Sur.....	43
Figura 5.2: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección A.....	44
Figura 5.3: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección B del Botadero China Sur.....	45
Figura 5.4: Gráfico de comportamiento entre el SRF crítico y el desplazamiento máximo para la Sección B.....	45

Figura 5.5: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección C del Botadero China Sur	46
Figura 5.6: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección C.....	47
Figura 5.7: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección D del Botadero Japón/India	48
Figura 5.8: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección D	48
Figura 5.9: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección E del Botadero Japón/India	49
Figura 5.10: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección E.....	50
Figura 5.11: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección F del Botadero Japón/India	50
Figura 5.12: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección F.....	51
Figura 5.13: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección G del Botadero Tailandia	52
Figura 5.14: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección G	52
Figura 5.15: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección H del Botadero Tailandia	53
Figura 5.16: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento para la Sección H	54
Figura 5.17: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección A del Botadero China Sur.....	55
Figura 5.18: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección A del Botadero China Sur	55
Figura 5.19: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección A del Botadero China Sur.....	56
Figura 5.20: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección B del Botadero China Sur.....	56
Figura 5.21: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección B del Botadero China Sur	57
Figura 5.22: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección B del Botadero China Sur	57
Figura 5.23: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección C del Botadero China Sur.....	58
Figura 5.24: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección C del Botadero China Sur	58
Figura 5.25: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección C del Botadero China Sur	59

Figura 5.26: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección D del Botadero Japón/India	59
Figura 5.27: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección D del Botadero Japón/India.....	60
Figura 5.28: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección D del Botadero Japón/India	60
Figura 5.29: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección E del Botadero Japón/India	61
Figura 5.30: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección E del Botadero Japón/India.....	61
Figura 5.31: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección E del Botadero Japón/India	62
Figura 5.32: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección F del Botadero Japón/India	62
Figura 5.33: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección F del Botadero Japón/India.....	63
Figura 5.34: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección F del Botadero Japón/India	63
Figura 5.35: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección G del Botadero Tailandia.....	64
Figura 5.36: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección G del Botadero Tailandia	64
Figura 5.37: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección G del Botadero Tailandia.....	65
Figura 5.38: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección H del Botadero Tailandia.....	65
Figura 5.39: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección H del Botadero Tailandia	66
Figura 5.40: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección H del Botadero Tailandia.....	66
Figura 5.41: Factor de seguridad para condición estática	67
Figura 5.42: Factor de seguridad para condición sismo operacional.....	67
Figura 5.43: Factor de seguridad para condición sismo máximo probable.....	68
Figura 6.1: Factor de Seguridad para condición estática	70
Figura 6.2: Factor de Seguridad para condición sismo operacional	70
Figura 6.3: Factor de Seguridad para condición de sismo máximo probable	71
Figura 6.4: Comparación condición estática y pseudoestática	71
Figura 6.5: Comparación factores asociados a métodos de análisis	72
Figura 8.1: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección A con un SRF 1,83	74
Figura 8.2: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección A con un SRF 1,84	74
Figura 8.3: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección B con un SRF 2,46	77
Figura 8.4: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección B con un SRF 2,51	77
Figura 8.5: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección B con un SRF 2,52	78

Figura 8.6: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección C con un SRF 2,44	80
Figura 8.7: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección C con un SRF 2,5 ..	80
Figura 8.8: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección D con un SRF 1,74	83
Figura 8.9: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección D con un SRF 1,75	83
Figura 8.10: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección E con un SRF 2,1	85
Figura 8.11: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección E con un SRF 2,11	85
Figura 8.12: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección F con un SRF 1,9187	85
Figura 8.13: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección F con un SRF 1,9287	85
Figura 8.14: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección G con un SRF 1,8	89
Figura 8.15: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección G con un SRF 1,81	89
Figura 8.16: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección H con un SRF 1,95	91
Figura 8.17: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección H con un SRF 1,96	91
Figura 8.18: Resultado análisis estático mediante método de Bishop	96
Figura 8.19: Resultado análisis estático mediante método Janbu	96
Figura 8.20: Resultado análisis estático mediante método Spencer	97
Figura 8.21: Resultado análisis estático mediante método GLE	97
Figura 8.22: Resultado análisis sismo operacional mediante método Bishop	98
Figura 8.23: Resultado análisis sismo operacional mediante método Janbu	98
Figura 8.24: Resultado análisis sismo operacional mediante método Spencer	99
Figura 8.25: Resultado análisis sismo operacional mediante método GLE	99
Figura 8.26: Resultado análisis sismo máximo probable mediante método Bishop	100
Figura 8.27: Resultado análisis sismo máximo probable mediante método Janbu	100
Figura 8.28: Resultado análisis sismo máximo probable mediante método Spencer	101
Figura 8.29: Resultado análisis sismo máximo probable mediante método GLE	101
Figura 8.30: Mapa zonas (F. Leyton, 2009)	103
Figura 8.31: Periodo de retorno para la zona de PCMG	105
Figura 8.32: Aceleración para PCGM	106

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 2.1: Principales causas de inestabilidad	5
Tabla 2.2: Criterios de aceptabilidad de Factor de Seguridad en botaderos (Hustrulid).	9
Tabla 2.3: Criterio de aceptabilidad de probabilidad de falla en botadero (Hustrulid)	11
Tabla 4.1: Características geométricas Botadero China Sur	35
Tabla 4.2: Características geométricas Botadero Japón/India.....	36
Tabla 4.3: Características geométricas Botadero Tailandia	37
Tabla 4.4: Parámetros Geotécnicos	39
Tabla 4.5: Criterio de aceptabilidad de Factor de Seguridad para botaderos.....	41
Tabla 4.6: Criterios de aceptabilidad de Probabilidad de Falla para botaderos	41
Tabla 4.7: Resultado coeficiente sísmico correspondiente PCMG	42
Tabla 5.1: Propiedades de resistencia reducidas para SRF critico de la Sección A	44
Tabla 5.2: Propiedades de resistencia reducidas para SRF critico de la Sección B	45
Tabla 5.3: Propiedades de resistencia reducidas para SRF critico de la Sección C	47
Tabla 5.4: Propiedades de resistencia reducidas para SRF critico de la Sección D	49
Tabla 5.5: Propiedades de resistencia reducidas para SRF critico de la Sección E.....	50
Tabla 5.6: Propiedades de resistencia reducidas para SRF critico de la Sección F.....	51
Tabla 5.7: Propiedades de resistencia reducidas para SRF critico de la Sección G	53
Tabla 5.8: Propiedades de resistencia reducidas para SRF critico de la Sección H	54
Tabla 8.1: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección A	74
Tabla 8.2: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección B.....	78
Tabla 8.3: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección C.....	80
Tabla 8.4: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección D	83
Tabla 8.5: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección E.....	85
Tabla 8.6: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección F	87
Tabla 8.7: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección G	89
Tabla 8.8: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección H	91
Tabla 8.9: Resultado análisis de estabilidad estático.....	94
Tabla 8.10: Resultado análisis de estabilidad sismo operacional.....	94
Tabla 8.11: Resultado de análisis de estabilidad sismo máximo probable	95
Tabla 8.12: Distribución de sismo corresponde a la zona de PCMG	102
Tabla 8.13: Valores de a y b correspondiente para las zonas estudiadas.....	103

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

La estabilidad física de las instalaciones mineras es parte fundamental de los aspectos que la industria debe abordar, dado el alto impacto que generan las consecuencias de los incidentes derivados de su mala gestión, con altos índices de pérdidas económicas para las empresas, un alto nivel de efecto sobre el medio ambiente y, lo que es peor, gran capacidad de generar pérdida de vidas humanas. La estabilidad física adquiere mayor relevancia cuando se trata de instalaciones mineras “remanentes”, que al término de la ejecución de las operaciones se mantendrán en el lugar de manera indefinida. Por tanto, es necesario lograr que la estabilidad física sea asegurada a largo plazo para dichas instalaciones. (SERNAGEOMIN, 2018)

En la actualidad, la industria Extractiva Minera Nacional se encuentra regulada por la Ley Sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 19.300; la Ley que Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras (Ley 20.551), que entró en vigencia el año 2012, en conjunto con su Reglamento, Decreto N° 41 y la Ley 20.819 que modifica la Ley 20.551, que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras e introduce otras modificaciones legales, entre otras.

El problema que se aborda en el Proyecto Continuidad Mina Gabriela (PCMG), tiene por objetivo prolongar el uso de la planta de procesos del proyecto Gabriela, sin aumentar la capacidad de su producción, para lo cual se operarán nuevos rajos y depósitos de estéril y se recibirán minerales de terceros, en remplazo del mineral que se ha obtenido desde los rajos Gabriela y China.

En base a la normativa que actualmente se rige para la estabilidad física, que corresponde a la normativa de cierre y que se explicita que debe ser concebida y planificada en etapas tempranas del proyecto, surge la motivación para la evaluación de los botaderos correspondiente a PCGM, con el efecto de asegurar la estabilidad física en sus etapas de cierre y post-cierre de la expansión del proyecto Gabriela, la cual engloba 3 botaderos correspondientes a China Sur, Japón/India y Tailandia que se construirán para su continuidad. Los métodos para calcular y analizar su estabilidad se desarrollan a través del modelamiento numérico y el equilibrio límite, que tienen la misión de entregar las herramientas necesarias para determinar la estabilidad física de los botaderos de acuerdo a los criterios que establecen las normativas.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La estabilidad de taludes constituye, el problema principal en la concepción y diseño de minas a cielo abierto y/o botaderos, tanto desde el punto de vista económico como de seguridad. PCMG para realizar su expansión operacional pretende la construcción de 3 depósitos de estéril, que requieren de una evaluación de estabilidad para corroborar que sean aprobados para llevarlos a cabos en una siguiente fase.

1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta al tema de interés es evaluar la estabilidad de los botaderos mediante modelamiento numérico y método de equilibrio límite. Con la obtención de los resultados de ambas evaluaciones, se tendrá los Factores de Seguridad correspondiente a cada sección crítica evaluada para distintas condiciones de análisis sísmico y así evaluar el riesgo asociado para cada caso.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

- Evaluar la estabilidad del diseño de los botaderos que comprende el Proyecto de Continuidad Mina Gabriela.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar los sectores de los botaderos Tailandia, China Sur y Japón/India que presenten susceptibilidad a falla o ruptura, considerando la geometría y las características de los materiales involucrados.
- Identificar el plano preferente de la progresión de la falla a lo largo de la pendiente.
- Determinar los Factores de Seguridad, para cada uno de los perfiles evaluados de los botaderos, de forma estática y pseudoestática.

1.5 ALCANCES

Con la finalidad de mantener la confidencialidad de la empresa y la protección de su información, la presente memoria reemplazará el nombre real del Proyecto a “Proyecto Continuidad Mina Gabriela” o PCMG y el estudio está bajo la protección de datos por medio de la empresa de consultoría geomecánica Tecnología y Geociencias LTDA.

Para desarrollar la evaluación de estabilidad, se considera inicialmente la identificación de datos preliminares entregados por la empresa a cargo del proyecto los que corresponden esencialmente al diseño de los botaderos, por ende, en un análisis del diseño se determina las zonas más críticas de acuerdo a criterios de configuración geométricos establecidos, lo que conlleva la obtención de secciones críticas que se analizarán para obtener como resultado final si es estable bajo los criterios que rigen las normativas de Sernageomin.

Otros aspectos que se abarcan en esta evaluación de estabilidad física corresponden a los métodos por los cuales se analiza las zonas que se consideran críticas. Fundamentalmente, se desarrolla bajo el modelamiento numérico el cual aplica método de reducción de resistencias al corte (elementos finitos), que se obtiene el plano preferente de la falla. Y posterior ser analizado bajo métodos de equilibrio límite (métodos de las dovelas), donde se pretende analizar esta superficie preferente de la falla o deformación al corte y obtener un factor más certero, esto debido a que los programas de equilibrio límite por default analizan fallas circulares, pero en esta ocasión se ingresará la trayectoria de la falla obtenida del plano preferente de la falla.

Como énfasis, bajo las normativas y debido a que Chile es un país sísmico, las consideraciones sísmicas que repercuten en la evaluación, se realizará en el análisis de

equilibrio limite se considera condiciones estáticas y pseudoestática esta última tanto para un sismo operacional y sismo máximo probables (cierre y post-cierre)

Los datos utilizados para el análisis de estabilidad, como lo son la caracterización del terreno de cimentación desde el punto de vista geológico y geotécnico, la estimación de las propiedades físicas del suelo de fundación, la estimación de las propiedades físicas de los materiales que se depositarán en el botadero, son en base a antecedentes proporcionados por la empresa de consultoría geomecánica Tecnología y Geociencias LTDA.

Se evaluarán de las condiciones sísmicas del área de estudio en bases a antecedentes de la zona.

1.6 METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Para un análisis de estabilidad es necesario identificar las zonas críticas de los botaderos que presenten una mayor susceptibilidad a la falla, para una posterior caracterización de las propiedades que conforman cada perfil que requiere el análisis.

Para la evaluación del comportamiento tenso-deformación de los botaderos PCMG se realiza mediante el software Phase2 que, mediante el método de reducción de la resistencia de corte, tiene la capacidad de trazar la deformación máxima frente a un factor de reducción de resistencia. Además, la tensión máxima de corte indicará donde se produce el deslizamiento.

Para determinar los factores de seguridad de los botaderos diseñados para el Proyecto de Continuidad Mina Gabriela se evalúan secciones críticas, mediante el software de modelamiento por equilibrio limite, Slide 5.0, tanto para su condición estática y pseudoestática (sismo operacional y sismo máximo probable).

Para esta evaluación se considera el diseño final del botadero, y la estabilidad global del mismo.

1.7 RESULTADOS ESPERADOS

Los resultados que se esperan de la evaluación de estabilidad correspondientes a los botaderos China Sur, Japón/India y Tailandia de PCMG, es evaluar el método de reducción de resistencia al corte (SSR) lo que permite un análisis a través de elementos finitos y la obtención de un plano preferente de donde se produce la progresión de la falla a lo largo de su pendiente a medida que se reduce su resistencia al corte.

Para la obtención de los factores de seguridad que determinan si los botaderos son estables o no, el cálculo será producto de métodos de equilibrio limite y se podrá analizar el comportamiento sísmico que incide en los botaderos. En consecuencia, el riesgo que presenta para áreas adyacentes se define mediante el análisis de casos estático y pseudoestático y sus factores de seguridad asociados respectivamente.

1.8 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

1.8.1 Antecedentes teóricos

Se describe los antecedentes teóricos que engloba un análisis de estabilidad, iniciando con los tipos de fallas que pueden incurrir en botaderos de estéril. Posterior se hace alusión a los

métodos de cálculos para obtener factores de seguridad, los cuales se dividen en los modelos numéricos y los de equilibrio límite. Finalmente, se detalla los métodos por los que obtendrán los factores de seguridad a través del equilibrio límite y por otro lado se detalla el tópico de reducción de la resistencia al corte correspondiente a modelamiento numérico.

1.8.2 Antecedentes generales

el contenido correspondiente al apartado, se detalla los antecedentes generales del Proyecto Continuidad Mina Gabriela, en los que cuales se observa su ubicación, la geología correspondiente a la zona donde se construirá y mapas donde se presentan las unidades geológicas.

1.8.3 Metodología propuesta

El desarrollo de la metodología propuesta tiene como objetivo identificar los pasos para desarrollar la evaluación de los botaderos China Sur, Japón/India y Tailandia. Donde se determina las secciones críticas basado en la configuración geométrica de los botaderos. Además de definir los criterios de aceptabilidad tanto para los factores de seguridad y Probabilidad de falla en condiciones estáticas y pseudoestáticas. Posterior, también se detalla la caracterización del suelo de fundaciones. Para finalmente, determinar los coeficientes sísmicos con los que se evaluarán los botaderos para establecer su estabilidad física.

1.8.4 Resultados

El apartado de resultados se divide en dos áreas. La primera, detalla los resultados obtenidos para los botaderos China Sur, Japón/India y Tailandia, a través del modelamiento numérico. Resultados correspondientes al plano preferente de la falla, factor crítico asociado a la reducción de resistencia, y valores mínimos que toman la cohesión y ángulo de fricción. La segunda parte detalla como al analizar mediante equilibrio límite la progresión de la falla se obtienen factores de seguridad según Bishop, Janbu, Spencer y Gle. Finalmente, el análisis se realiza bajo las condiciones estáticas y pseudoestáticas.

1.8.5 Conclusiones

Finalmente, se realiza las conclusiones basado en los resultados obtenidos, donde se determina que las secciones correspondientes a los botaderos China Sur, Japón/India y Tailandia son estables en condiciones estáticas y pseudoestáticas. También, se realiza una breve recomendación basado en estudios similares.

2 ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 INTRODUCCIÓN

Los análisis de estabilidad permiten diseñar los taludes, mediante el cálculo de su factor de seguridad, y definir el tipo de medidas correctoras o estabilizadores que deben ser aplicadas en caso de roturas reales o potenciales. Es necesario el conocimiento geológico y geomecánico de los materiales que forman el talud, de los posibles modelos o mecanismos de rotura que pueden tener lugar y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades (Luis I. González de Vallejos, 2004).

De acuerdo con las causas que producen la inestabilidad, esta se produce cuando la resistencia al corte del suelo es excedida por los esfuerzos al corte que se originan en una superficie relativamente continua. En la Tabla 2.1 se identifican las principales causas de inestabilidad y la que predomina en la presente evaluación son aspectos de reducción de la resistencia, ya que se trata de instalaciones mineras “remanentes”, que al término de la ejecución de las operaciones se mantendrán en el lugar de manera indefinida por lo que se encuentra sujeto a sismos severos durante su etapa de operación, cierre y post-cierre. Por lo tanto, un evento sísmico puede perturbar su condición estática, generando eventualmente un escenario de inestabilidad.

Tabla 2.1: Principales causas de inestabilidad

Causas que producen aumento de esfuerzos	Causas que producen disminución de la resistencia
<ul style="list-style-type: none">• Cargas externas como edificios, agua o nieve.• Aumento del peso de la tierra por aumento de la humedad.• Remoción por excavación de parte de la masa de tierra.• Presión de agua en las grietas de tracción.	<ul style="list-style-type: none">• Presión de agua intersticial.• Destrucción de la estructura del suelo por vibraciones o actividad sísmica.• Deterioro del material cementante.• Pérdida de la tensión capilar por secamiento.

Si bien, los taludes son el resultado de la acción de agentes naturales o de la acción del hombre. De acuerdo con su naturaleza, se pueden clasificar en naturales o artificiales como se observan en la Figura 2.1.

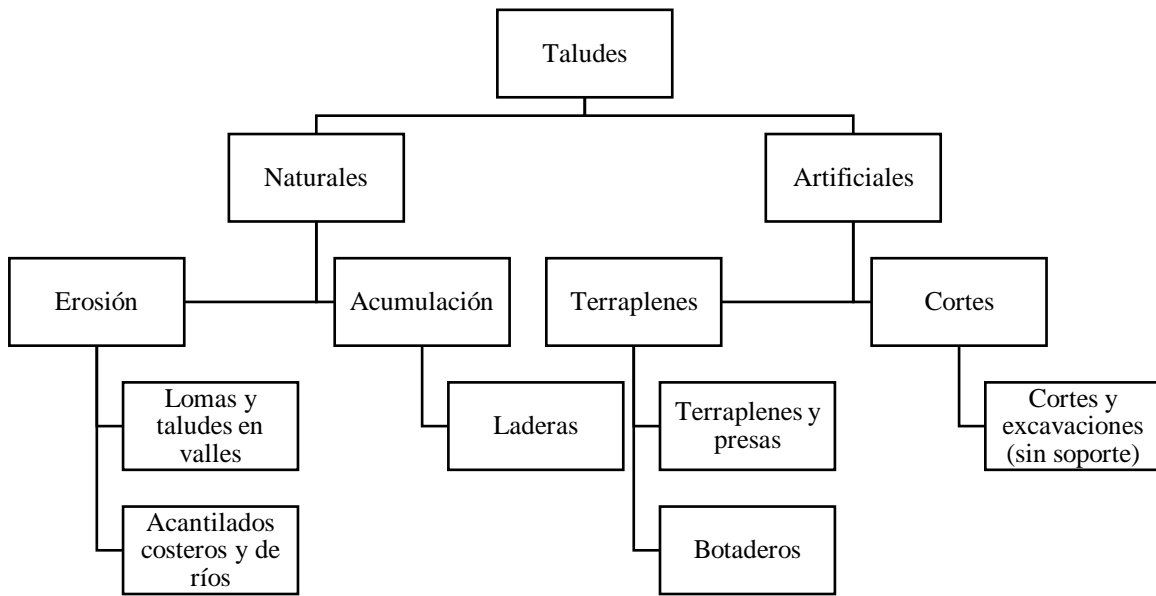


Figura 2.1: Clasificación de taludes

En la Figura 2.2 se observa los diferentes casos en los que existe análisis de estabilidad de taludes, de gran importancia en el área de ingeniería civil y geotécnica.

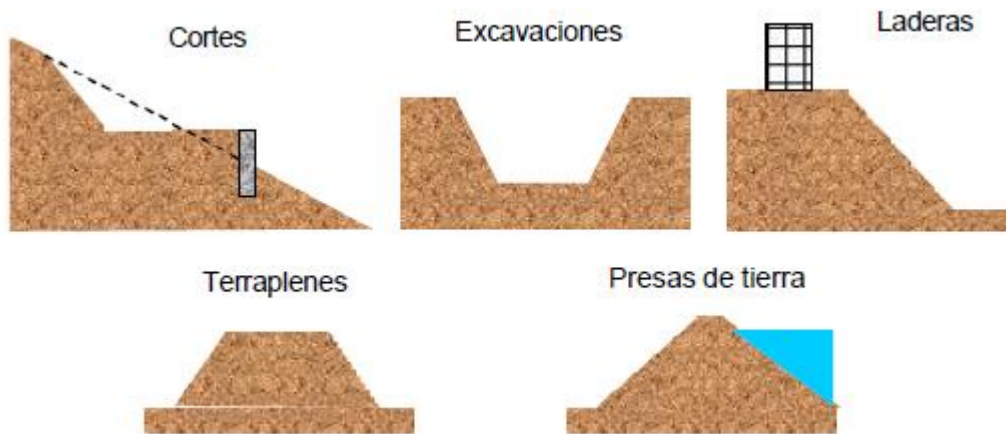


Figura 2.2: Casos que requieren análisis de estabilidad de taludes (L., 2009)

Se presenta una revisión general de los tipos de fallas probables en un talud: cuando esta se encuentra dominada por las estructuras (con control estructural) y cuando no es posible determinar la familia de discontinuidades que determinaría el modo de falla (sin control estructural) (Cárdenas, 2009).

2.2 BOTADERO DE ESTÉRILES MINEROS

Para el análisis de los mecanismos de falla definidos para botaderos de estériles mineros (BEM), incluye los siguientes tipos de residuos mineros:

- Botadero de estériles mineros (BEM): estériles mineros, baja ley, marinas/desmontes y escorias.

Según McLemore et al. (2009) una falla en este tipo de botaderos o depósitos corresponde al deslizamiento no controlado o imprevisto del material más allá de los límites de este. En general, la mayoría de las fallas son generadas por acciones perturbadoras, las que pueden describirse de la siguiente manera:

- Eventos súbitos, intensos o extremos: flujos, terremotos, actividad volcánica y glaciaciones, que generan solicitaciones mayores a las consideradas en el diseño del botadero.
- Acciones lentas, pero perpetuas como la erosión del viento y del agua, la acción de las heladas, otras formas de meteorización y descomposición, reacciones químicas y biológicas (intrusión de raíces, animales y el hombre).

Las fallas por eventos súbitos, intensos o extremos incluyen: flujos (Flow Slide), fallas de fundación e inestabilidades de borde o de taludes. (SERNAGEOMIN, 2018)

2.3 FALLAS SIN CONTROL ESTRUCTURAL

2.3.1 Caída de Rocas

Es el tipo de falla más simple, y sucede cuando una roca suelta, o varias, se movilizan producto de una pequeña perturbación que hace cambiar su estado desde reposo a movimiento, rodando por el talud hasta quedar detenida.

2.3.2 Falla Circular

También conocida como deslizamiento o rotura rotacional, es producida por muchos sets de fallas, las cuales tienen distintos rumbos y manteos, y dejan la roca muy fracturada, perdiendo la cohesión. Por la cantidad de fracturas, el macizo rocoso se transforma en una especie de gravilla, la que desliza por la cara del talud, tal como se muestra en la Figura 2.3. Esta aproximación de rotura se hace cuando no es posible determinar la familia de discontinuidades que controla la inestabilidad.

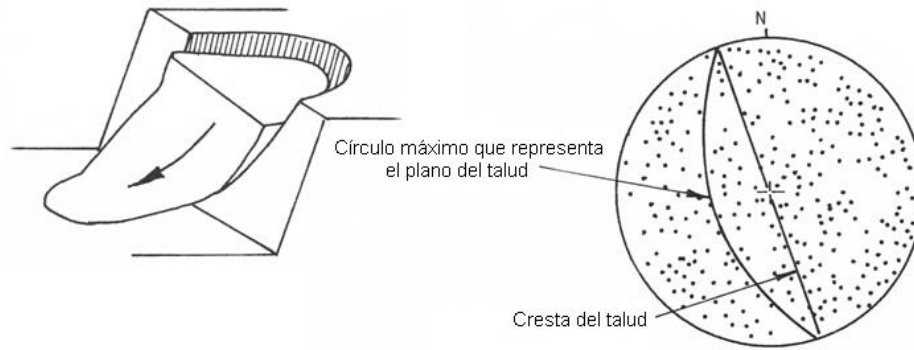


Figura 2.3: Proyección estereográfica de rotura rotacional (Lopez, 2016)

2.3.3 Falla no Circular

Las técnicas de límite de equilibrio se utilizan cuando las fallas corresponden a los deslizamientos de traslación o de rotación sobre superficies de falla determinadas.

Se pueden estudiar superficies planas, circulares y combinaciones de éstas.

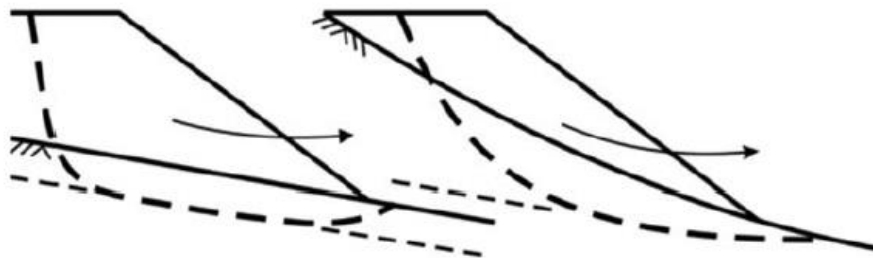


Figura 2.4: Esquema de falla rotacional no circular. (SERNAGEOMIN, 2018)

En los taludes de los botaderos de estériles mineros (BEM) se puede generar dos condiciones de fallas, una corresponde a fallas en los taludes de los botaderos, y la segunda condición donde se puede generar la falla corresponde en el suelo de fundación de un depósito.

En más detalle del tipo de falla que ocurre en un botadero, incluye fallas rotacionales y fallas compuestas. Una falla rotacional, involucra una masa a lo largo de una superficie de falla circular, semi-circular o elipsoidal/curvilínea. Las fallas rotacionales son comúnmente asociadas en residuos mineros homogéneos, débiles, sueltos o conformados por materiales finos. Por otra parte, una superficie de falla compuesta es similar a la rotacional, pero una porción de la superficie de falla es circular y otra planar. La porción planar se puede generar a lo largo de una interfaz entre el botadero y el suelo de fundación o bien a lo largo de un plano de falla existente dentro del suelo de fundación. Este tipo de fallas también podría ocurrir en zonas débiles, como un plano formado por materiales granulares finos o donde se depositaron estériles sobre nieve o hielo.

En cuanto a las fallas que se generan en el suelo de fundación: La falla rotacional genera que la superficie de falla se extienda dentro del suelo de fundación. Este tipo de falla se genera

cuando el suelo de fundación se encuentra conformado por estratos de débil resistencia o si existe una elevada presión de poros. Por otra parte, la falla rotacional no circular es similar a la falla rotacional de suelo de fundación, pero la superficie de deslizamiento es inducida por un estrato o plano de débil resistencia. Este plano puede generarse a largo de la interfase BEM/suelo de fundación, denominada falla de base, o bien directamente dentro del suelo de fundación. Este tipo de fallas puede generarse cuando el BEM se encuentra fundado en los siguientes casos:

- Sobre un terreno de importante pendiente con un estrato de suelo superficial de pequeño espesor.
- Existencia de un plano débil discreto dentro del suelo de fundación.
- Si el suelo de fundación presenta una menor resistencia que los materiales que conforman el BEM.
- Elevadas presiones de poros en el suelo de fundación.

2.4 FACTOR DE SEGURIDAD

El análisis de los mecanismos de falla en los taludes nos permitirá cuantificar el Factor de Seguridad, el que a su vez entrega la condición mínima segura para la inclinación del plano.

Para el caso del análisis de equilibrio limite, una vez que se han realizado correctamente todos los pasos que nos llevan a realizar un correcto análisis de estabilidad de taludes, el FS que se considere aceptable depende, en primer lugar, del nivel de riesgo, y después de la magnitud de las soluciones implicadas.

Estos Factores de Seguridad pueden variar de acuerdo con la normatividad existente para distintos tipos de talud y para la importancia que su falla tenga sobre los bienes y las personas.

2.4.1 Criterio de aceptabilidad

Existe una serie de estudios, realizados por diferentes autores, que determinan diferentes Factores de Seguridad, para condiciones estáticas y sísmicas determinadas. En la Tabla 2.2, se presentan algunos de los criterios más importantes en estabilidad de depósitos de estéril en operaciones mineras.

Tabla 2.2: Criterios de aceptabilidad de Factor de Seguridad en botaderos (Hustrulid).

Autor	Condición	Criterios de aceptabilidad
Karzulovic, Espinoza & Díaz (1999)	Estática	$FS \geq 1.20$
	Sismo operacional	$FS \geq 1.10$
	Sismo máximo probable	$FS \geq 1.00$
Karzulovic & Hormazabal (2000)	Estática	$FS \geq 1.20$
	Sismo operacional	$FS \geq 1.10$
	Sismo máximo probable	$FS \geq 1.00$
Galeb, Farías, Díaz & Gallardo (2004)	Estática	$FS \geq 1.20$
	Sismo operacional	$FS \geq 1.10$
	Sismo máximo probable	$FS \geq 1.00$
Espinoza (2004)	Estática	$FS \geq 1.20$
	Sismo operacional	$FS \geq 1.10$
	Sismo máximo probable	No Evaluado

En general, los valores permisibles del Factor de Seguridad dependen de las eventuales consecuencias que podría acarrear una eventual inestabilidad, y de qué forma esta afectaría a personas y equipos, por lo que cuando las consecuencias de una eventual falla son de menor impacto, se aceptan diseños menos conservadores.

2.5 PROBABILIDAD DE FALLA

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 F.S. 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 caracterización de materiales.

2.5.1 Criterios de aceptabilidad

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 cumple con el análisis determinístico, pero no 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.

Tabla 2.3: Criterio de aceptabilidad de probabilidad de falla en botadero (Hustrulid)

Autor	Condición	Criterios de aceptabilidad
Karzulovic, Espinoza & Díaz (1999)	Estática	PF ≤ 10%
	Sismo operacional	PF ≤ 25%
	Sismo máximo probable	PF ≤ 50%
Karzulovic & Hormazabal (2000)	Estática	PF ≤ 10%
	Sismo operacional	PF ≤ 25%
	Sismo máximo probable	PF ≤ 50%
Galeb, Farías, Díaz & Gallardo (2004)	Estática	PF ≤ 10%
	Sismo operacional	PF ≤ 25%
	Sismo máximo probable	PF ≤ 50%
Espinoza (2004)	Estática	PF ≤ 10%
	Sismo operacional	PF ≤ 20%
	Sismo máximo probable	No Evaluado

2.6 ANÁLISIS SÍSMICO

Los eventos sísmicos son capaces de inducir fuerzas de gran magnitud, de naturaleza cíclica, las cuales pueden producir la falla rápida de taludes. Además, la resistencia al corte de un suelo puede reducirse a causa de cargas oscilatorias que generan deformaciones cíclicas.

La combinación entre la acción de las cargas sísmicas y la disminución de la resistencia pueden producir una disminución general de la estabilidad. El caso más crítico es el de materiales no plásticos de grano fino como son los limos o las arenas finas.

Se han propuesto cuatro métodos de análisis para la evaluación de la estabilidad de taludes y laderas, en el caso de eventos sísmicos (S.L. Houston, 1987), siendo de interés de estudio:

- Método pseudoestático en el cual las cargas del sismo son simuladas como cargas estáticas horizontales y verticales.

En los análisis de estabilidad de taludes denominados pseudoestático, se considera la influencia de un evento sísmico; la intervención del sismo se da a través de la fuerza sísmica, a la cual se le considera como una fuerza horizontal que actúa sobre la masa de suelo inestable, cuya magnitud es calculada al multiplicar el peso de dicha masa por un factor, denominado coeficiente sísmico.

Una vez que se conoce el coeficiente sísmico la fuerza sísmica simplemente será:

$$P_K = K_h W$$

Ecuación 1

donde:

P_K = fuerza sísmica

K_h = coeficiente sísmico

$W = \text{peso de la masa de suelo inestable}$

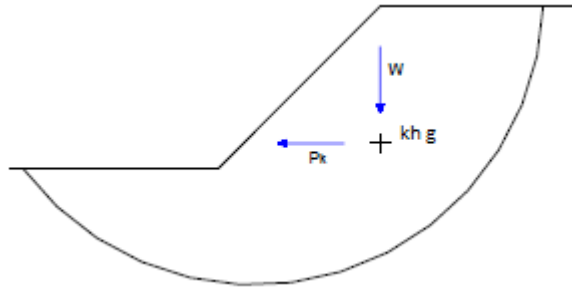


Figura 2.5: Formulación del método pseudoestático

El método pseudoestático tiene la limitación de asumir el movimiento de la masa de suelo involucrada como la de un cuerpo rígido y no provee ninguna información sobre los desplazamientos a ocurrir en el talud.

2.7 CALCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud buscan determinar el Factor de Seguridad (FS) del mismo y se pueden clasificar en dos grandes grupos: métodos de modelamiento numérico y métodos de equilibrio límite.

Los análisis permiten definir la geometría de la excavación o las fuerzas externas que deben ser aplicadas para lograr el factor de seguridad requerido. En caso de taludes inestables, los análisis permiten diseñar las medidas de corrección o estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos.

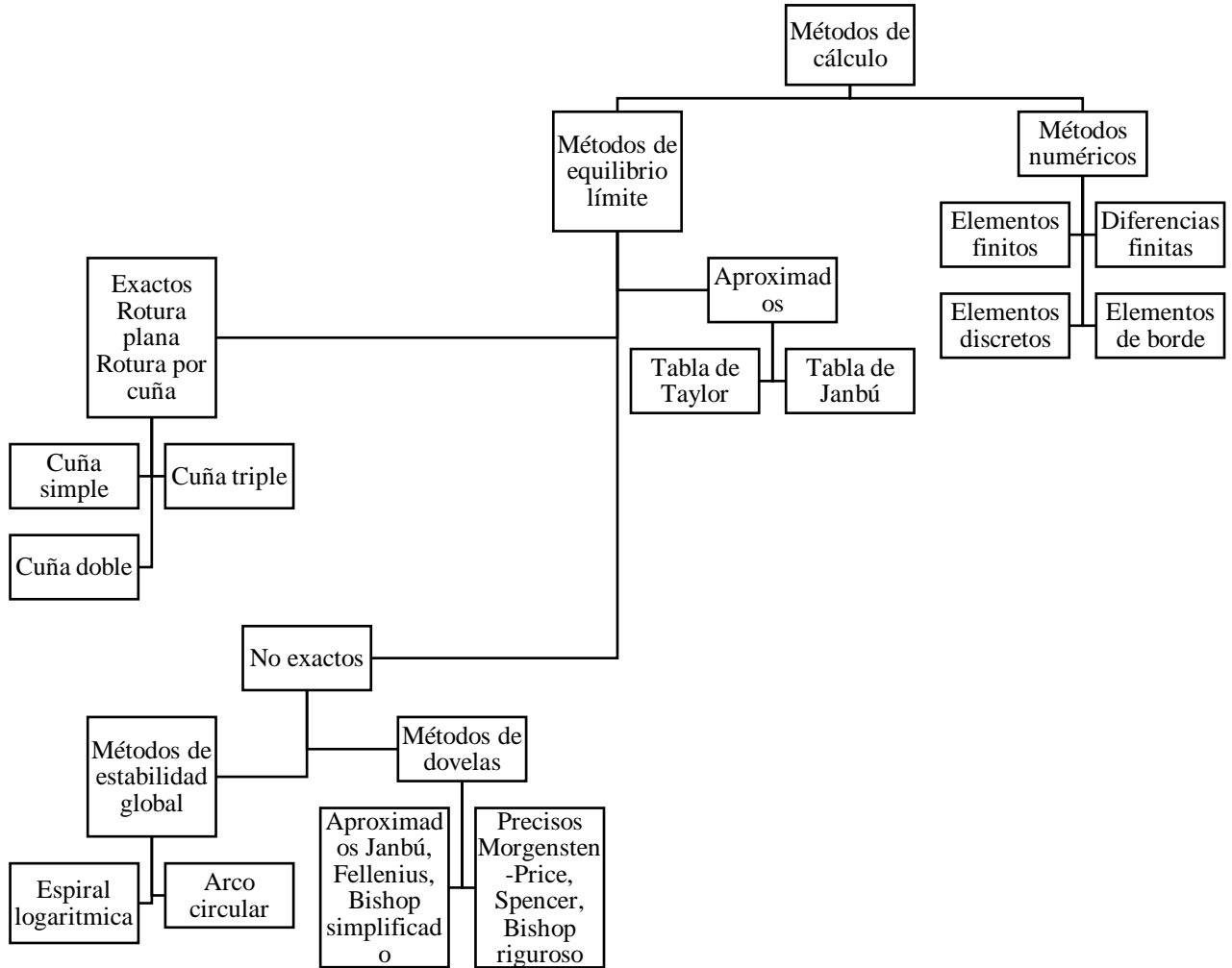


Figura 2.6: Esquema métodos de cálculo para estabilidad de taludes

Modelamiento numérico: técnica que muestra la mejor aproximación al detalle, de las condiciones de estabilidad en la mayoría de los casos de evaluación de estabilidad de taludes, permite el cálculo de deformaciones, así como el de esfuerzos, tomando en cuenta la ley de comportamiento del material.

Métodos de equilibrio límite: Se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta deformaciones del terreno y suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte. Estos a su vez se pueden clasificar en métodos exactos y métodos aproximados.

Se evalúa el talud en su estado de falla, basándose en las consideraciones de equilibrio límite. El talud se desliza a lo largo de una superficie de falla, en donde se moviliza toda la resistencia al corte del material.

2.8 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando éstos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir un coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, consecuencias o riesgos que podría causar su rotura, etc.

Los análisis permiten definir la geometría de la excavación o las fuerzas externas que deben ser aplicadas para lograr el Factor de Seguridad requerido. En caso de taludes inestables, los análisis permiten diseñar las medidas de corrección o estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos.

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento fisicomatemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Se pueden agrupar en:

- **Métodos determinísticos:** conocidas o supuestas las condiciones en que se encuentra un talud, estos métodos indican si el talud es o no estable. Consisten en seleccionar los valores adecuados de los parámetros físicos y resistentes que controlan el comportamiento del material para, a partir de ellos y de las leyes de comportamiento adecuadas, definir el estado de estabilidad o el Factor de Seguridad del talud. Existen dos grupos: métodos de equilibrio límite y métodos tenso-deformacionales.
- **Métodos probabilísticos:** consideran la probabilidad de rotura de un talud bajo unas condiciones determinadas. Es necesario conocer las funciones de distribución de los diferentes valores considerados como variables aleatorias en los análisis (lo que supone su mayor dificultad por la gran cantidad de datos necesarios, dadas las incertidumbres sobre las propiedades de los materiales), realizándose a partir de ellas los cálculos del Factor de Seguridad mediante procesos iterativos. Se obtienen las funciones de densidad de probabilidad y distribución de probabilidad del Factor de Seguridad, y curvas de estabilidad del talud, con el Factor de Seguridad asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia.

La elección del método de análisis más adecuado en cada caso dependerá de:

- Las características geológicas y geomecánicas de los materiales (suelos o macizos rocosos).
- Los datos disponibles del talud y su entorno (geométricos, geológicos, geomecánicos, hidrogeológicos, etc.).
- Alcance y objetivos del estudio, grado de detalle y resultados que se espera obtener.

Estos factores son, a su vez, interdependientes entre sí; no se podrá efectuar un análisis detallado si no se dispone de los datos necesarios y suficientes, al igual que un caso de estabilidad complejo no podrá ser abordado con un método simple por el hecho de disponer

de pocos datos de campo o laboratorio. Asimismo, hay que tener en cuenta que, tanto los datos de campo como los de laboratorio, deberían ser obtenidos en función del método de análisis de estabilidad que se vaya a emplear y del tratamiento que se les vaya a dar.

2.8.1 Métodos de Equilibrio Límite

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, y arroja como resultado un factor de seguridad al comparar las fuerzas o momentos resistentes en la masa del suelo con respecto a las fuerzas o momentos actuantes.

Los métodos de equilibrio límite (los más utilizados) analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. Se basan en (Luis I. González de Vallejos, 2004):

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

Los problemas de estabilidad son estáticamente indeterminados, y para su resolución es preciso considerar una serie de hipótesis de partida diferentes según los métodos. Asimismo, se asumen las siguientes condiciones:

- La superficie de rotura debe ser postulada con una geometría tal que permita que ocurra el deslizamiento, es decir, será una superficie cinemáticamente posible.
- La distribución de las fuerzas actuando en la superficie de rotura podrá ser computada utilizando datos conocidos (peso específico del material, presión de agua, etc.).
- La resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura.

Con estas condiciones, se establecen las ecuaciones del equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento y las resistentes. Los análisis proporcionan el valor del coeficiente de seguridad del talud para la superficie analizada, referido al equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan. Es decir, el coeficiente F por el que deben dividirse las fuerzas tangenciales resistentes (o multiplicarse las fuerzas de corte desestabilizadoras) para alcanzar el equilibrio estricto:

$$F = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

Ecuación 2

O expresado en términos de tensiones:

$$F = \frac{\textit{Tensiones tangenciales resistentes}}{\textit{Tensiones tangenciales deslizantes}}$$

Ecuación 3

Las fuerzas actuando sobre un plano de rotura o deslizamiento potencial, suponiendo que no existen fuerzas externas sobre el talud, son las debidas al peso del material, W , a la cohesión, c , y a la fricción, ϕ , del plano (Figura 2.7). El coeficiente de seguridad viene dado por:

$$F = \frac{(R_c + R_\phi)}{S}$$

Ecuación 4

$R_c = \textit{fuerzas cohesivas} = cA$

$R_\phi = \textit{fuerzas friccionales} = W \cos \alpha \tan \phi$

$S = \textit{fuerzas que tienden al deslizamiento} = W \sin \alpha$

$A = \textit{área del plano de rotura}$

en caso de existir presión de agua sobre la superficie de rotura, siendo U la fuerza total debida al agua sobre la superficie A :

$R_\phi = (W \cos \alpha - U) \tan \phi$

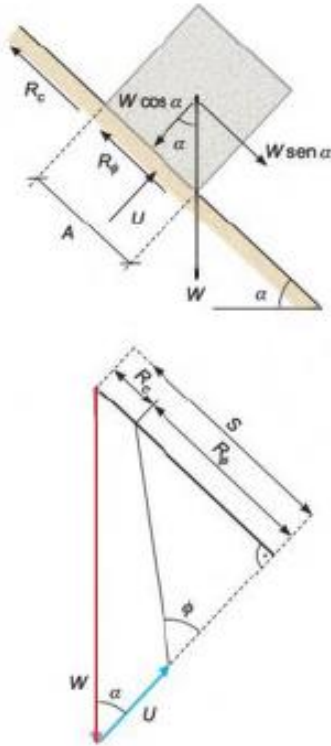


Figura 2.7: Fuerzas actuando sobre una superficie de rotura en talud (Luis I. González de Vallejos, 2004)

Fuerzas desestabilizadoras:

- Componente del peso actuando en la dirección del plano de rotura, $W \sin \alpha$.
- Resultante de las presiones intersticiales o del agua, U , que actúan en la posible superficie de rotura.
- Cargas exteriores estáticas y dinámicas ejercidas sobre el talud contrarias a la estabilidad.

Fuerzas estabilizadoras:

- Resistencia al esfuerzo cortante del terreno, debida a la cohesión y rozamiento interno movilizados a lo largo de la superficie de rotura.
- Componente del peso actuando normal a la superficie de rotura, $W \cos \alpha$.
- Fuerzas exteriores a favor de la estabilidad.

El análisis de equilibrio límite se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión.

A continuación, se describe el fundamento teórico de los diversos métodos de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes.

2.8.1.1 Método de Bishop Simplificado

Debido a que el método de las rebanadas o dovelas no es muy preciso para suelos friccionantes, Bishop (1955) propuso otro método, originalmente desarrollado para superficies de fallas circulares, el cual considera la condición de equilibrio entre las fuerzas de interacción verticales actuantes entre las rebanadas.

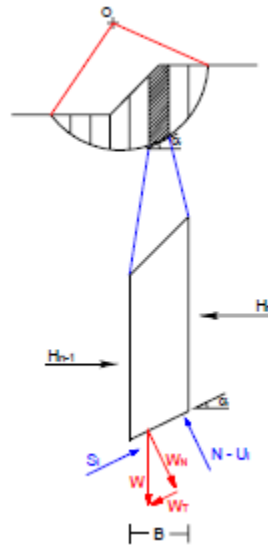


Figura 2.8: Formulación del método de Bishop simplificado (Véliz)

El cálculo de la metodología original se basa en buscar el equilibrio de momentos respecto al centro del arco circular que coincide con la superficie de falla; en la posterior versión modificada, se puede aplicar a superficies no curvas, teniendo que definir centros ficticios. Este es un método iterativo en el cual se parte de un Factor de Seguridad calculado de una superficie falla dada.

$$FS = \frac{\sum cB + (W - uB) \frac{\tan \Phi}{ma}}{\sum W \sin \alpha}$$

Ecuación 5

Donde:

$$ma = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \Phi}{FS} \right)$$

Ecuación 6

W = Peso de la dovela

W_T = Componente tangencial del peso de la dovela

W_N = Componente normal del peso de la dovela

N = Fuerza normal en la base de la dovela

$H_{n,n+1}$ = Fuerzas horizontales aplicadas sobre una dovela

u = Presión de poros

U_i = Fuerza ejercida por la presión de poros

B = Base de la dovela

c = Cohesión del suelo

Φ = Ángulo de fricción

α = Ángulo de la superficie de falla en la dovela

FS = Factor de seguridad

2.8.1.2 Método de Janbu

Diseñado para superficies no necesariamente circulares, también supone que la interacción entre rebanadas es nula, pero a diferencia de Bishop, este método busca el equilibrio de fuerzas y no de momentos. Experiencias posteriores hicieron ver que la interacción nula en el caso de equilibrio de fuerzas era demasiado restrictiva, lo que obligó a introducir un factor de corrección fo empírico aplicable al FS.

En la versión posterior modificada, se define una línea de empuje entre las rebanadas, y se buscan los equilibrios en fuerzas y momentos respecto al centro de la base de cada una, como se muestra en la Figura.

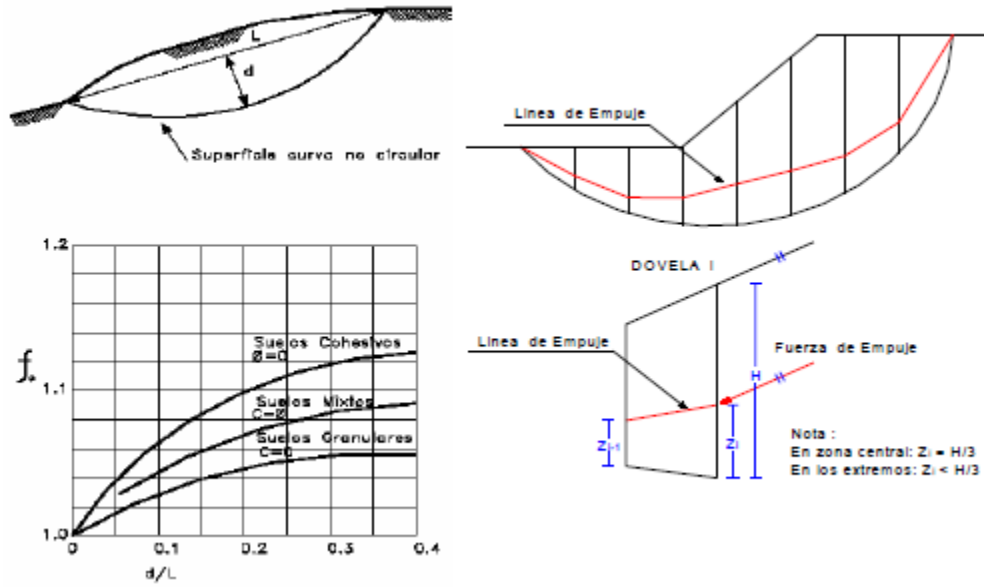


Figura 2.9: Formulación del método de Jabu (Véliz)

$$FS = \frac{f_0 \sum \frac{cB + (W - uB) \tan \Phi}{\cos \alpha * ma}}{\sum W \tan \alpha}$$

Ecuación 7

Donde:

$$ma = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \Phi}{FS} \right)$$

Ecuación 8

W = Peso de la dovela

u = Presión de poros

B = Base de la dovela

c = Cohesión del suelo

Φ = Ángulo de fricción del suelo

α = Ángulo de la superficie de falla en la dovela

f_0 = Factor de corrección

FS = Factor de seguridad

2.8.1.3 Método de Morgenstern-Price

Se basa en lograr el equilibrio de momentos como de fuerzas. La gran diferencia se debe a que la interacción entre las rebanadas viene dada por una función, la cual evalúa las interacciones a lo largo de la superficie de falla. La Figura 2.10 ilustra este método.

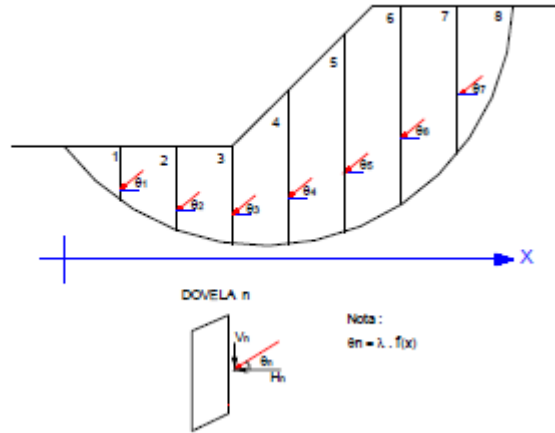


Figura 2.10: Formulación del método de Morgenstern-Price (Véliz)

2.8.2 Métodos numéricos

A diferencia de los métodos analíticos, los modelos numéricos requieren de técnicas computacionales más complejas, debido a que integran en su análisis una variedad más amplia de parámetros que influyen dentro del problema. En general la exactitud del modelo y su tiempo de modelación están relacionadas con el tipo de análisis y el código implementado.

Existen diferentes tipos de análisis debido a que ningún método puede capturar todos los aspectos del comportamiento real de la roca. Se dividen en continuo y discontinuo, el primero consiste en dividir el medio en un número finito de subdominios (elementos) cuyo comportamiento se describe por descripciones matemáticas con un grado finito de grados de libertad, para determinar la influencia de diversos parámetros en el comportamiento de todo el sistema. Los discontinuos en cambio modelan la interacción entre sistemas de bloques o partículas, llegando a ser discretizados internamente para comportarse como dominios deformables o elásticos (Jing, 2003).

Comúnmente los métodos numéricos más usados en el modelamiento numérico de mecánica de rocas son:

- Continuos: método de diferencias finitas (FDM), método de elementos finitos (FEM), elementos de borde (BEM).
- Discontinuos: método de elementos discretos (DEM), redes de fracturas discretas (DFN).

2.8.2.1 Elementos finitos

El método de elementos finitos (FEM) ha sido impulsado durante los últimos años gracias a los avances informáticos que lo han establecido como una herramienta útil en la solución de problemas ingenieriles, ciencia aplicada, investigación e industria. Este modelo matemático permite cálculos sencillos y fiables con menor tiempo de análisis. Dentro de área geomecánica existen diferentes códigos que abarcan un amplio rango de aplicaciones dentro del sector minero (Bull, 2003).

El planteamiento general de esta técnica consiste en la división del continuo en subconjuntos de elementos conectados entre sí a través de una serie de puntos, de manera que las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo presiden de igual forma a los elementos, logrando dar una solución aproximada al problema.

La Figura 2.11 ilustra un esquema generalizado acerca del desarrollo del método de manera global. Inicialmente se define el espacio geométrico a estudiar, en este caso se cuenta con la sección transversal de una excavación subterránea con una geometría específica sometida a esfuerzos iniciales p_{xx} , p_{yy} , p_{xy} .

En la parte (b) es seleccionado el dominio del problema y se imponen las condiciones de borde que fijan el sistema de acuerdo con el entorno. La discretización del medio se realiza mediante elementos triangulares o cuadriláteros los que deben disponer en mayor densidad en áreas de gradientes altos para considerar un mejor análisis.

Como se observa en la parte (c) cada uno de los elementos se definen por un número de puntos también llamados nodos (i, j, k), encargados de conectar entre sí los elementos, y sobre los cuales se puntualizan las incógnitas fundamentales el problema (Brady, 2004).

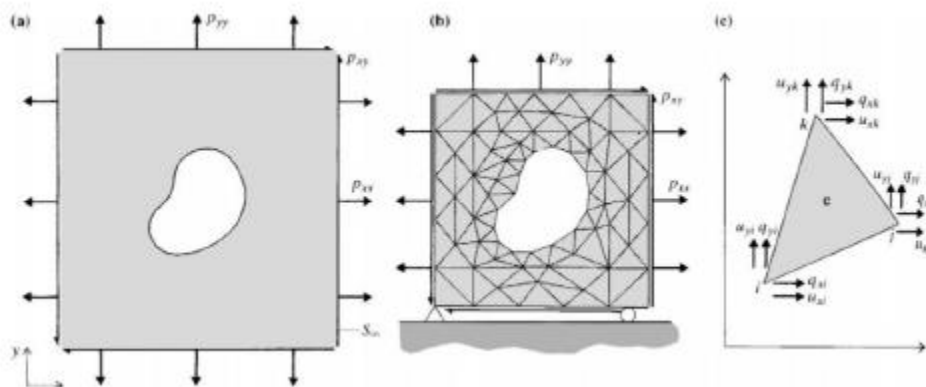


Figura 2.11: Desarrollo del método de elementos finitos (Brady, 2004)

A su vez, se debe elegir el set de funciones con las cuales se definirá el desplazamiento de los componentes en cualquier punto de la malla en función de los desplazamientos nodales, de esta manera las propiedades asignadas al medio influyen en los subdominios. Esto siempre y cuando se asuma que dentro del análisis por FEM la transmisión de fuerzas internas entre elementos se realiza mediante la interacción de los nodos. La red de elementos y su cálculo

involucra ecuaciones simultáneas, cuya solución se establece evaluando la inversión de una matriz de rigidez.

Las ventajas de este tipo de herramienta dentro de los métodos numéricos, radica en la versatilidad para analizar una gran cantidad de problemas ingenieriles y su excelente aproximación a la solución, siendo ideal para problemas elásticos con grandes deformaciones. Al tener una solución explícita se requiere de mayores capacidades de memoria a diferencia de otros métodos ya que la solución por matrices involucra un cálculo que requiere de avanzadas condiciones computacionales.

2.8.2.2 Método de reducción de resistencia al corte

También conocido como SSR por sus siglas en inglés, es un método comúnmente usado para determinar factores de seguridad mediante la reducción progresiva de parámetros de resistencia del material, llevando así el modelo a un estado de equilibrio. Generalmente es útil en el estudio de estabilidad de taludes destacándose como una valiosa herramienta.

Décadas atrás gran parte de los de análisis de estabilidad en taludes se llevaban a cabo mediante aproximaciones de equilibrio límite, sin embargo, debido a deficiencias en los planteamientos de las teorías y el avance computacional, las técnicas convencionales se reemplazaron e introdujeron nuevas como el método de reducción de resistencia al corte. El método se basa en el criterio de falla de Mohr- Coulomb y permite asignar factores de seguridad a partir de una reducción sistemática de las propiedades de resistencia del material hasta inducir a la falla.

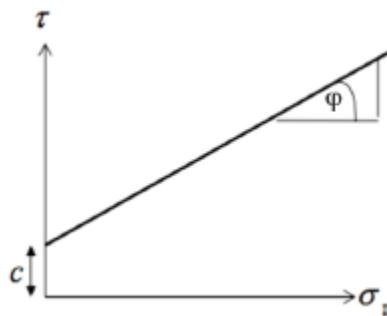


Figura 2.12: Envolvente de falla según criterio de Mohr-Coulomb (Dawson et al., 1999)

Es así como la resistencia al corte (τ) a lo largo del plano, se constituye por dos componentes; una de cohesión constante (c) y una de fricción dependiente de los esfuerzos normales ($\sigma_n \tan \varphi$).

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi$$

Ecuación 9

La reducción de la resistencia al corte se expresa entonces como:

$$\frac{\tau}{SSR} = \frac{c}{SSR} + \sigma_n \frac{\tan \varphi}{SSR}$$

Ecuación 10

En este caso los factores se pueden representar:

$$c * = \frac{c}{SSR} \text{ y } \varphi = \arctan \frac{\tan \varphi}{SSR}$$

Ecuación 11

De esta manera se incrementa gradualmente el valor de SSR hasta obtener el factor de seguridad para el modelo.

3 ANTECEDENTES GENERALES

3.1 PROYECTO CONTINUIDAD MINA GABRIELA

El proyecto se denomina “Proyecto Continuidad Mina Gabriela” (PCMG), cuyo objetivo es prolongar el uso de la planta de procesos del proyecto Gabriela, sin aumentar su capacidad de producción, para lo cual se operarán nuevos rajos y depósitos de estéril y se recibirán minerales de terceros, en remplazo del mineral que se ha obtenido hasta ahora desde los rajos Gabriela y China.

3.2 UBICACIÓN Y ACCESO AL ÁREA

El Proyecto está ubicado en la Región de Antofagasta, provincia de Antofagasta, comuna de Taltal, específicamente en el sector de Altamira, en el 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 1.730 m.s.n.m. (Figura 3.1).

El punto de ubicación geográfica de referencia para el conjunto del PCMG es Norte 7.141.880, Este 412.870, conforme al sistema de proyección UTM Huso 19 S, Datum WGS84 y corresponde a la ubicación de 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.

El acceso a los rajos y botaderos del Proyecto se realiza desde el sector de ingreso, usando caminos privados preexistentes o habilitados para la tarea.

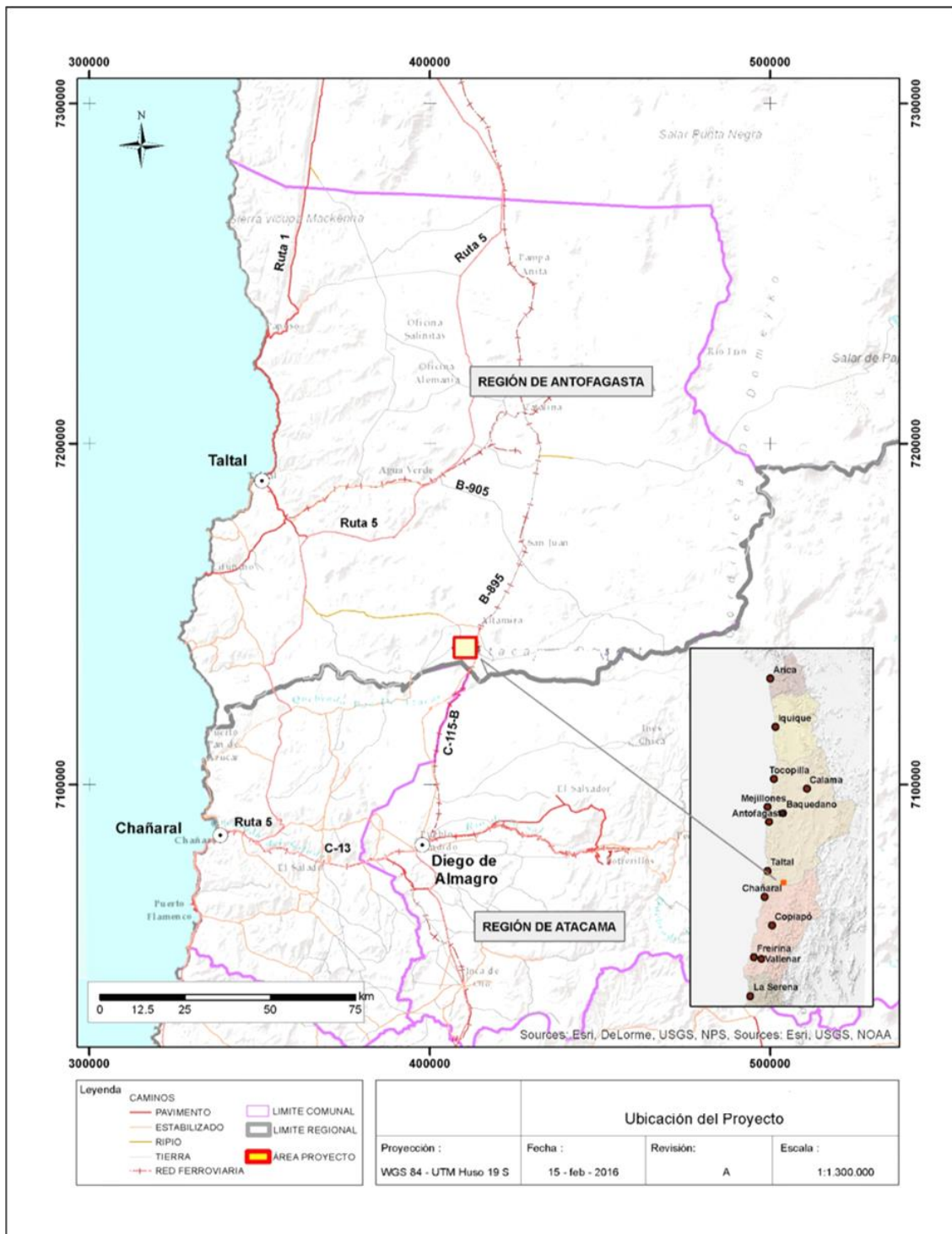


Figura 3.1: Ubicación PCMG

3.3 GEOLOGÍA

El distrito Altamira está localizada en el extremo sur de la Región de Antofagasta, y abarca gran parte de la Depresión Central y el borde oriental de la Cordillera de la Costa (Figura 3.2). La zona se puede dividir en dos dominios longitudinales: uno occidental, compuesto por rocas continentales, marinas y plutónicas del Paleozoico-Mesozoico que forman un relieve de mediana altitud, y otro centro-oriental, donde se concentran importantes secuencias volcánicas y sedimentos del Paleógeno, que resaltan por sobre las llanuras aluviales neógenas. Estos dominios están separados por un sistema de fallas inferido de orientación NS que representa el borde occidental de una depresión tectónica donde se depositaron las rocas volcánicas cenozoicas.

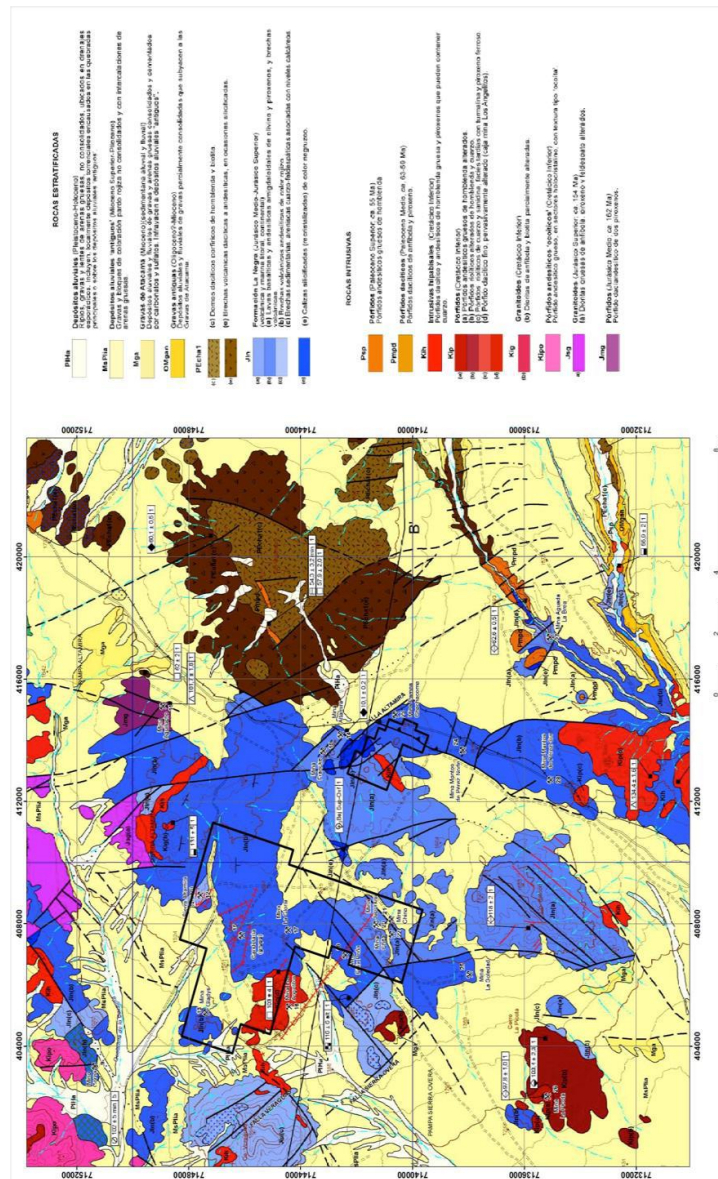


Figura 3.2: Localización de las concesiones de PCMG en la carta geológica general

Las unidades geológicas presentes en el distrito corresponden a una secuencia volcano-sedimentaria depositadas en cuencas tectónicas. Las unidades del jurásico las comprenden rocas volcánicas subaéreas y submarinas dominadas por lavas de composición andesíticas y basálticas, además por secuencias de rocas sedimentarias marinas y continentales, caracterizadas por las unidades de calizas y areniscas tobáceas, comprendiendo este periodo a una cuenca de trasarco. La actividad magmática del cretácico se manifiesta en el sector con productos piroclásticos, el cual consiste en tobas andesíticas y dacíticas, además de areniscas volcanoclásticas. Las rocas intrusivas del distrito tienen una composición diorítico, monzonítico y granodiorítico, además de abundantes diques andesíticos (Figura 3.3).

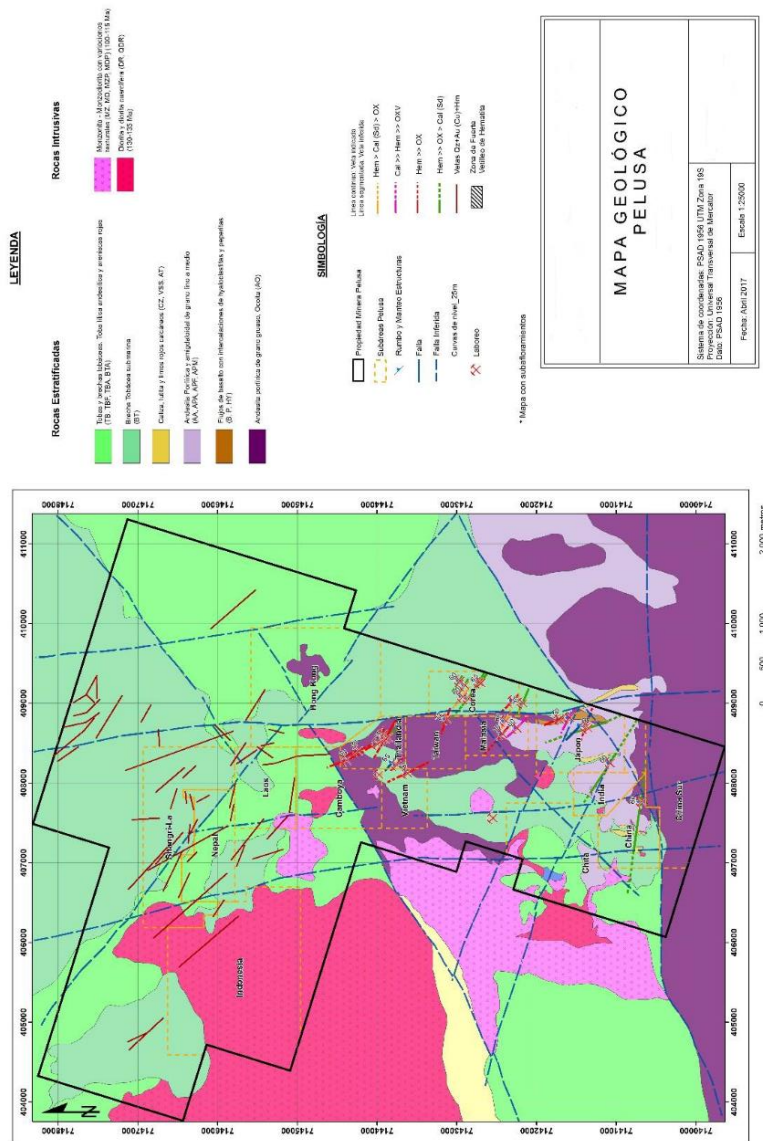


Figura 3.3: Mapa de la geología distrital

3.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

A escala regional, se reconocen tres sistemas estructurales, con sus correspondientes sistemas complementarios. Son, del más antiguo al más joven, el sistema noreste, representado por la Falla Frankenstein, el sistema noroeste, representado por la Falla Altamira y el sistema norte sur, paralelo a la Zona de Falla de Atacama, que desplaza a los dos anteriores. Cabe mencionar que el quiebre topográfico entre la Cordillera de la Costa y la Depresión Central se puede atribuir a una estructura de este sistema.

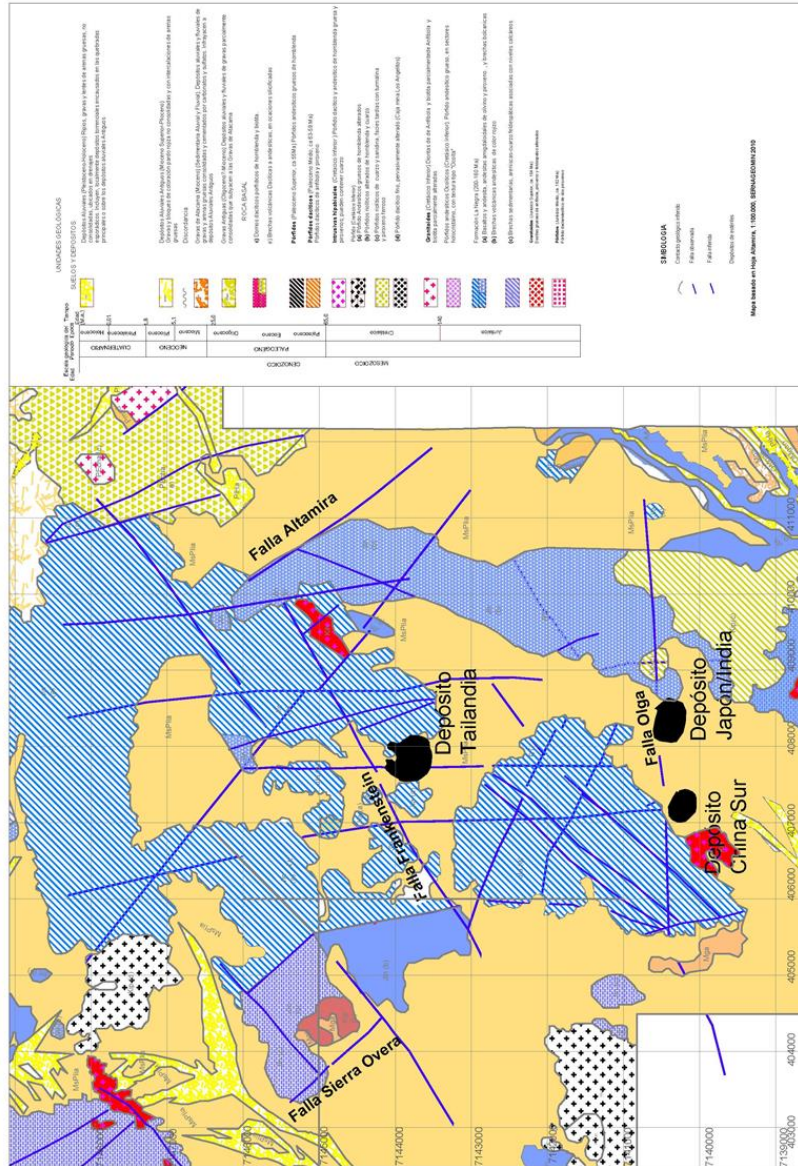


Figura 3.4: Carta Altamira (Servicio Nacional de Geología y Minería)

3.5 DEPÓSITOS DEL SUELO DE FUNDACIÓN

La roca basal infrayacente a las gravas (Figura 3.5, Figura 3.6) en los botaderos China Sur, Japón/India y Tailandia, corresponde a Brecha Tobácea submarina y Andesita Porfírica y Amigdaloidal asignadas a la Formación La Negra.

La Brecha Tobácea submarina, corresponde a una alternancia de brechas y areniscas tobáceas de color gris verdoso a rojizo, con capas de espesores variables, de rumbo noroeste y buzamiento de 60° a 65° hacia el noreste.

Las brechas son clasto-soportadas, y los clastos corresponden a tobas dacíticas, tobas riolíticas y escasos clastos andesíticos. La matriz está formada por areniscas tobáceas, bien seleccionadas, con algunos fragmentos mayores de similar composición. Las areniscas tobáceas, de feldespato y cuarzo, generalmente están bien estratificadas con estratos de 5 a 10 cm de espesor.

La Andesita Porfírica, corresponde a volcanitas intermedias, de texturas variables, generalmente de masa fundamental afanítica y color pardo a pardo-grisáceo. Las texturas pueden variar de afanítica a porfírica, con fenocristales de plagioclasas de tamaño fino a medio, la Andesita Amigdaloidal se caracteriza por amígdalas que pueden estar rellenas de sericita, carbonatos o clorita.

Al norte del botadero aflora una monzonita de color gris rosado, de grano medio, con textura equigranular a porfídica, compuesta por plagioclasa, feldespato potásico, anfíbola y biotita.

La alteración de la roca basal corresponde a silicificación parcial; adicionalmente se describen áreas menores con alteración clorítica y argilización.

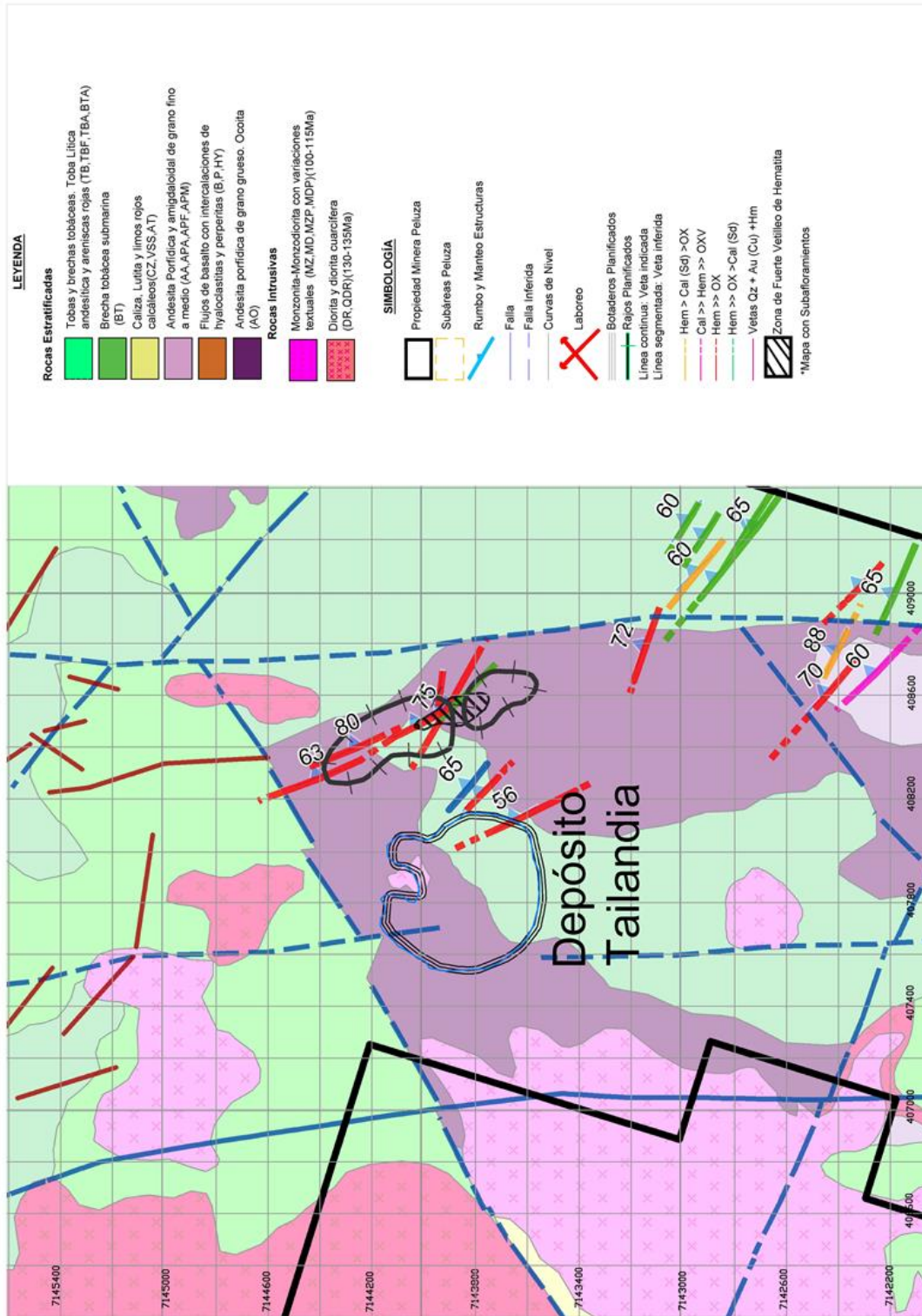


Figura 3.6: Geología de la roca basal, Botadero Tailandia

4 METODOLOGÍA PROPUESTA

4.1 INTRODUCCIÓN

Para el estudio de la estabilidad de un talud, existen diferentes procedimientos sugeridos a seguir como se presenta en la Figura 4.1. Fundamentalmente las líneas que engloban el estudio de estabilidad van orientadas a la investigación de las características resistentes del macizo rocoso y el material a depositar en el caso de los botaderos. Así también la determinación de criterios de rotura más acordes. Como resultado la obtención de un análisis de la estabilidad de los taludes mediante la utilización de modelos de equilibrio límite o modelos numéricos.

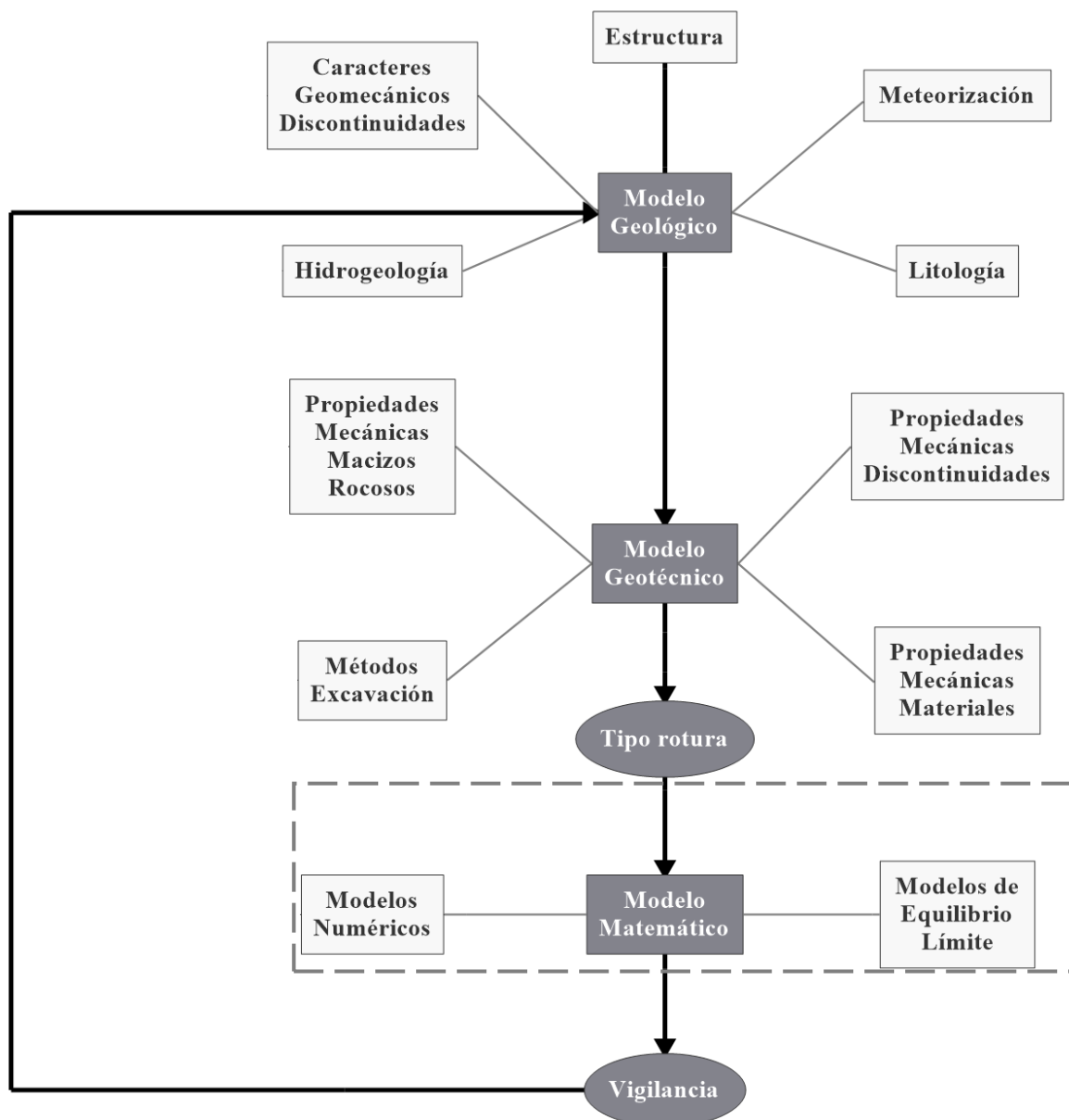


Figura 4.1: Etapas para realizar un estudio de estabilidad de taludes

La finalidad de la recopilación de los datos geológicos preliminares, permitirán la interpretación que se produzcan distintos mecanismos de rotura en el talud e identifica zonas donde la estabilidad requiere una investigación y análisis más exhaustivo. Es necesario realizar una investigación geológica más detallada a la zona problemática identificada para la obtención de datos más detallados, con el objetivo de analizar taludes críticos utilizando métodos analíticos o numéricos y obtener coeficientes representativos del talud.

La Figura 4.2 representa de forma breve la metodología a seguir. Inicialmente se definen de los botaderos China Sur, Japón India y Tailandia las secciones más críticas correspondiente, utilizando como factores de selección de las secciones a aquellos de taludes de mayor altura, mayor pendiente y/o geometrías cóncavas, cubriendo un rango de casos posibles. Una vez establecidas las secciones criticas correspondiente de cada botadero, se evalúan por los dos métodos de cálculo. Como resultado se obtiene por medio del método de equilibrio límite, Factores de Seguridad y por medio del modelamiento numérico el cual corresponde a métodos de reducción de resistencia al corte, un plano preferente de donde se produce la progresión de la falla a lo largo de la pendiente a medida que se reduce la resistencia, así también la obtención de SRF critico el cual es equivalente al Factor de Seguridad entregado por el método de equilibrio limite.

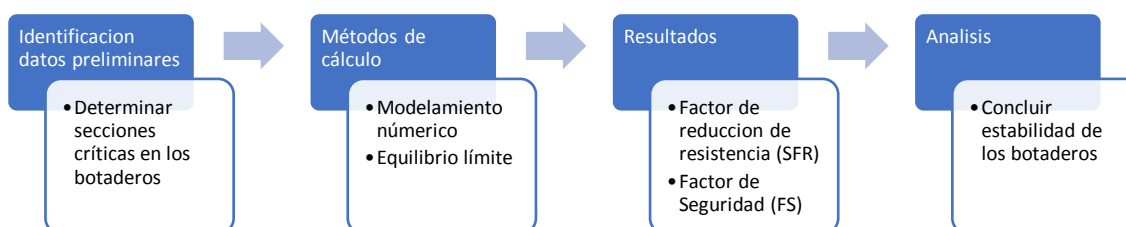


Figura 4.2: Esquema general de metodología propuesta

4.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS

Los casos que se pretenden evaluar mediante los métodos de equilibrio límite y modelos numéricos, es la determinación de los factores de seguridad para las secciones predefinidas como críticas en los botaderos correspondientes a distintos análisis frente al comportamiento sísmico.

4.2.1 Análisis estático

Este análisis se realiza mediante equilibrio límite, considerando la superficie y determinando los factores de seguridad asociado a cada una de las superficies sometidas a las cargas de la operación en condiciones estáticas.

4.2.2 Análisis pseudoestático sismo operacional

La metodología para esta condición es la misma del análisis estático. En este tipo de análisis las cargas sísmicas se incorporan a través de coeficientes sísmicos horizontales que

representen un sismo operacional, en este estudio en particular dichas cargas sísmicas provendrán del análisis de riesgo sísmico.

4.2.3 Análisis pseudoestático sismo máximo

En esta fase está orientada a evaluar la condición de cierre de la obra, incluyendo eventos solicitantes máximos y a los efectos de envejecimiento aplicado a la resistencia de corte de los materiales del botadero.

4.3 PERFILES SELECCIONADOS

Los análisis de estabilidad involucran la evaluación de la geometría, y de la condición de diseño final del botadero a fin de determinar la estabilidad en la sección más crítica.

Para los análisis de estabilidad de los botaderos se ha escogido secciones críticas que buscan representar en un rango amplio las condiciones más desfavorables. La selección de los perfiles para el estudio se basa en perfiles críticos en función de la configuración geométrica que engloba la altura global, ángulo de talud, altura máxima de banco y espesor máximo vertical.

4.3.1 Botadero China Sur

El botadero está ubicado en la zona suroeste de la explotación del Proyecto Continuidad Mina Gabriela (PCMG). Sus características geométricas se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Características geométricas Botadero China Sur

Botadero China Sur				
Coordenadas UTM PSAD 54	Área (Ha)	Altura total (m)	Ángulo de talud (°)	Capacidad (Mton)
(407200,7140200)	13	30	38	5,0

Para el análisis de estabilidad del Botadero China Sur se ha escogido tres secciones críticas, en función de los criterios de selección descritos con anterioridad. En la Figura 4.3 se observa la Sección A, Sección B y Sección C para el análisis de estabilidad.

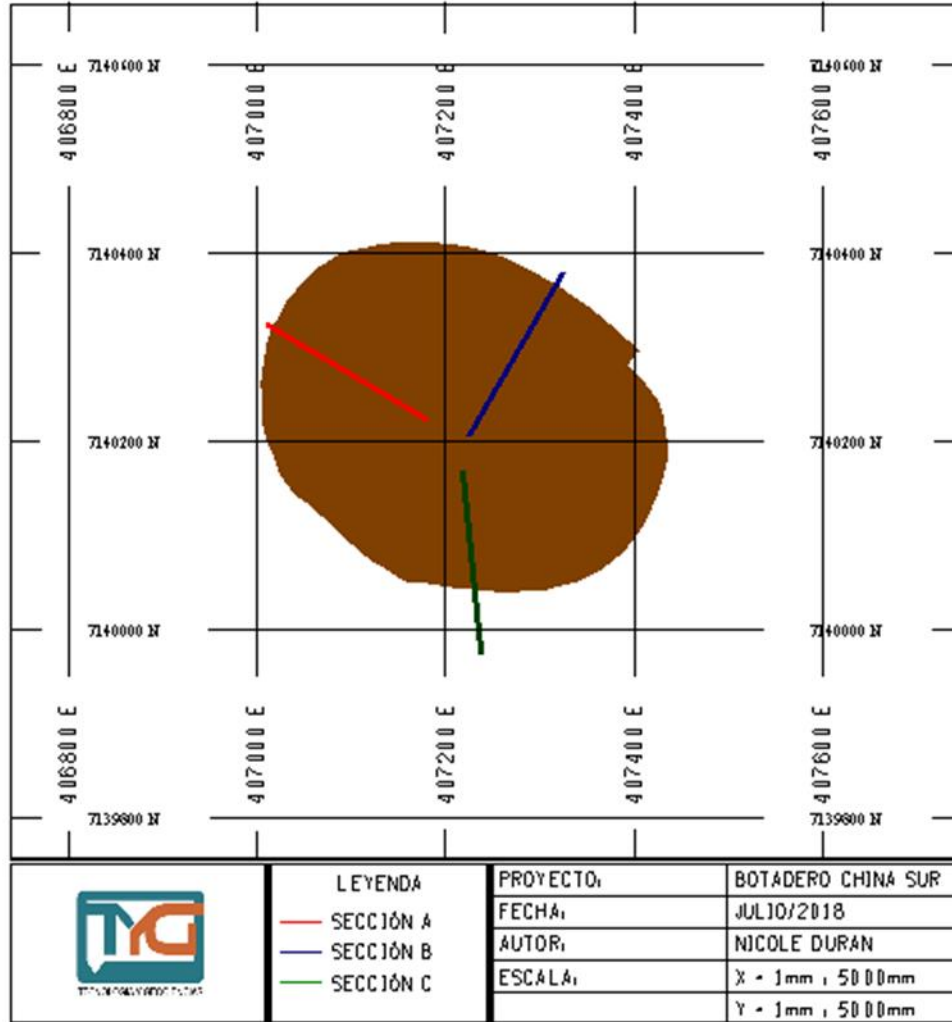


Figura 4.3: Imagen representativa del Botadero China Sur, donde se muestran las secciones evaluadas

4.3.2 Botadero Japón/India

El botadero está ubicado en la zona sureste de la explotación del Proyecto Continuidad Mina Gabriela (PCMG). Sus características geométricas se resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Características geométricas Botadero Japón/India

Botadero Japón/India				
Coordenadas UTM PSAD 54	Área (Ha)	Altura total (m)	Ángulo de talud (°)	Capacidad (Mton)
(408350,7140375)	21	40	37	11,1

Para el análisis de estabilidad del botadero Japón/India se ha escogido tres secciones críticas, en función de los criterios de selección descritos con anterioridad. En la Figura 4.4 se observa la Sección D, Sección E y Sección F para el análisis de estabilidad.

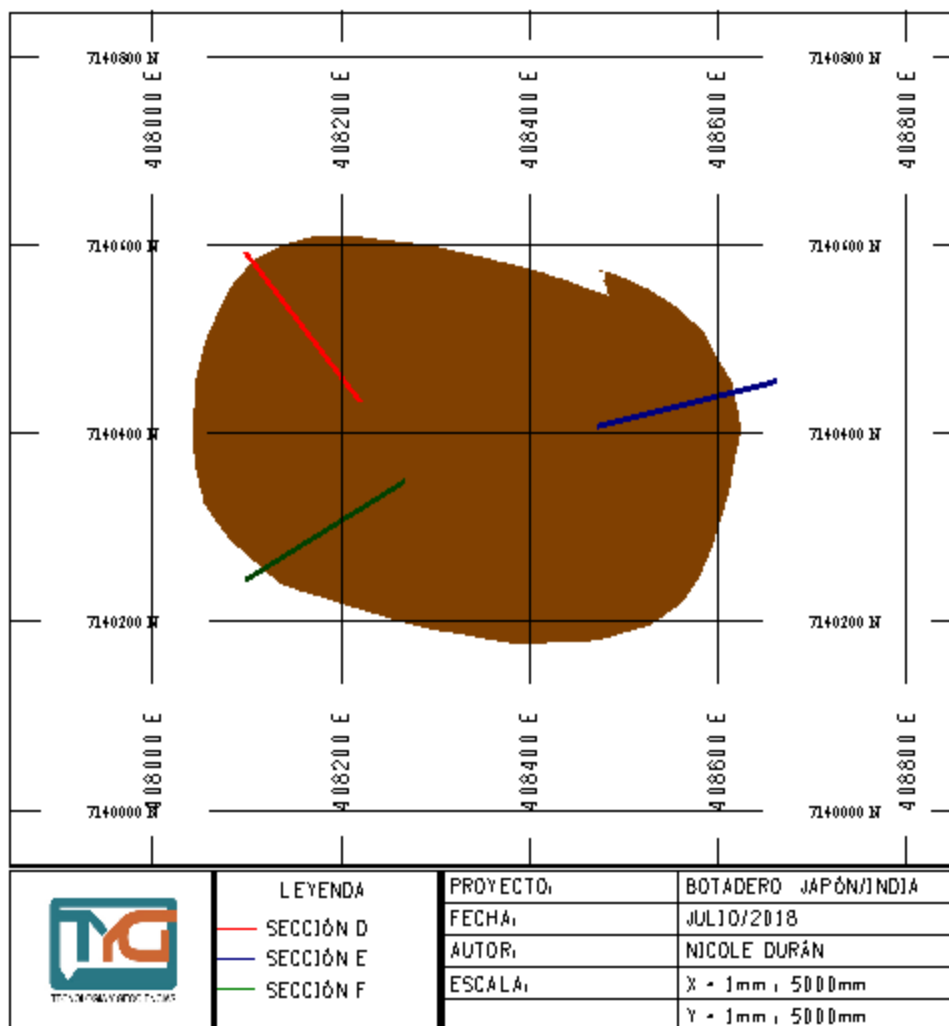


Figura 4.4: Imagen representativa del Botadero Japón/India, donde se muestran las secciones evaluadas

4.3.3 Botadero Tailandia

El Botadero Tailandia está ubicado en la zona norte de la explotación del Proyecto Continuidad Mina Gabriela (PCMG). Sus características geométricas se resumen en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Características geométricas Botadero Tailandia

Botadero Tailandia				
Coordenadas UTM PSAD	Área (Ha)	Altura total (m)	Ángulo de talud (°)	Capacidad (Mton)
54 (408350,7140375)	28	22	37	8,0

Para el análisis de estabilidad del botadero Tailandia se ha escogido dos secciones críticas, en función de los criterios de selección descritos con anterioridad. En la Figura 4.5 se observa la Sección G y Sección H para el análisis de estabilidad.

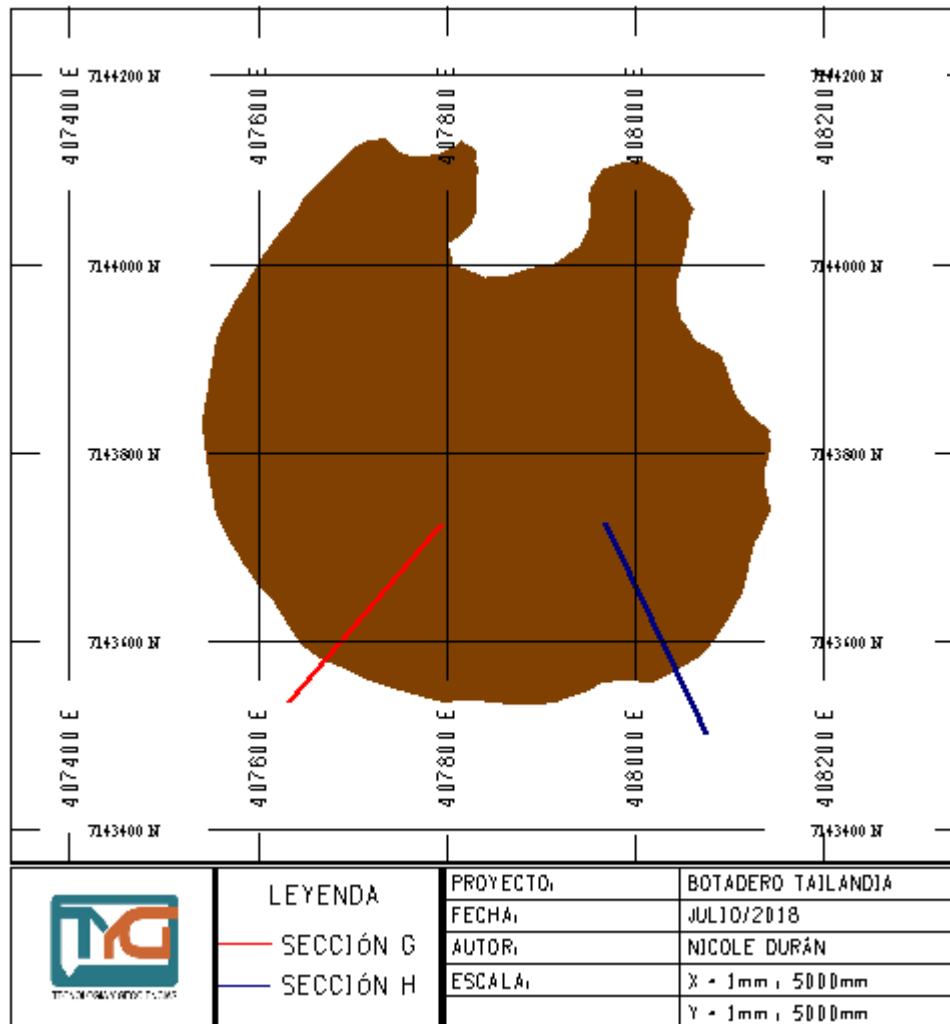


Figura 4.5: Imagen representativa del Botadero Tailandia, donde se muestran las secciones evaluadas

4.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que conforman el suelo de emplazamiento y los botaderos se detallan en la Tabla 4.4, donde se establecen para cada unidad geotécnica involucrada para el cálculo de la estabilidad de los botaderos. La información principal destaca a los parámetros de resistencia que incluye cohesión y ángulo de fricción.

Tabla 4.4: Parámetros Geotécnicos

Tipo de Material	Peso Unitario (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Botaderos	17,7	40	40
Gravas de Atacama	21,6	120	40
Andesita (Ocoíta)	27,0	1.010	62
Brecha Tobácea	25,5	1.031	62

En la Figura 4.6, se puede observar en la Sección A los materiales que se analizan en el Botadero China Sur y la disposición de estos. Por otra parte, en la Figura 4.7 se muestra para la Sección D, los tipos de materiales que componen el análisis para el Botadero de Japón/India. Finalmente, en la Figura 4.8 se muestra en la Sección G los tipos de materiales para el análisis correspondiente al Botadero Tailandia.

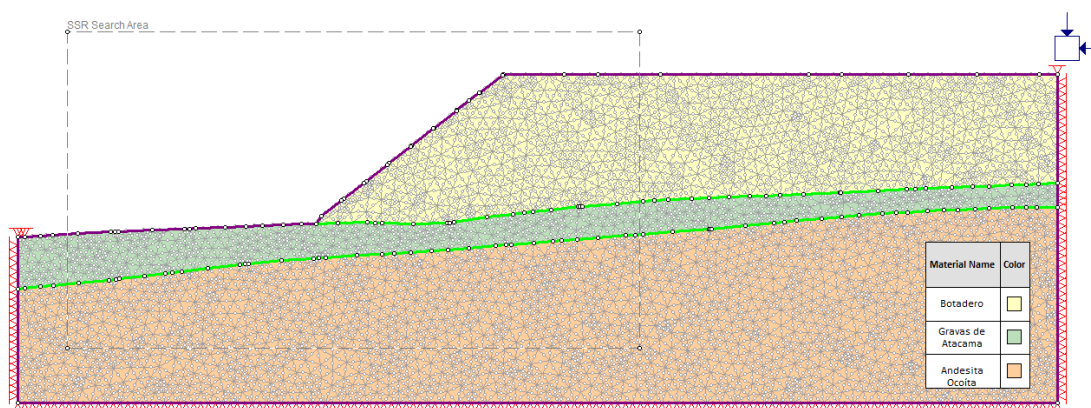


Figura 4.6: Identificación de los materiales correspondientes a la Sección A del Botadero China Sur (Software Phase2)

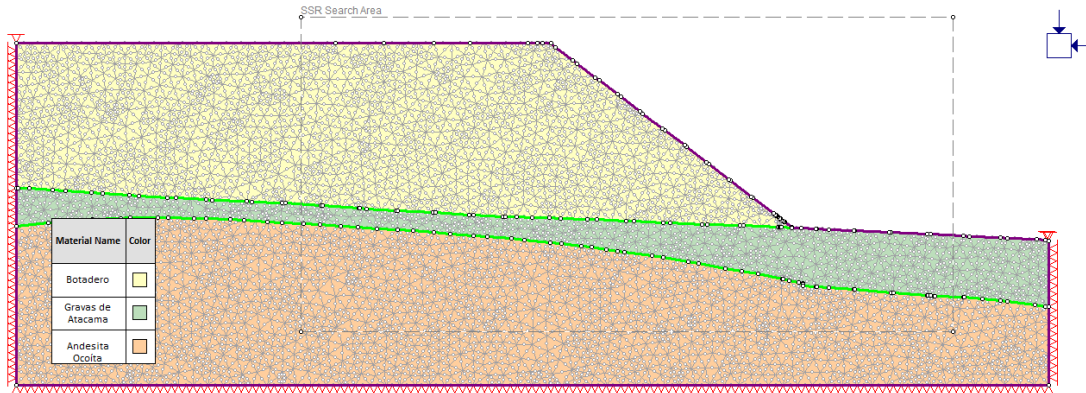


Figura 4.7: Identificación de los materiales correspondientes a la Sección D del Botadero Japón/India (Software Phase2)

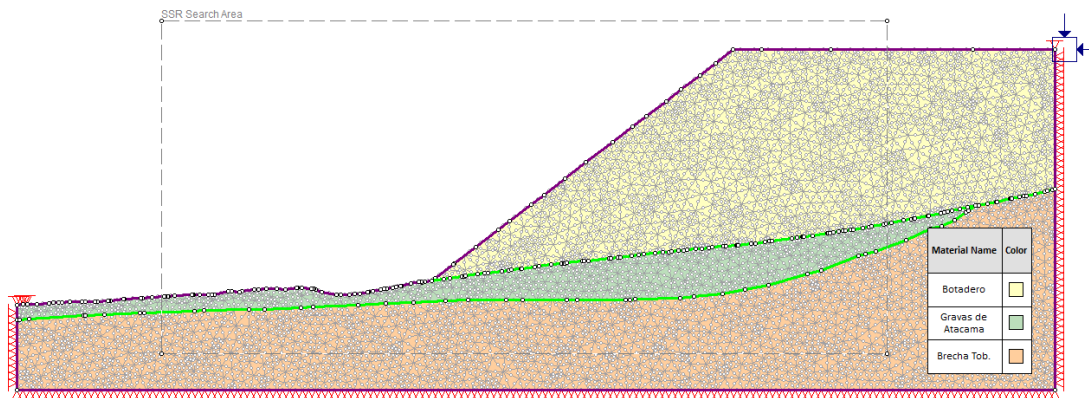


Figura 4.8: Identificación de los materiales correspondientes a la Sección G del Botadero Tailandia (Software Phase2)

4.5 CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD

En la Tabla 4.5 se presentan los Factores de Seguridad mínimos requeridos para considerar un talud estable como también en la Tabla 4.6 se presentan la Probabilidad de Falla permisibles, donde estos criterios de aceptabilidad consideran principalmente en las condiciones estática y pseudoestática, como ya se mencionó en la sección 4.2, que en condición estática los botaderos deben ser lo suficientemente estables, y con una probabilidad de falla lo suficientemente baja para permitir una operación segura. En condición sísmica operacional, que considera una alta probabilidad de la ocurrencia de un sismo de magnitud moderada, durante la vida operacional de los botaderos, estos deben ser estables, y con una probabilidad de falla de baja a media. Y finalmente, En la condición del máximo sismo probable, que considera la ocurrencia de un sismo de magnitud extrema, pero con una baja probabilidad de ocurrencia durante la vida operacional de los botaderos, estos deben alcanzar la condición de equilibrio límite sin que su probabilidad de falla supere el 50%.

Tabla 4.5: Criterio de aceptabilidad de Factor de Seguridad para botaderos

Condición	Factor de Seguridad
Estática	$FS \geq 1,2$
Sismo operacional	$FS \geq 1,1$
Sismo máximo probable	$FS \geq 1,0$

Tabla 4.6: Criterios de aceptabilidad de Probabilidad de Falla para botaderos

Condición	Probabilidad de Falla
Estática	$PF \leq 10\%$
Sismo operacional	$PF \leq 25\%$
Sismo máximo probable	$PF \leq 50\%$

4.6 SISMICIDAD

Para determinar el efecto de un sismo en un botadero es necesario tener en cuenta la vulnerabilidad del botadero y la sismicidad correspondiente en donde este se diseña, por este principal motivo es que se determina un análisis de peligro sísmico en el lugar. En el ANEXO M se detalla la sismicidad de la zona donde se desarrollará el Proyecto Continuidad Mina Gabriela.

Es de importancia señalar que, para cualquier obra civil o botadero, que es el enfoque de esta memoria, se proyecta y se construye bajo la premisa de un periodo de vida útil. Mientras mayor sea el tiempo de vida, mayor será la exposición que tenga el botadero a terremotos. Por ende, es de interés determinar el coeficiente sísmico asociado a la zona de PCMG, para las condiciones pseudoestática (sismo operacional y máximo probable) que se pretenden analizar.

De acuerdo con el interés de la presente memoria, en el ANEXO Ñ se especifica el desarrollo del cálculo del periodo de retorno y la aceleración. Por otra parte, bajo las condiciones que se enfrenta el análisis de estabilidad de los botaderos en condiciones pseudoestática, la Tabla 4.7 se muestra los valores de los coeficientes sísmicos correspondiente, sin embargo, en la figura se puede observar la curva que se genera con valores de coeficientes de sismicidad para cada magnitud de sismo sobre los 7 en el sector donde se emplaza el proyecto de continuidad mina Gabriela.

Tabla 4.7: Resultado coeficiente sísmico correspondiente PCMG

Condición	Magnitud sismo	Coeficiente sísmico
Sismo operacional	7,4	0,094
Sismo máximo probable	8,4	0,203

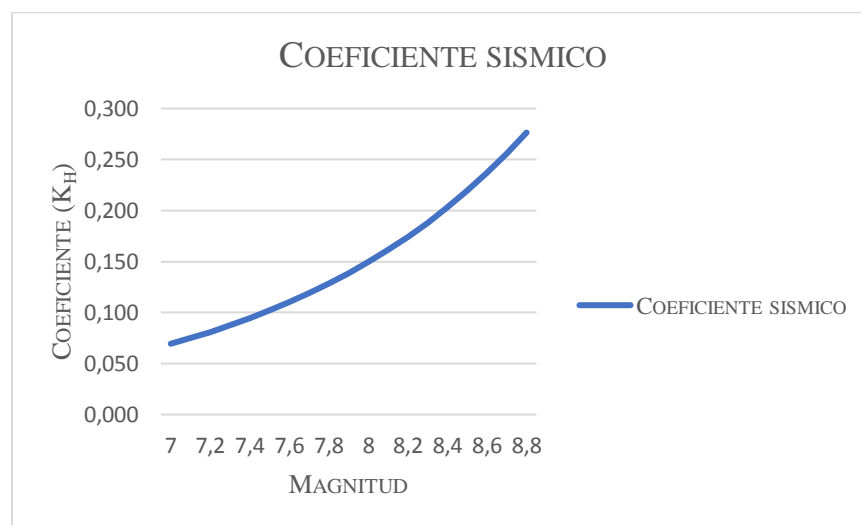


Figura 4.9: Coeficiente sísmico correspondiente a PCMG

5 RESULTADOS

5.1 Modelamiento numérico

Los resultados obtenidos para la Sección A correspondiente al Botadero China Sur, mediante la reducción de resistencia al corte (SSR) se aprecia en la Figura 5.1, donde para dicha sección se proyecta la trayectoria preferente de la rotura representada por la línea roja en la Figura 5.1. En el ANEXO A se adjunta todos los resultados obtenidos del análisis de SSR donde detalladamente se muestra la capacidad al trazar la deformación máxima frente a un factor de reducción de fuerza (SRF). Cabe señalar que a medida que el SRF aumenta las propiedades de resistencia disminuyen, por lo tanto, existe un efecto inversamente proporcional.

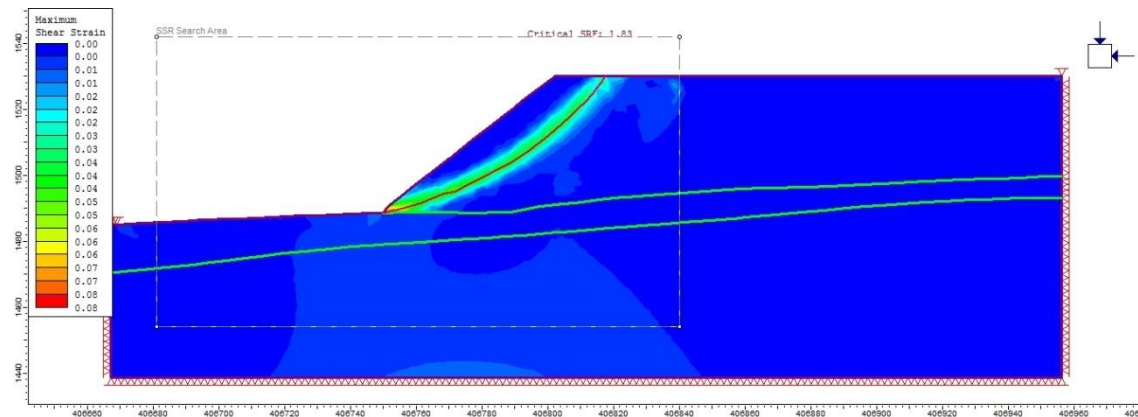


Figura 5.1: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección A del Botadero China Sur

Profundizando en lo anterior, a medida que las propiedades de resistencia se van reduciendo con cada iteración, el desplazamiento máximo de la deformación al corte va aumentando, lo cual desencadena en el comportamiento del análisis SSR un punto de no convergencia que se define como SRF crítico con un valor de 1,83 para la sección A como se muestra en la Figura 5.2. Además, cabe señalar que las propiedades de resistencia de los materiales que conforman el suelo de emplazamiento y del botadero se observan en la Tabla 5.1, los cuales producen un desplazamiento de 0,56 m. Finalmente, el SRF crítico corresponde al punto de inflexión, donde al aumentar el SRF el desplazamiento máximo a la deformación asociada al corte aumenta rápidamente como se muestra en Figura 5.2

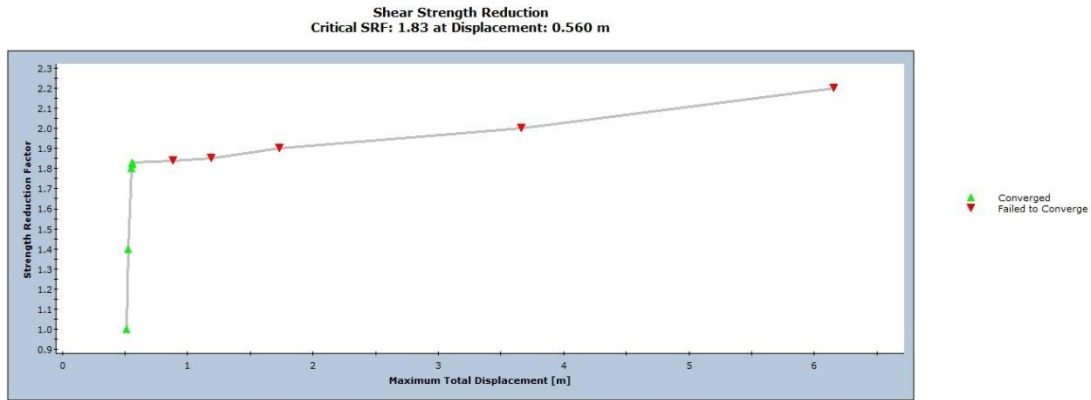


Figura 5.2: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección A

Tabla 5.1: Propiedades de resistencia reducidas para SRF crítico de la Sección A

Tipo de Material	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Botaderos	22,0	25
Gravas de Atacama	66,0	25
Andesita (Ocoíta)	551,9	46

Por otra parte, la sección B correspondiente al Botadero China Sur, tiene como resultado para el análisis de reducción de resistencia al corte (SSR) lo mostrado en la Figura 5.3, donde para la sección seleccionada se proyecta la trayectoria preferente de la rotura y la cual es representada por la línea roja en la Figura 5.3. En el ANEXO B se adjunta todos los resultados obtenidos del análisis de SSR donde detalladamente se muestran las capacidades de trazar las deformaciones máximas frente a distintos factores de reducción de fuerza (SRF).

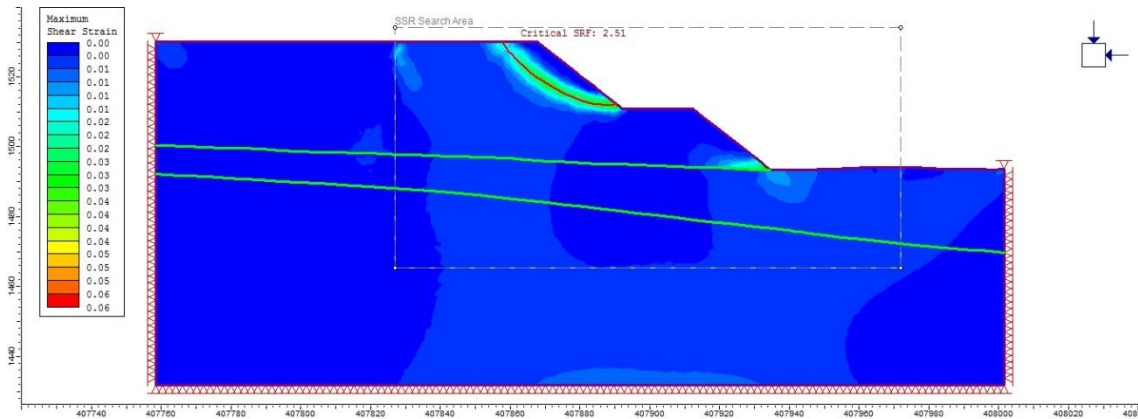


Figura 5.3: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección B del Botadero China Sur

A medida que las fuerzas de resistencia se van reduciendo en cada iteración el desplazamiento máximo de la deformación al corte aumenta, lo cual desencadena en el comportamiento del análisis SSR un punto de no convergencia que se define como SRF crítico, el cual se presenta en la Figura 5.4. El propósito de dicho factor es indicar que para la Sección B su SRF crítico corresponde a 2,51, donde la reducción de las propiedades de resistencia para los materiales que conforman el suelo de emplazamiento y el material del botadero se observan en la Tabla 5.2 , las cuales producen un desplazamiento de 0,64 m.

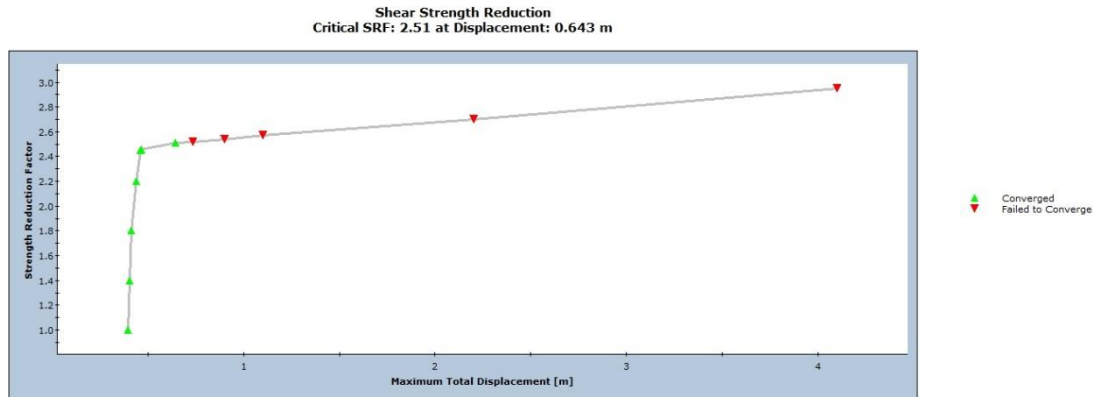


Figura 5.4: Gráfico de comportamiento entre el SRF crítico y el desplazamiento máximo para la Sección B

Tabla 5.2: Propiedades de resistencia reducidas para SRF crítico de la Sección B

Tipo de Material	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Botaderos	15,9	19
Gravas de Atacama	47,8	19
Andesita (Ocoíta)	402,4	37

Por otro lado, empleando el análisis de reducción de resistencia al corte (SSR) para la Sección C correspondiente al Botadero China Sur, se aprecia lo mostrado en la Figura 5.5 donde para la sección seleccionada se proyecta la trayectoria preferente de la rotura, la cual es representada por la línea roja en la Figura 5.5. En el ANEXO C se adjuntan todos los resultados obtenidos del análisis de SSR donde detalladamente se muestra la capacidad de trazar la deformación máxima frente a un factor de reducción de fuerza (SRF).

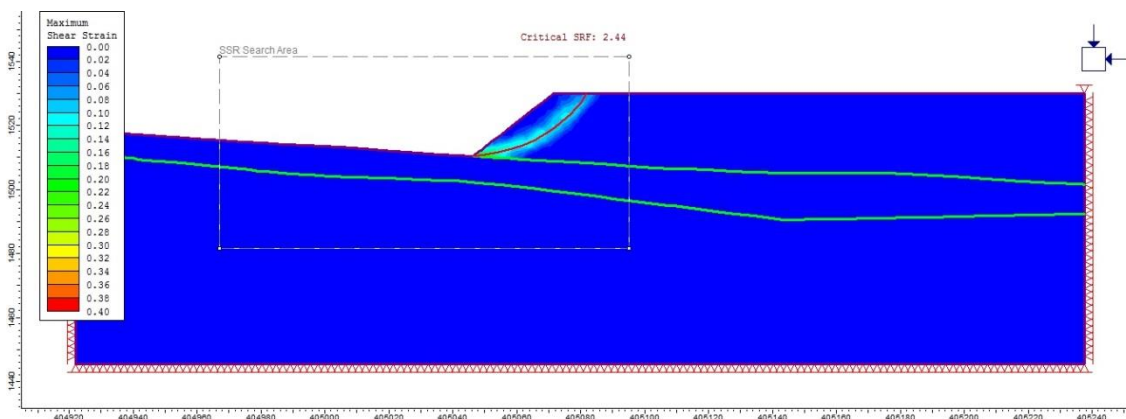


Figura 5.5: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección C del Botadero China Sur

A medida que las fuerzas de resistencia se van reduciendo con cada iteración, el desplazamiento máximo de la deformación al corte va aumentando, lo cual desencadena en el comportamiento del análisis SSR un punto de no convergencia que se define como SRF crítico, el cual se presenta en la Figura 5.6 , cuyo propósito es indicar que para la Sección C su SRF crítico corresponde a 2,44. Con relación a la reducción de la propiedades de resistencia para los materiales que conforman el suelo de emplazamiento y el Botadero China Sur se observan en Tabla 5.3, estas producen un desplazamiento de 0,20 m.

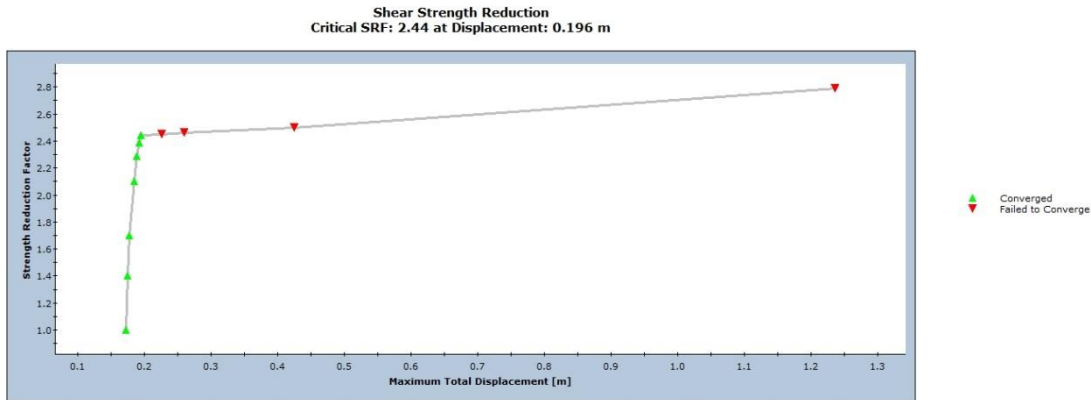


Figura 5.6: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección C

Tabla 5.3: Propiedades de resistencia reducidas para SRF crítico de la Sección C

Tipo de Material	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Botaderos	16,4	19
Gravas de Atacama	49,2	19
Andesita (Ocoíta)	413,9	38

El análisis de la reducción de la resistencia al corte (SSR) sobre Botadero China Sur, por medio de las secciones A, B y C permite evidenciar que la sección B correspondiente a la zona sur es la de mayor inestabilidad, dado que presenta el mayor SRF y desplazamiento tomando valores de 2,51 y 0,64 m respectivamente. No obstante, cabe señalar que la sección A ubicada en zona noroeste tiene un desplazamiento de 0,56 m representando un 87,5% del mayor desplazamiento, por lo cual, se debe estudiar el impacto de dicho desplazamiento para la zona emplazada en la sección A.

Con relación a la Sección D correspondiente al botadero Japón/India, se obtiene el comportamiento mostrado en la Figura 5.7 empleando un análisis de reducción de la resistencia al corte (SSR), donde se evidencia una mayor demarcación de la trayectoria de rotura. En el ANEXO D se adjunta todos los resultados obtenidos del análisis de SSR donde detalladamente se muestra la capacidad de trazar la deformación máxima frente a diferentes factores de reducción de fuerza (SRF).

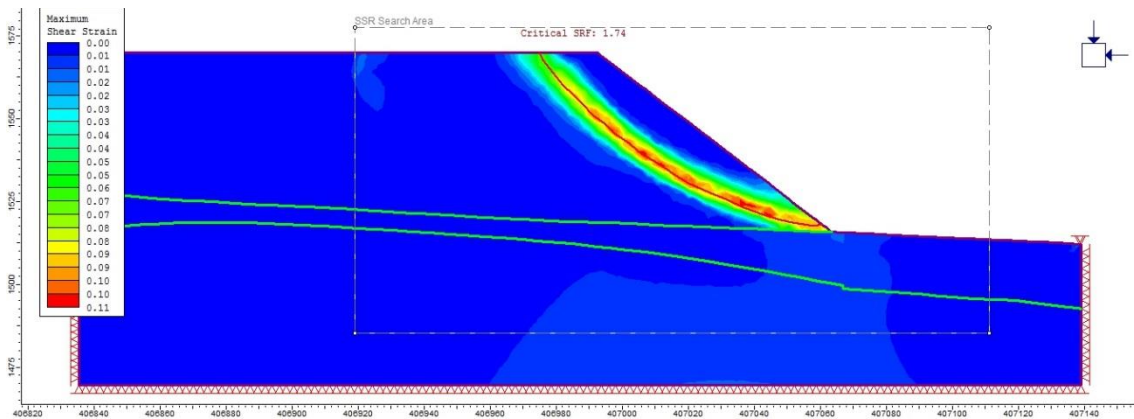


Figura 5.7: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección D del Botadero Japón/India

A medida que las fuerzas de resistencia se van reduciendo con cada iteración, el desplazamiento máximo de la deformación al corte va aumentando, lo cual desencadena en el comportamiento del análisis SSR un punto de no convergencia que se define como SRF crítico, el cual se presenta en la Figura 5.8 y cuyo propósito es indicar que para la sección D su SRF crítico corresponde a 1,74 donde la reducción de la propiedades de resistencia para los materiales que conforman el suelo de emplazamiento y el material del botadero se observan en la Tabla 5.4 y el cual produce un desplazamiento de 0,74 m. desde su SRF crítico corresponde a su punto de inflexión donde al aumentar el SRF el desplazamiento máximo a la deformación al corte aumenta rápidamente.

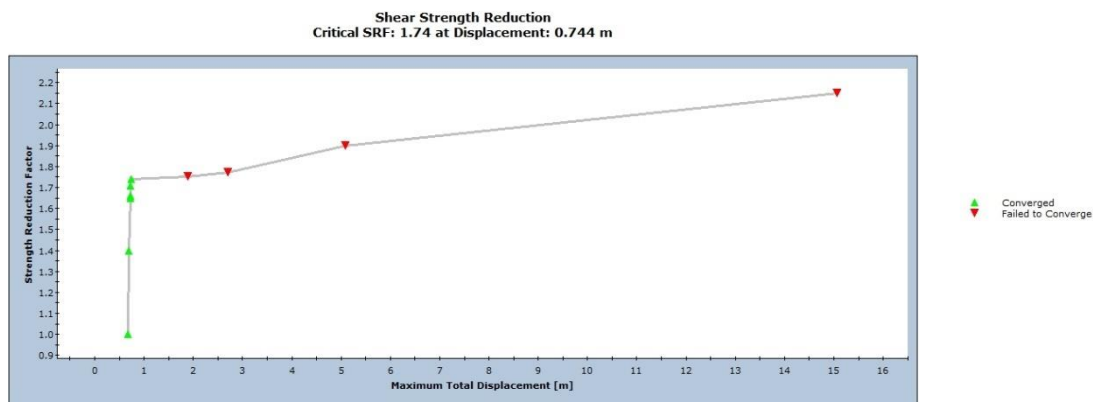


Figura 5.8: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección D

Tabla 5.4: Propiedades de resistencia reducidas para SRF crítico de la Sección D

Tipo de Material	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Botaderos	23,0	26
Gravas de Atacama	69,0	26
Andesita (Ocoíta)	629,9	46

Para la Sección E que corresponde al Botadero Japón/India los resultados obtenidos, como se mencionó con anterioridad, mediante la reducción de resistencia al corte (SSR), se aprecia en la Figura 5.9, donde para la sección se proyecta la trayectoria preferente de la rotura representada por la línea roja en la Figura 5.9. En el ANEXO E se adjunta todos los resultados obtenidos del análisis de SSR donde detalladamente se muestra la capacidad de trazar la deformación máxima frente a diferentes factores de reducción de fuerza (SRF).

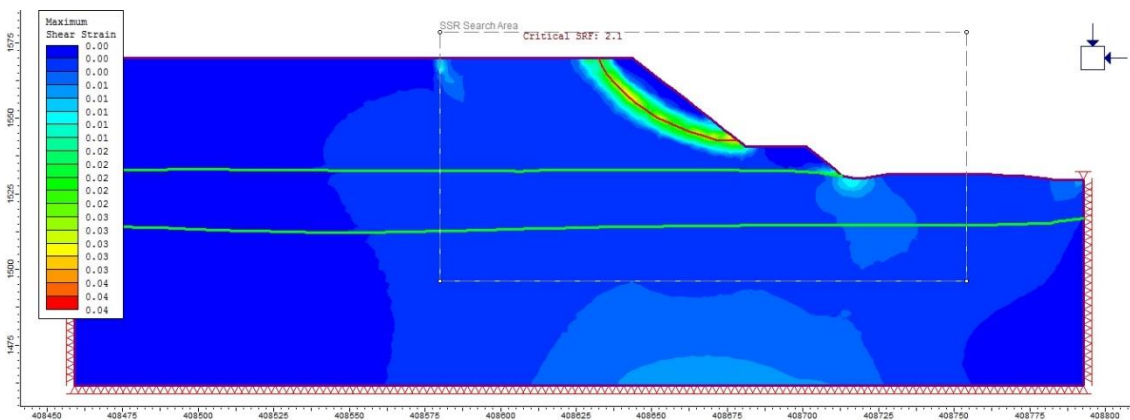


Figura 5.9: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección E del Botadero Japón/India

A medida que las fuerzas de resistencia se van reduciendo con cada iteración, el desplazamiento máximo de la deformación al corte va aumentando, lo cual desencadena en el comportamiento del análisis SSR un punto de no convergencia que se define como SRF crítico, el cual se presenta en la Figura 5.10 y cuyo propósito es indicar que para la sección E su SRF crítico corresponde a 2,10 donde la reducción de la propiedades de resistencia para los materiales que conforman el suelo de emplazamiento y el material del botadero se observan en la Tabla 5.5 y el cual produce un desplazamiento de 0,55 m. desde su SRF crítico corresponde a su punto de inflexión donde al aumentar el SRF el desplazamiento máximo a la deformación al corte aumenta rápidamente.

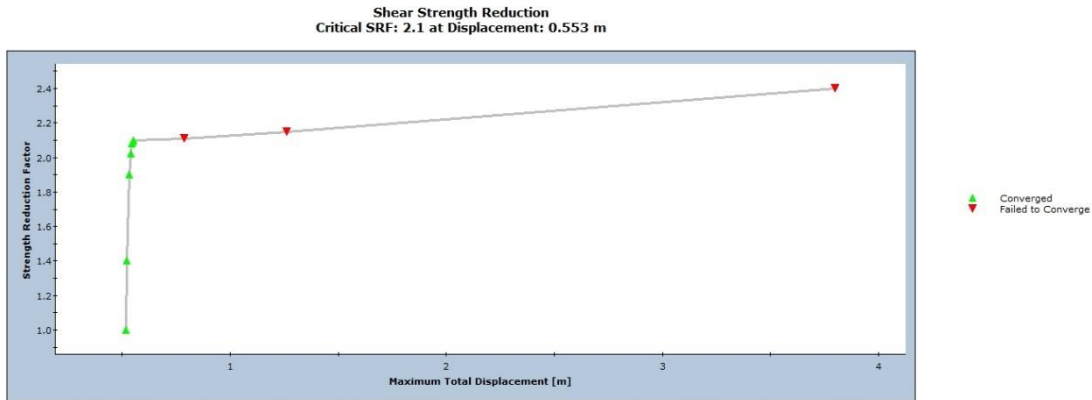


Figura 5.10: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección E

Tabla 5.5: Propiedades de resistencia reducidas para SRF crítico de la Sección E

Tipo de Material	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Botaderos	19,1	22
Gravas de Atacama	57,1	22
Andesita (Ocoíta)	521,9	40

Para la Sección F correspondiente al Botadero Japón/India los resultados obtenidos, como se mencionó con anterioridad, mediante la reducción de resistencia al corte (SSR), se aprecia en la Figura 5.11, donde para la sección se proyecta la trayectoria preferente de la rotura representada por la línea roja en la Figura 5.11. En el ANEXO F se adjunta todos los resultados obtenidos del análisis de SSR donde detalladamente se muestra la capacidad de trazar la deformación máxima frente a un factor de reducción de fuerza (SRF).

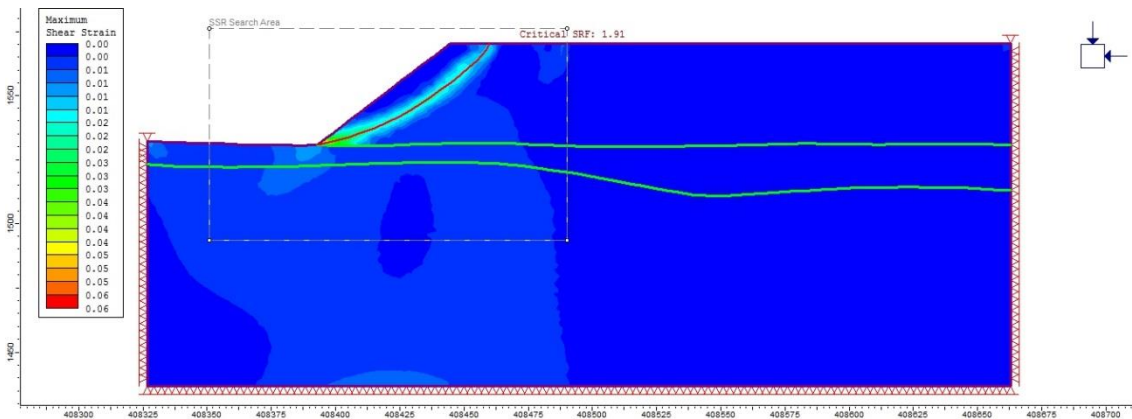


Figura 5.11: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección F del Botadero Japón/India

A medida que las fuerzas de resistencia se van reduciendo con cada iteración, el desplazamiento máximo de la deformación al corte va aumentando, lo cual desencadena en el comportamiento del análisis SSR un punto de no convergencia que se define como SRF crítico, el cual se presenta en la Figura 5.12 y cuyo propósito es indicar que para la sección F su SRF crítico corresponde a 1,91 donde la reducción de la propiedades de resistencia para los materiales que conforman el suelo de emplazamiento y el material del botadero se observan en la Tabla 5.6 y el cual produce un desplazamiento de 0,65 m. desde su SRF crítico corresponde a su punto de inflexión donde al aumentar el SRF el desplazamiento máximo a la deformación al corte aumenta rápidamente.

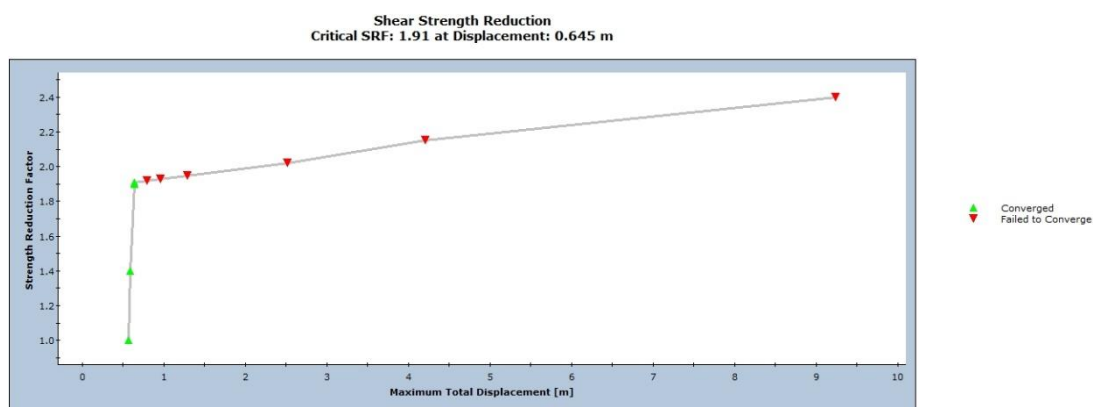


Figura 5.12: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección F

Tabla 5.6: Propiedades de resistencia reducidas para SRF crítico de la Sección F

Tipo de Material	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Botaderos	20,9	24
Gravas de Atacama	68,8	24
Andesita (Ocoíta)	570,7	43

El análisis de la reducción de la resistencia al corte (SSR) sobre Botadero Japón/India, por medio de las secciones D, E y F permite evidenciar que la sección D correspondiente a la zona noroeste es la de mayor inestabilidad, dado que presenta el menor SRF y mayor desplazamiento tomando valores de 1,74 y 0,74 m respectivamente.

En cuanto para la Sección G correspondiente al Botadero Tailandia los resultados obtenidos, como se mencionó con anterioridad, mediante la reducción de resistencia al corte (SSR), se aprecia en la Figura 5.13, donde para la sección se proyecta la trayectoria preferente de la rotura representada por la línea roja en la Figura 5.13. En el ANEXO G se adjunta todos los

resultados obtenidos del análisis de SSR donde detalladamente se muestra la capacidad de trazar la deformación máxima frente a un factor de reducción de fuerza (SRF).

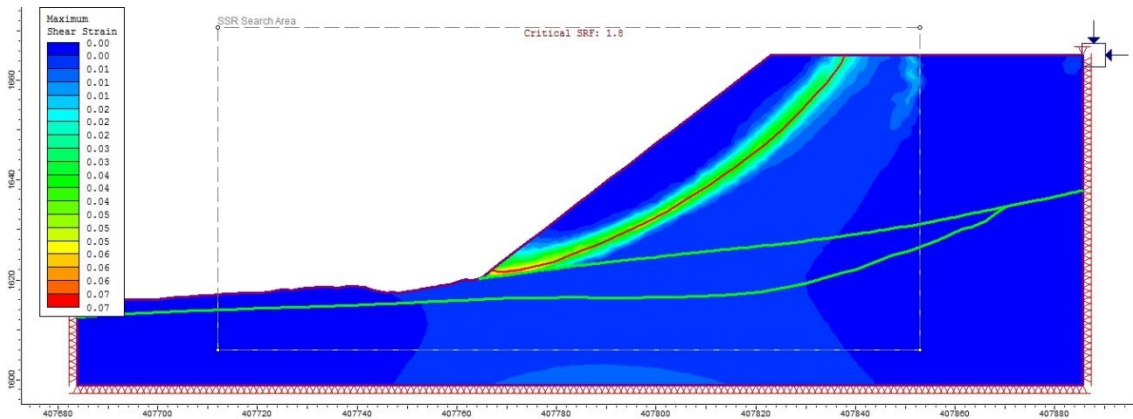


Figura 5.13: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección G del Botadero Tailandia

A medida que las fuerzas de resistencia se van reduciendo con cada iteración, el desplazamiento máximo de la deformación al corte va aumentando, lo cual desencadena en el comportamiento del análisis SSR un punto de no convergencia que se define como SRF crítico, el cual se presenta en la Figura 5.14 y cuyo propósito es indicar que para la Sección G su SRF crítico corresponde a 1,80 donde la reducción de las propiedades de resistencia para los materiales que conforman el suelo de emplazamiento y el material del Botadero Tailandia se observan en la Tabla 5.7 y produce un desplazamiento de 0,34 m.

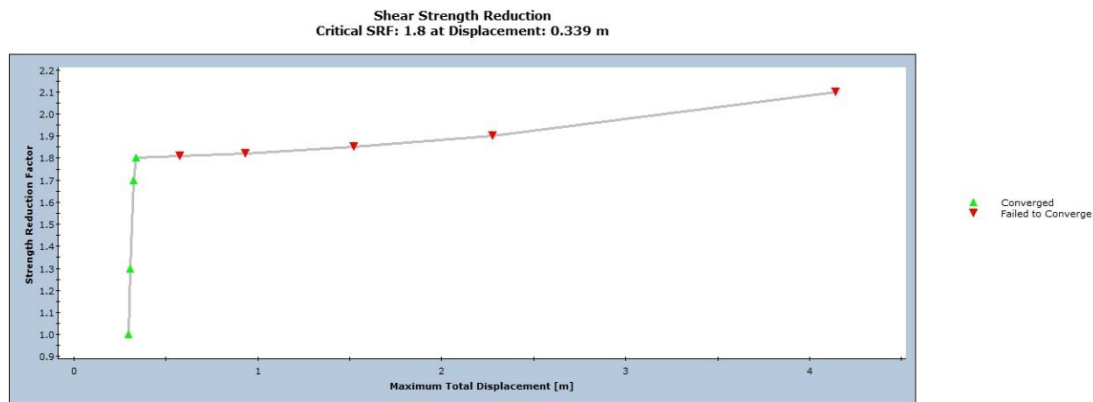


Figura 5.14: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento máximo para la Sección G

Tabla 5.7: Propiedades de resistencia reducidas para SRF crítico de la Sección G

Tipo de Material	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Botaderos	22,2	25
Gravas de Atacama	66,7	25
Andesita (Ocoíta)	572,8	46

Para la Sección H los resultados obtenidos, como se mencionó con anterioridad, mediante la reducción de resistencia al corte (SSR), se aprecia en la Figura 5.15, donde para la sección se proyecta la trayectoria preferente de la rotura representada por la línea roja en la Figura 5.15. En el ANEXO H se adjunta todos los resultados obtenidos del análisis de SSR donde detalladamente se muestra la capacidad de trazar la deformación máxima frente a un factor de reducción de fuerza (SRF).

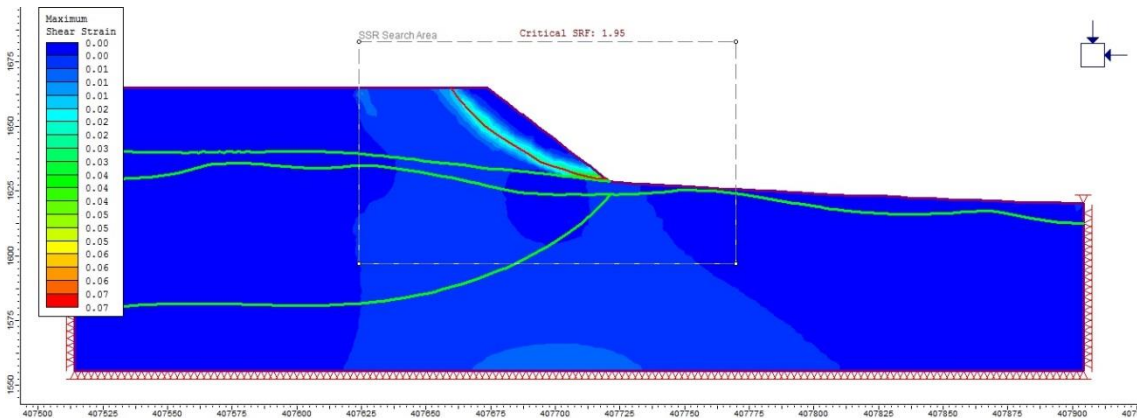


Figura 5.15: Resultado análisis SSR correspondiente a la Sección H del Botadero Tailandia

Considerando lo anterior, a medida que las fuerzas de resistencia se van reduciendo con cada iteración, el desplazamiento máximo de la deformación al corte va aumentando, lo cual desencadena en el comportamiento del análisis SSR un punto de no convergencia que se define como SRF crítico, el cual se presenta en la Figura 5.16 y cuyo propósito es indicar que para la sección H su SRF crítico corresponde a 1,95 donde la reducción de las propiedades de resistencia para los materiales que conforman el suelo de emplazamiento y el material del botadero se observan en la Tabla 8.8 y el cual produce un desplazamiento de 0,66 m.

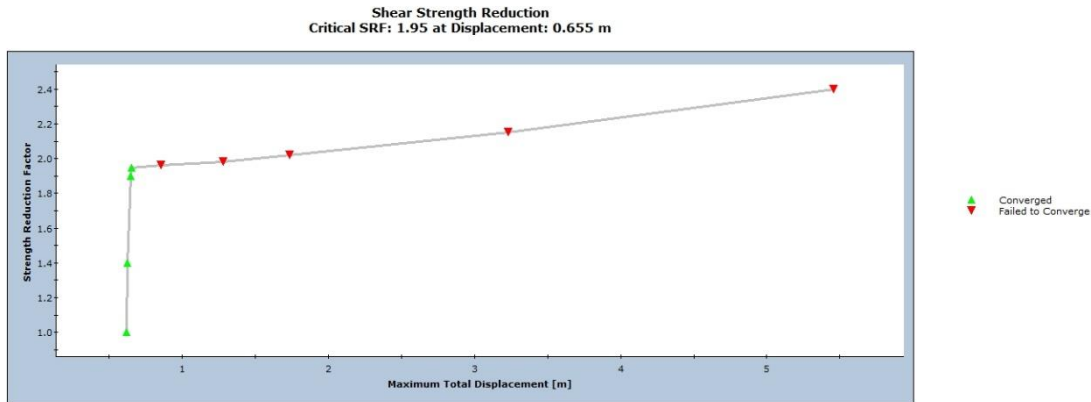


Figura 5.16: Gráfico de comportamiento entre el SRF y el desplazamiento para la Sección H

Tabla 5.8: Propiedades de resistencia reducidas para SRF crítico de la Sección H

Tipo de Material	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Botaderos	20,5	23
Gravas de Atacama	61,5	23
Andesita (Ocoña)	481,6	46
Brecha Tobácea	528,7	44

Finalmente, para el análisis de la reducción de la resistencia al corte (SSR) sobre Botadero Tailandia, por medio de las secciones G y H permite evidenciar que la sección G correspondiente a la zona suroeste es la de mayor inestabilidad, dado que presenta el menor SRF y un desplazamiento tomando valores de 1,80 y 0,34 m respectivamente. No obstante, cabe señalar que la sección H ubicada en la zona sureste tiene un desplazamiento de 0,66 m representando un 51,5% del mayor desplazamiento, por lo cual, se debe estudiar el impacto de dicho desplazamiento para la zona emplazada en la sección H.

5.2 Método de equilibrio limite

El objetivo principal es evaluar el plano preferente de la falla que se obtuvo mediante el modelamiento numérico y analizar como falla compuesta o falla no circular. esto debido a que lo conforman una serie de fallas que pueden ser desde circular en algunos tramos como también planar en otros.

En la Figura 5.17, Figura 5.18 y Figura 5.19 se observa para la Sección A del Botadero China Sur los factores de seguridad correspondiente a las condiciones estática y pseudoestática (sismo operacional y máximo probable) cuyos resultados son 1,93, 1,62 y 1,36 respectivamente, mediante el método de GLE/Morgenstern-Price. En el Anexo I se adjunta detalladamente los factores de seguridad y probabilidad de falla obtenidos mediante el método de Bishop, Janbu y Spencer.

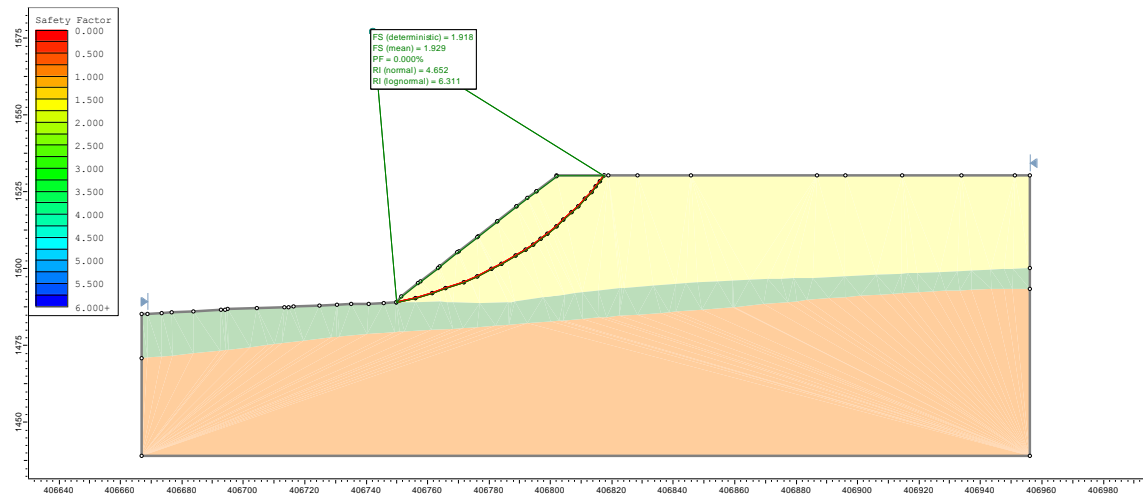


Figura 5.17: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección A del Botadero China Sur

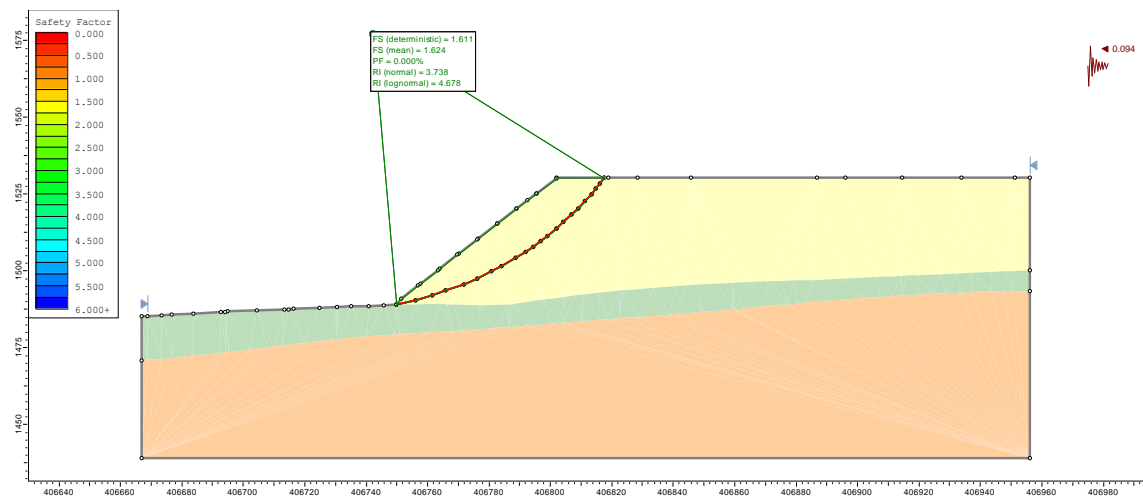


Figura 5.18: Análisis de estabilidad sísmica operacional de falla no circular para la sección A del Botadero China Sur

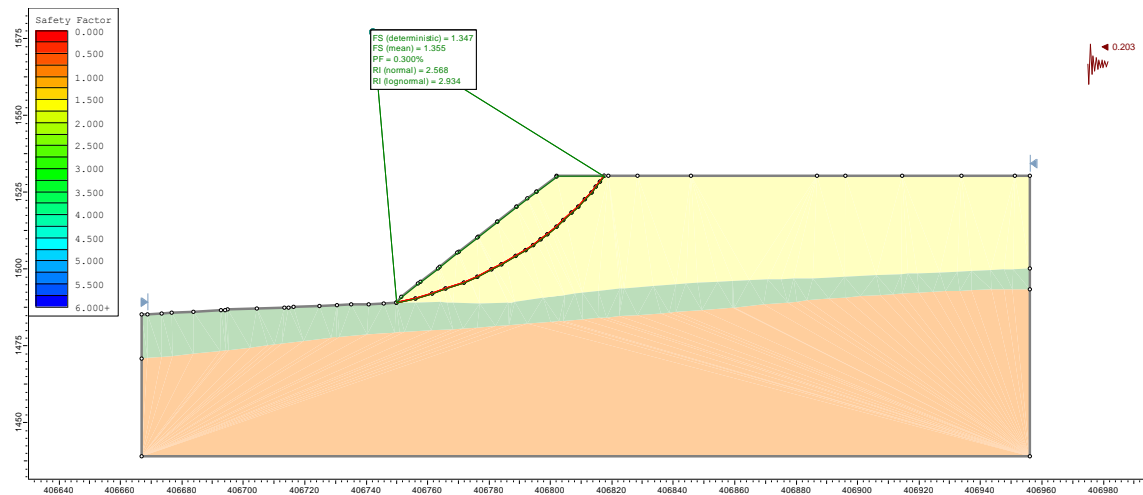


Figura 5.19: Análisis de estabilidad sísmo máximo probable de falla no circular para la sección A del Botadero China Sur

En la Figura 5.20, Figura 5.21 y Figura 5.22 se observa para la Sección B del Botadero China Sur los factores de seguridad correspondiente a las condiciones estática y pseudoestática (sismo operacional y máximo probable) cuyos resultados son 2,57, 2,17 y 1,82 respectivamente, mediante el método de GLE/Morgenstern-Price. En el Anexo I se adjunta detalladamente los factores de seguridad y probabilidad de falla obtenidos mediante el método de Bishop, Janbu y Spencer.

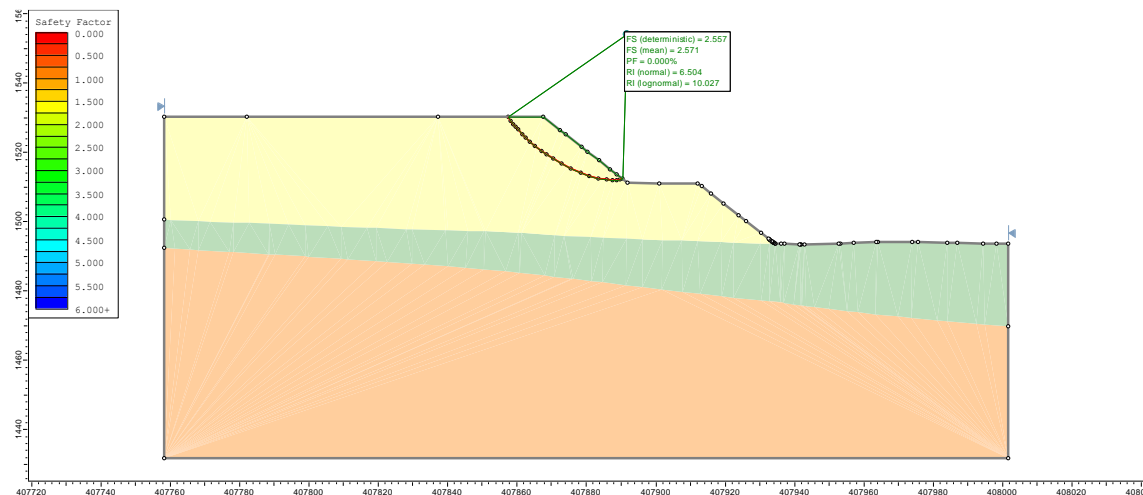


Figura 5.20: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección B del Botadero China Sur

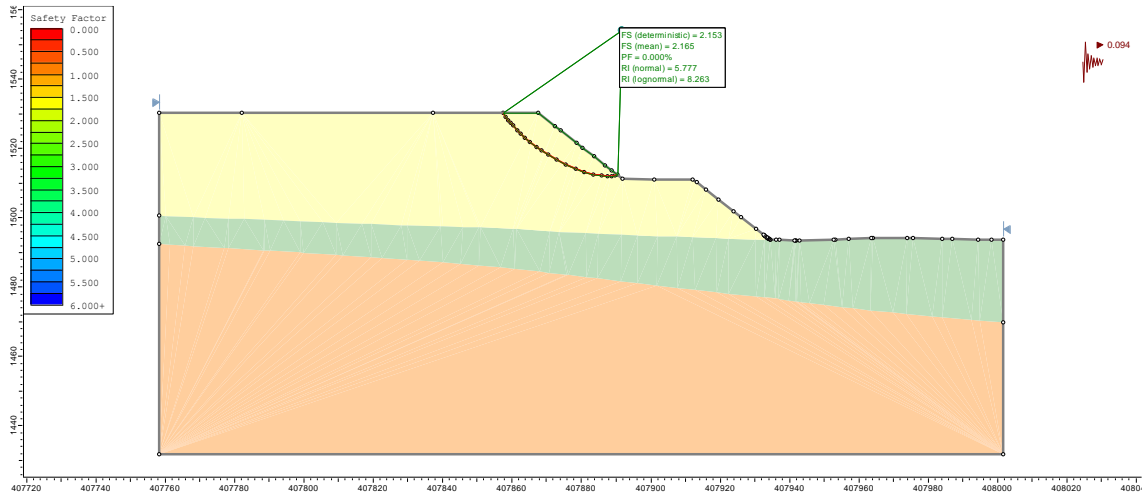


Figura 5.21: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección B del Botadero China Sur

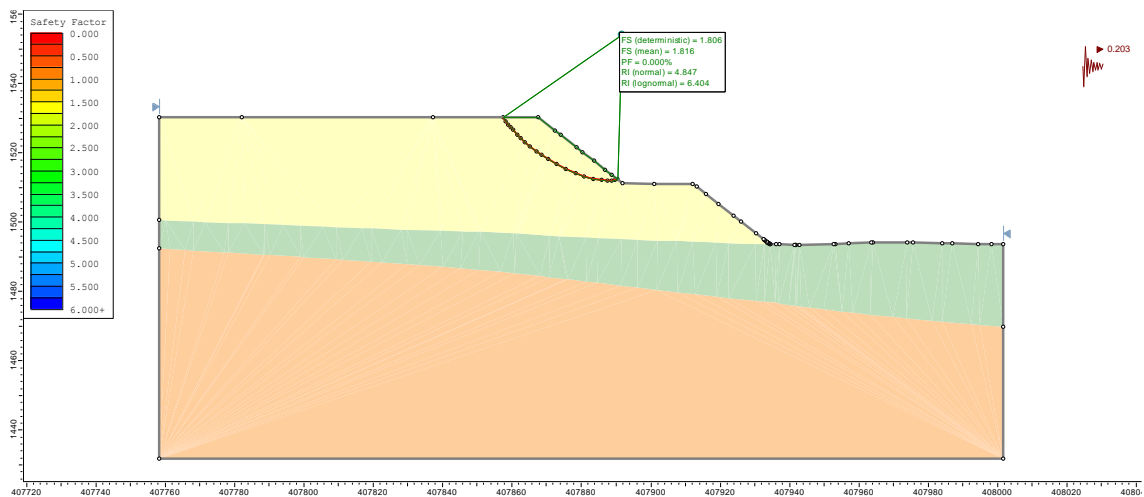


Figura 5.22: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección B del Botadero China Sur

En la Figura 5.23, Figura 5.24 y Figura 5.25, se observa para la Sección C del Botadero China Sur los factores de seguridad correspondiente a las condiciones estática y pseudoestática (sismo operacional y máximo probable) cuyos resultados son 2,57, 2,17 y 1,81 respectivamente, mediante el método de GLE/Morgenstern-Price. En el Anexo I se adjunta detalladamente los factores de seguridad y probabilidad de falla obtenidos mediante el método de Bishop, Janbu y Spencer.

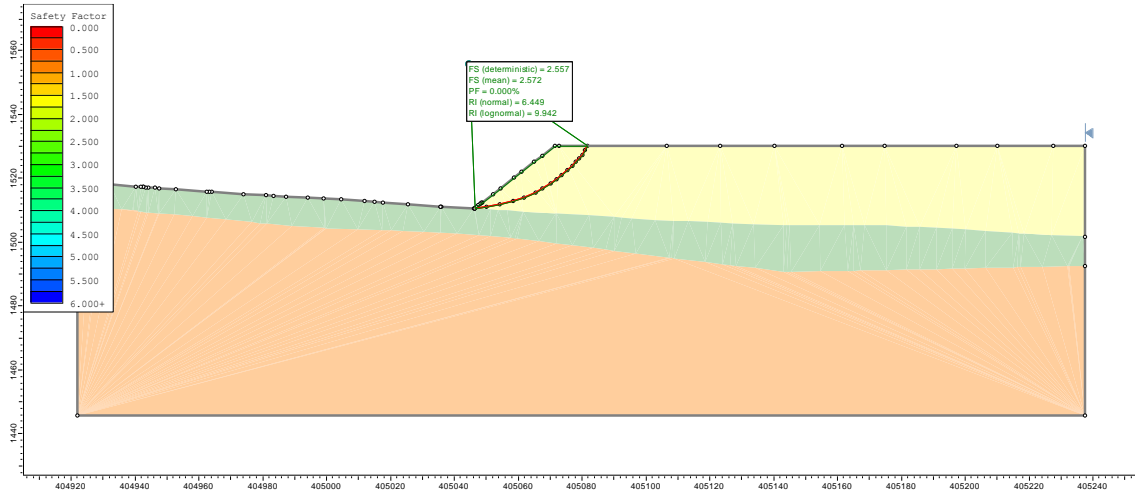


Figura 5.23: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección C del Botadero China Sur

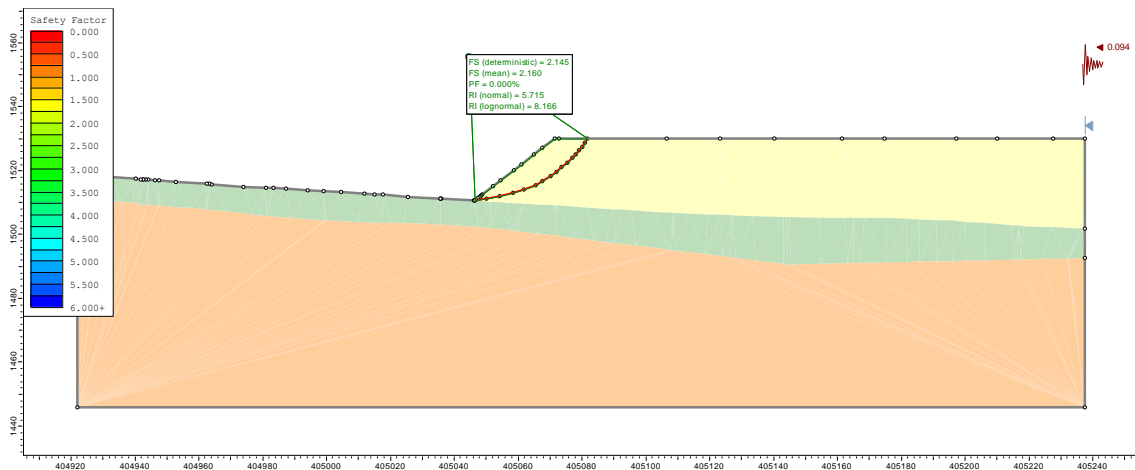


Figura 5.24: Análisis de estabilidad sísmo operacional de falla no circular para la sección C del Botadero China Sur

En síntesis, las secciones A, B y C representativas del Botadero China Sur permiten concluir que dicho botadero es estable las condiciones estática y pseudoestática (sísmo operacional y máximo probable), dado que el umbral para el Factor de Seguridad es de 1,2 en su condición estática, en cuanto para su condición pseudoestática de sísmo operacional y sísmo máximo probable es 1,1 y 1,0 respectivamente. Por otra parte, las probabilidades de falla obtenidas, en condiciones estáticas y pseudoestática, ningún caso excede el umbral establecido por criterios de aceptabilidad que corresponde para condiciones estática un valor sobre 10% y para las condiciones estática y pseudoestática valores sobre el 25% y 50% en los casos de sísmo operacional y máximo probable respectivamente.

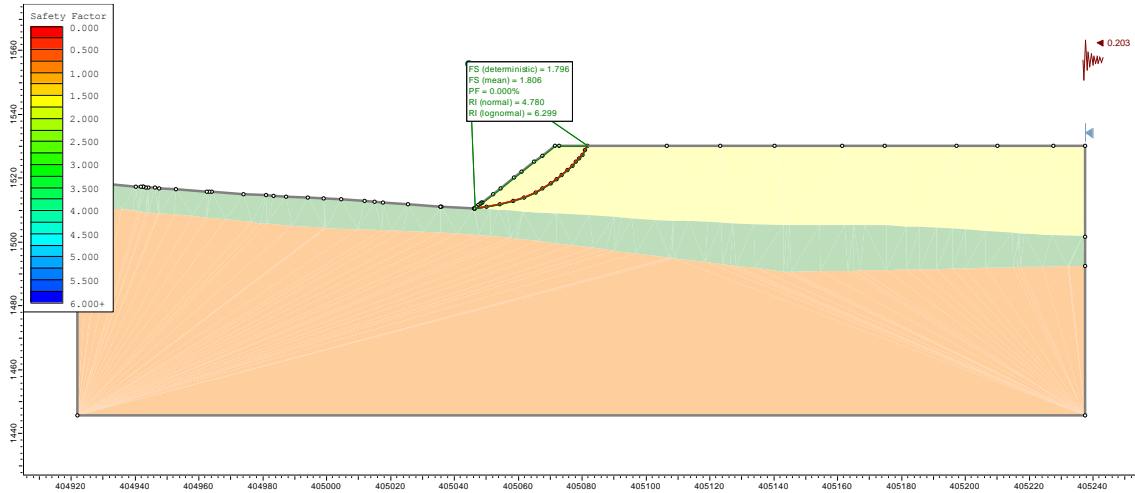


Figura 5.25: Análisis de estabilidad sísmo máximo probable de falla no circular para la sección C del Botadero China Sur

En la Figura 5.26, Figura 5.27 y Figura 5.28, se observa para la Sección D del Botadero Japón/India los factores de seguridad correspondiente a las condiciones estática y pseudoestática (sismo operacional y máximo probable) cuyos resultados son 1,84, 1,55 y 1,29 respectivamente, mediante el método de GLE/Morgenstern-Price. En el Anexo I se adjunta detalladamente los factores de seguridad y probabilidad de falla obtenidos mediante el método de Bishop, Janbu y Spencer.

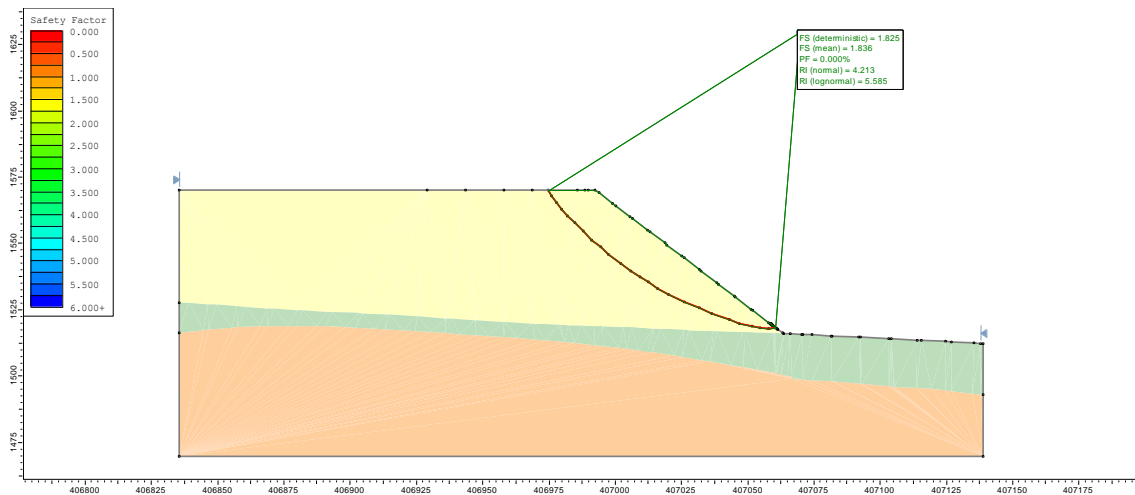


Figura 5.26: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección D del Botadero Japón/India

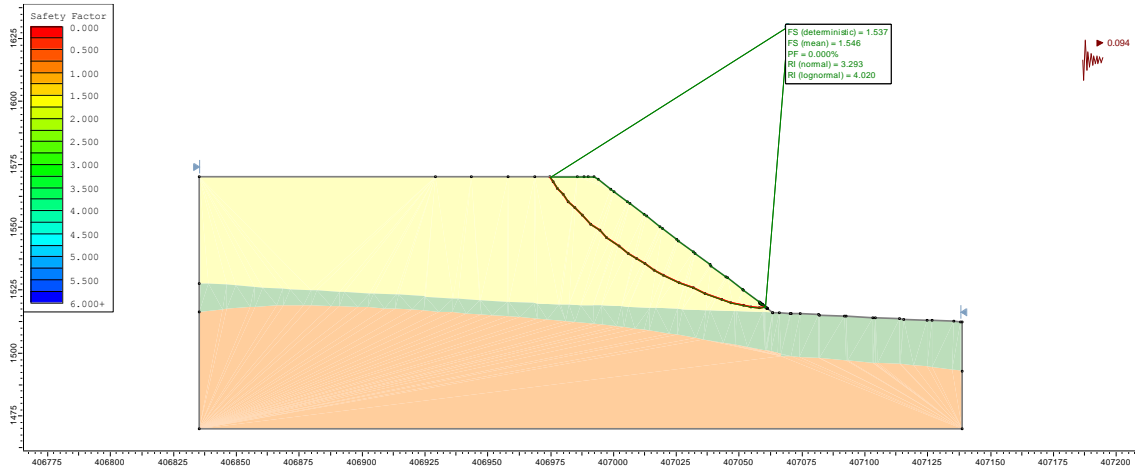


Figura 5.27: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección D del Botadero Japón/India

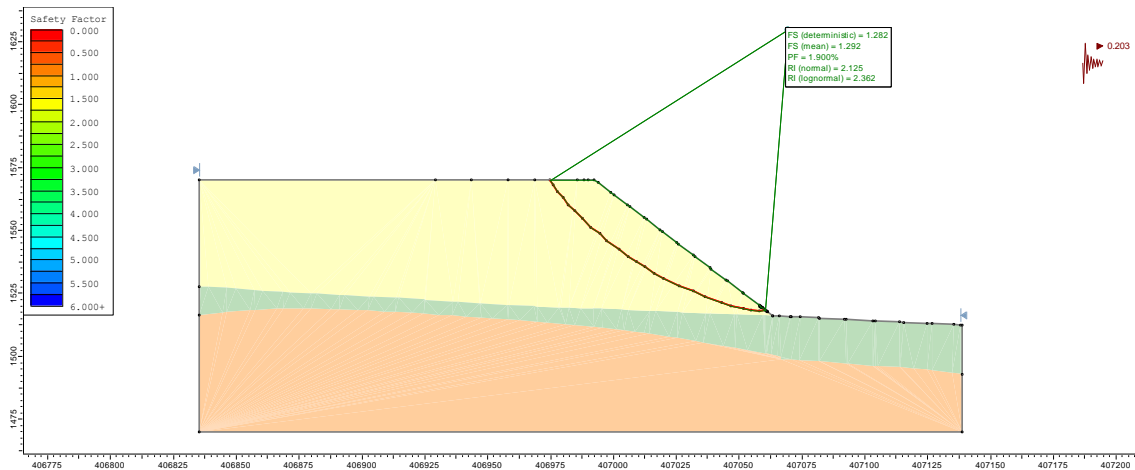


Figura 5.28: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección D del Botadero Japón/India

En la Figura 5.29, Figura 5.30 y Figura 5.31, se observa para la Sección E del Botadero Japón/India los factores de seguridad correspondiente a las condiciones estática y pseudoestática (sismo operacional y máximo probable) cuyos resultados son 2,21, 1,87 y 1,57 respectivamente, mediante el método de GLE/Morgenstern-Price. En el Anexo I se adjunta detalladamente los factores de seguridad y probabilidad de falla obtenidos mediante el método de Bishop, Janbu y Spencer.

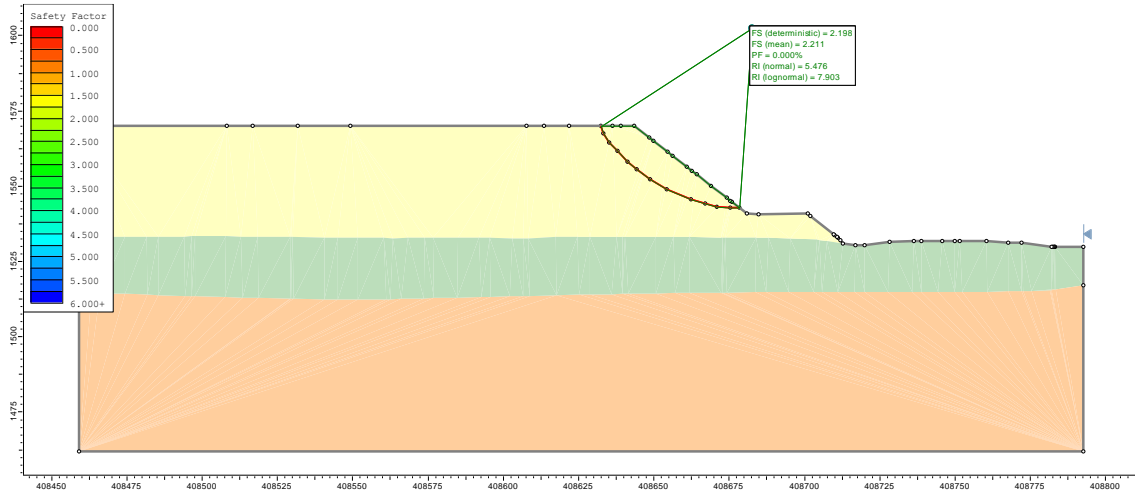


Figura 5.29: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección E del Botadero Japón/India

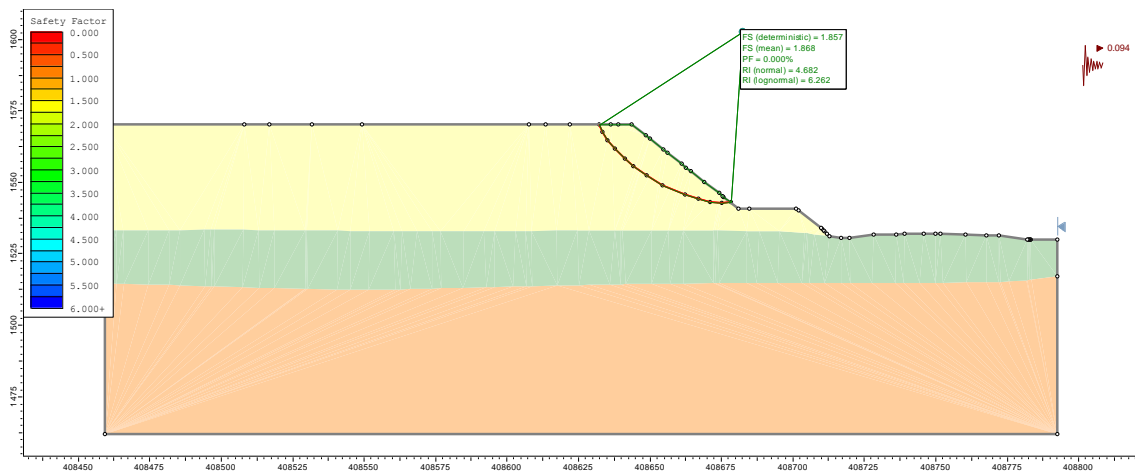


Figura 5.30: Análisis de estabilidad sísmo operacional de falla no circular para la sección E del Botadero Japón/India

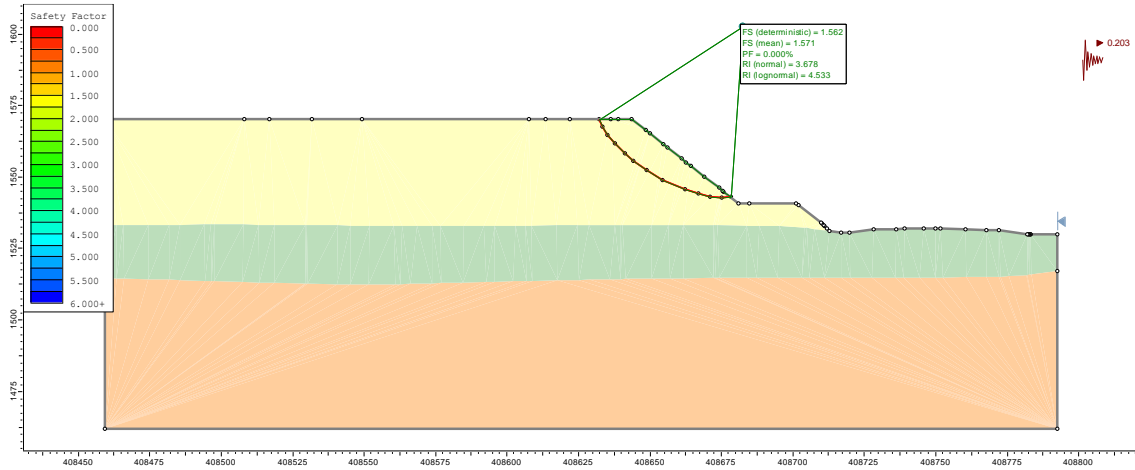


Figura 5.31: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección E del Botadero Japón/India

En la Figura 5.32, Figura 5.33 y Figura 5.34, se observa para la Sección F del Botadero Japón/India los factores de seguridad correspondiente a las condiciones estática y pseudoestática (sismo operacional y máximo probable) cuyos resultados son 2,02, 1,69 y 1,41 respectivamente, mediante el método de GLE/Morgenstern-Price. En el Anexo I se adjunta detalladamente los factores de seguridad y probabilidad de falla obtenidos mediante el método de Bishop, Janbu y Spencer.

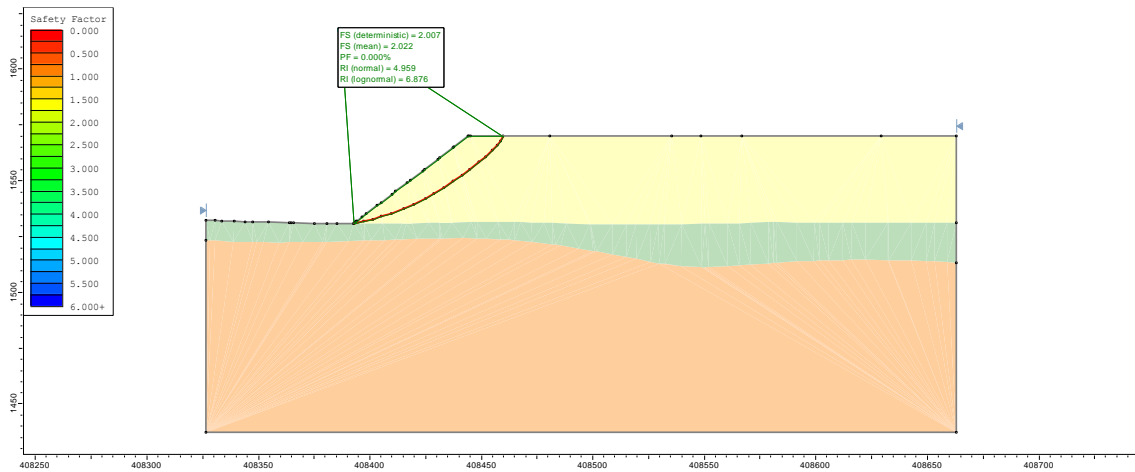


Figura 5.32: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección F del Botadero Japón/India

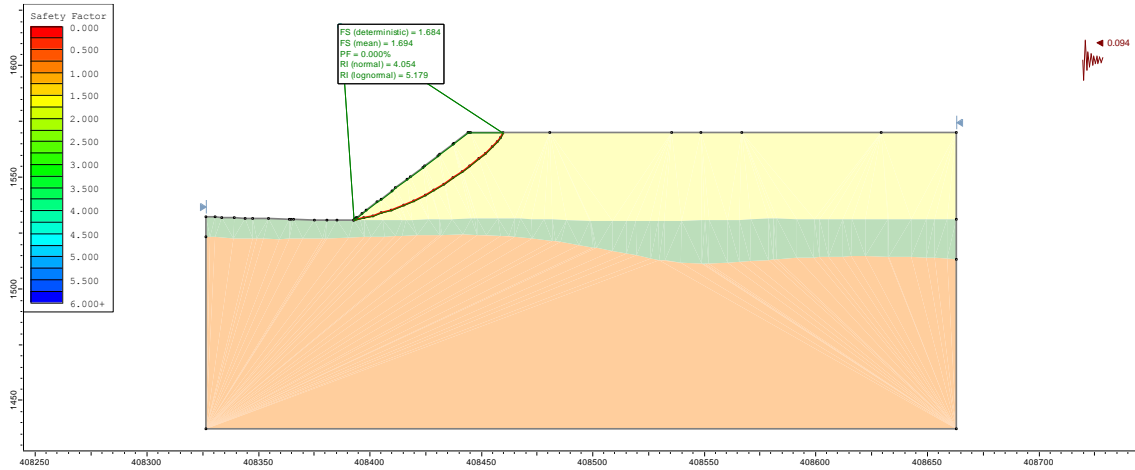


Figura 5.33: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección F del Botadero Japón/India

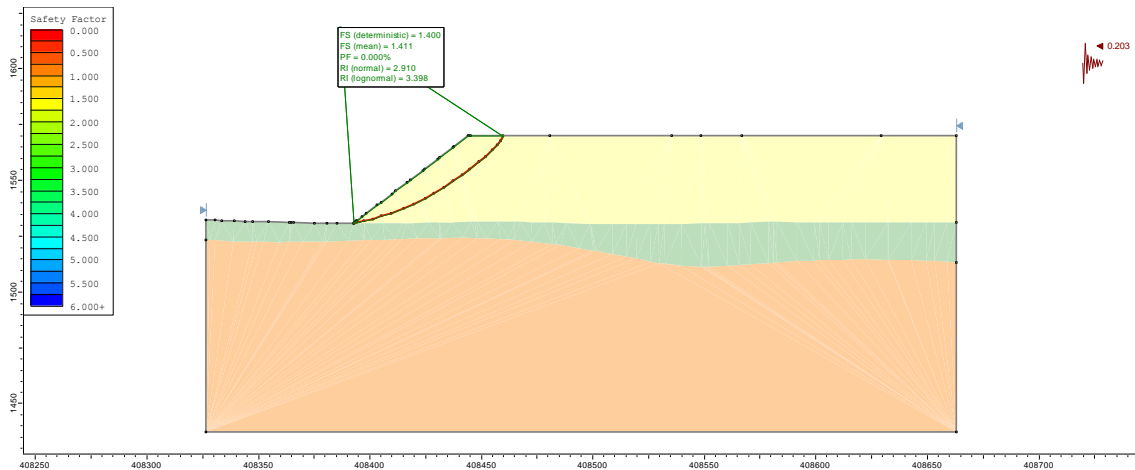


Figura 5.34: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección F del Botadero Japón/India

En síntesis, las secciones D, E y F representativas del Botadero Japón/India permiten concluir que dicho botadero es estable en condiciones estática y pseudoestática (sismo operacional y máximo probable), dado que el umbral para el Factor de Seguridad en condición estática es de 1,2 y para las condiciones pseudoestática de sismo operacional y sismo máximo probable corresponden a 1,1 y 1,0 respectivamente. En cuanto a las probabilidades de falla obtenidas, en condiciones estáticas y pseudoestática, ningún caso excede el umbral establecido por criterios de aceptabilidad que corresponde para condiciones estática un valor sobre 10% y para las condiciones estática y pseudoestática valores sobre el 25% y 50% en los casos de sismo operacional y máximo probable respectivamente.

En la Figura 5.35, Figura 5.36 y Figura 5.37, se observa para la Sección G del Botadero Tailandia los factores de seguridad correspondiente a las condiciones estática y pseudoestática (sismo operacional y máximo probable) cuyos resultados son 1,91, 1,60 y 1,34 respectivamente, mediante el método de GLE/Morgenstern-Price. En el Anexo I se adjunta detalladamente los factores de seguridad y probabilidad de falla obtenidos mediante el método de Bishop, Janbu y Spencer.

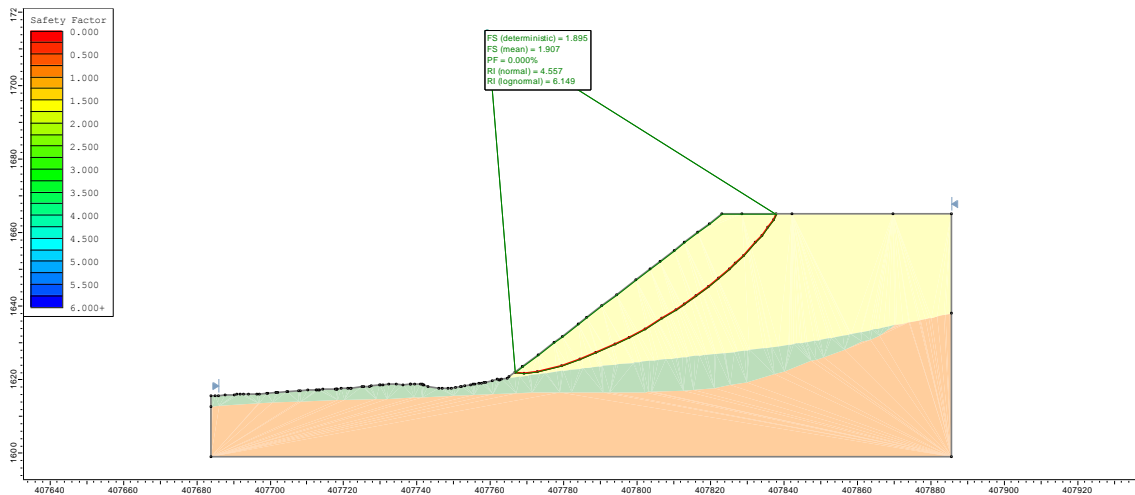


Figura 5.35: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección G del Botadero Tailandia

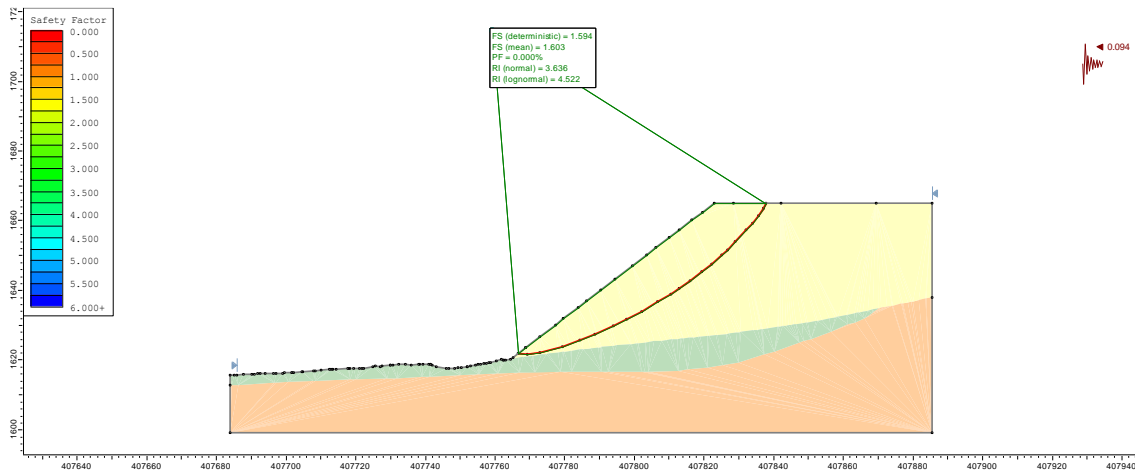


Figura 5.36: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección G del Botadero Tailandia

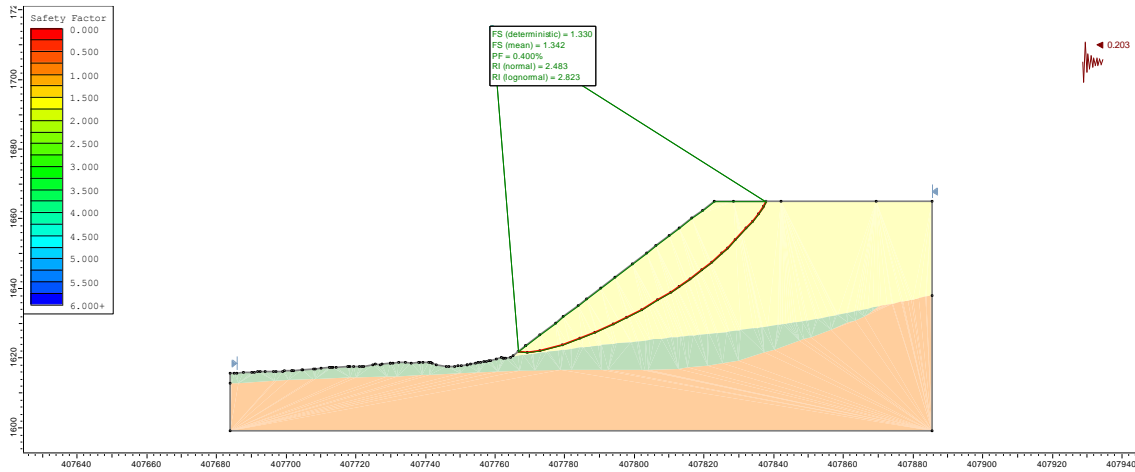


Figura 5.37: Análisis de estabilidad sísmo máximo probable de falla no circular para la sección G del Botadero Tailandia

En la Figura 5.38, Figura 5.39 y Figura 5.40, se observa para la Sección H del Botadero Tailandia los factores de seguridad correspondiente a las condiciones estática y pseudoestática (sísmo operacional y máximo probable) cuyos resultados son 2,06, 1,73 y 1,45 respectivamente y mediante el método de GLE/Morgenstern-Price. En el Anexo I se adjunta detalladamente los factores de seguridad y probabilidad de falla obtenidos mediante el método de Bishop, Janbu y Spencer.

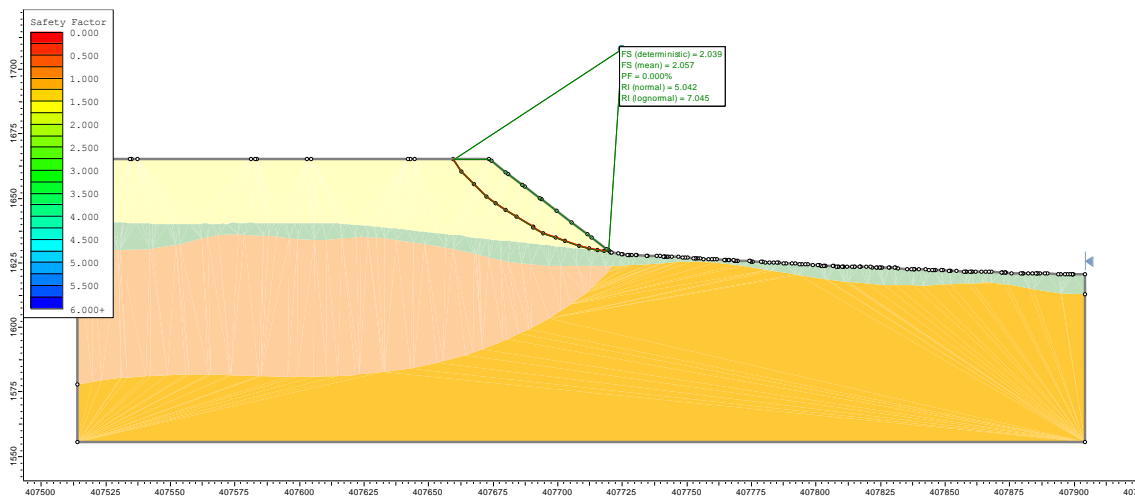


Figura 5.38: Análisis de estabilidad estático de falla no circular para la sección H del Botadero Tailandia

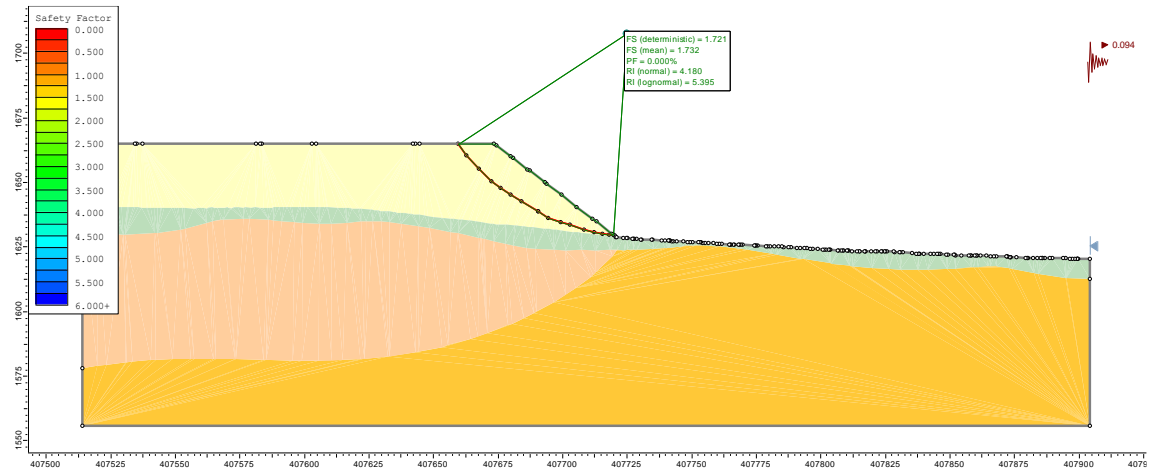


Figura 5.39: Análisis de estabilidad sismo operacional de falla no circular para la sección H del Botadero Tailandia

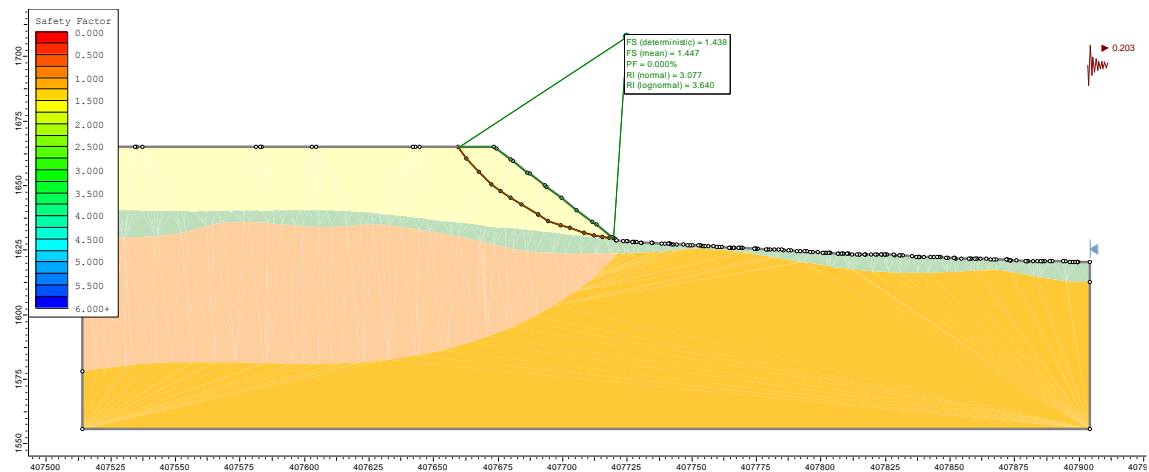


Figura 5.40: Análisis de estabilidad sismo máximo probable de falla no circular para la sección H del Botadero Tailandia

En complemento a los resultados obtenidos, en la Figura 5.41 se muestra gráficamente los resultados para la condición estática y de acuerdo con los cuatro métodos de análisis para la obtención de factores de seguridad, donde se compara con el factor de seguridad mínimo correspondiente a 1,2 para que los botaderos sean estables. El detalle de los resultados se puede observar en la Tabla 8.9 del Anexo I, donde también se expone la probabilidad de falla asociada para cada resultado de análisis.

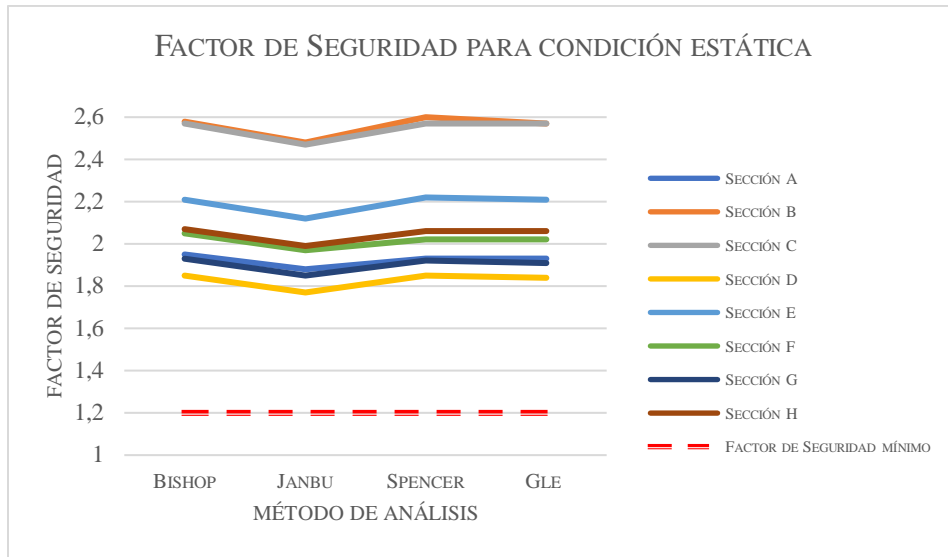


Figura 5.41: Factor de seguridad para condición estática

En la Figura 5.42 se muestra la condición de sismo operacional para cada sección de los botaderos, los factores de seguridad que se obtienen para los métodos de Bishop, Janbu, Spencer y GLE, donde estos se comparan con el factor mínimo aceptable correspondiente a 1,1 para determinar la estabilidad de las secciones analizadas para esta condición en particular. En adición, la Tabla 8.10 muestra los resultados detalladamente como también la probabilidad de falla asociada.

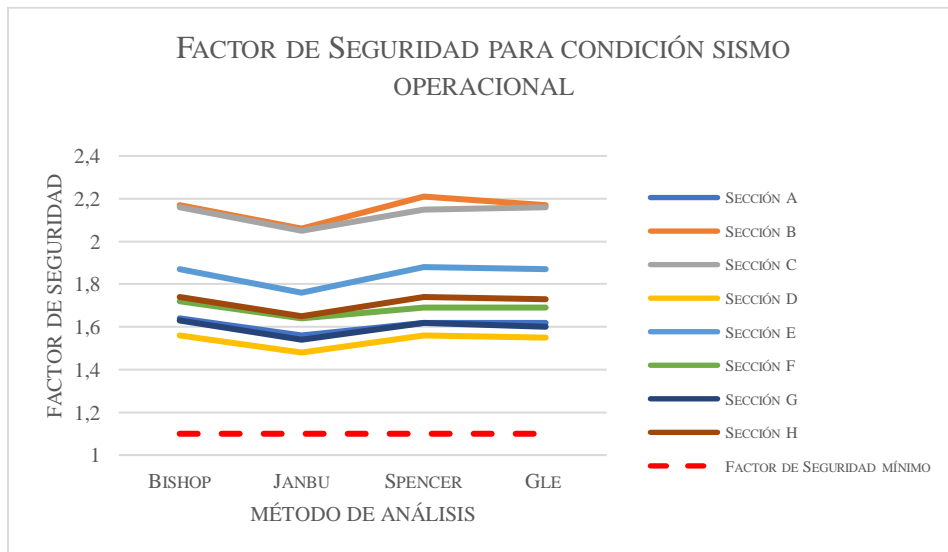


Figura 5.42: Factor de seguridad para condición sismo operacional

Para la condición de sismo máximo probable, los resultados de factores de seguridad obtenidos se observan en la Figura 5.43, como también se observa gráficamente el factor de seguridad mínimo aceptable para esta condición. En más detalle, la

Tabla 8.11 se expone todos los resultados para la condición de sismo máximo probable y su probabilidad de falla asociado para cada resultado.

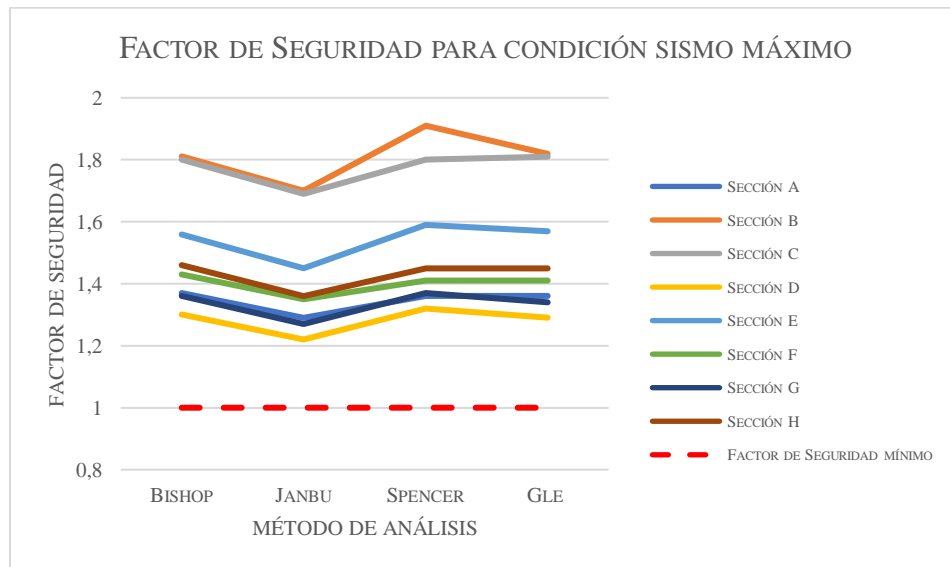


Figura 5.43: Factor de seguridad para condición sismo máximo probable

6 CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos asociados a la evaluación de estabilidad de los botaderos, se realizó una selección de las secciones críticas hasta la obtención de factores que permitan cuantificar la estabilidad, para esto se integraron dos métodos de cálculo el equilibrio límite y el modelamiento numérico. Con relación a la metodología llevada a cabo, la evaluación de estabilidad del diseño de los botaderos permitió obtener factores gravitantes para el modelamiento numérico y equilibrio límite los cuales son comparados como se muestra la Figura 6.5. así como en los escenarios de evaluación (estático y pseudoestático) obteniendo factores de seguridad, que se ven afectados por la influencia de eventos sísmicos que se diseñaron para su evaluación y lo cual se plasma en la Figura 6.5.

Como consecuencias de la evaluación de estabilidad de los botaderos, en primera instancia el modelamiento numérico realizado tiene ventajas en la obtención de resultados de manera visual al conseguir un plano preferente de la progresión de la falla a lo largo de su pendiente a medida que se reduce la resistencia al corte, así como un factor crítico de reducción de resistencia cuyo propósito es indicar el punto en el cual la pendiente fallará y el desplazamiento de la deformación al corte aumentará rápidamente, para dicho caso el análisis de elementos finitos no convergerá. En consecuencia, de este análisis se obtiene un factor comparable, la resistencia mínima de las propiedades del suelo fundación, del botadero y la trayectoria que sigue la falla.

Una segunda etapa donde se desarrolló el análisis de estabilidad por medio de equilibrio límite sobre la superficie de mayor deformación al corte, integrando en este punto el resultado grafico obtenido del modelamiento numérico para posteriormente analizarlo mediante equilibrio límite. Las ventajas que presenta el equilibrio límite se deben a que es más utilizado en la práctica para el cálculo de estabilidad de taludes y ha desarrollado una gama de métodos para su cálculo, los cuales se basan en dividir la potencial masa de deslizamiento en dovelas. Sin embargo, al someter el análisis a efectos de un sismo para transformarlo en un problema pseudoestático es importante considerar dentro de la amplia gama de posibilidades para adoptar un coeficiente sísmico y de los factores que depende su obtención, con el propósito de ver como las fuerzas inducidas afecta a la potencial masa deslizante.

En consecuencia, a la metodología realizada generó un procedimiento metódico y realista para determinar el factor de seguridad de un modo más eficaz, esto gracias al modelamiento numérico que visualmente es más práctico.

Factores de seguridad que se observan en los resultados representados en la Figura 5.41 bajo un análisis estático sin la adición de un sismo que lo afecte. Al observar la Figura 6.1 de manera resumida la condición estática para todas las secciones que se analizaron, la Sección D es la que presenta el Factor de Seguridad más desfavorable con un valor 1,84, sin embargo, al compararlo con el factor mínimo de 1,2 que definió en los criterios de aceptabilidad este valor es mayor. Por ende, se concluye para la condición estática que ninguna de las secciones que se escogieron como críticas es inestable bajo los criterios definidos.

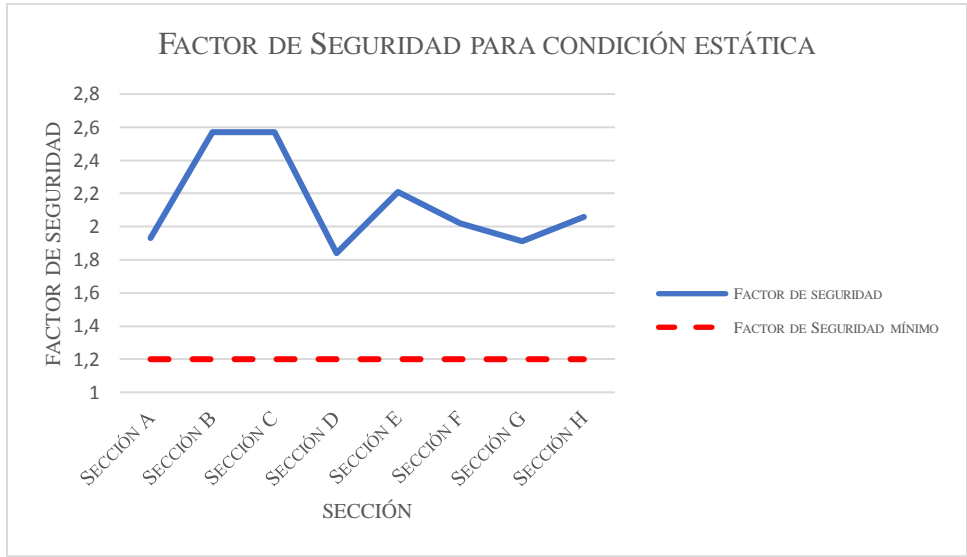


Figura 6.1: Factor de Seguridad para condición estática

Para el primer análisis de condición pseudoestática correspondiente a un sismo operacional como se muestra en los resultados de la Figura 5.42, se observa que la Sección D corresponde también al Factor de Seguridad más bajo obtenido. Mientras que en la Figura 6.2 se aprecia de manera más sencilla como el valor de esta sección correspondiente a 1,55 está por sobre el valor del criterio de aceptabilidad definido con el valor de 1,1. En conclusión, para la condición de sismo operacional es que todas las secciones son estables bajo los criterios de aceptabilidad establecidos.

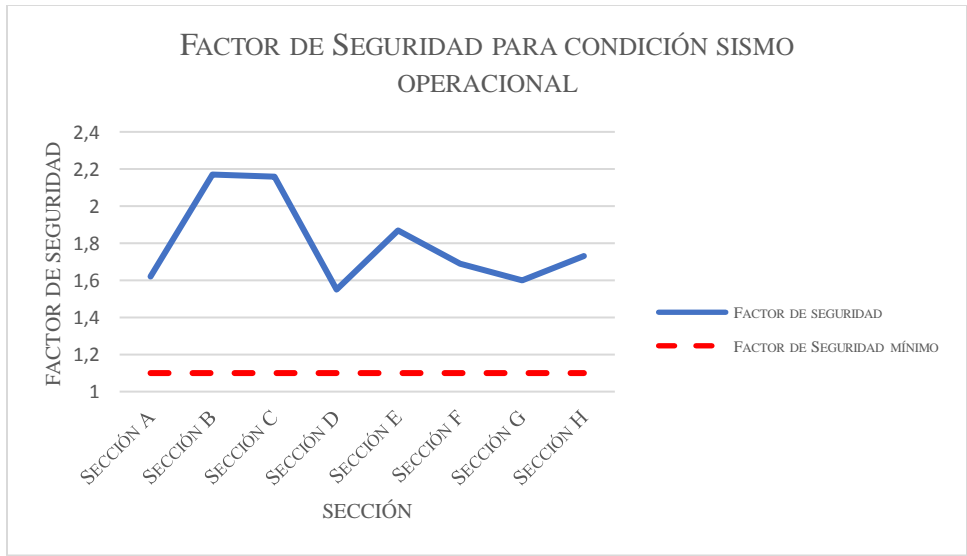


Figura 6.2: Factor de Seguridad para condición sismo operacional

El segundo análisis de condición pseudoestática correspondiente a un sismo máximo probable como se muestra en la Figura 5.43 donde la Sección D corresponde también al factor de seguridad más bajo obtenido. En la Figura 6.3 se aprecia de manera más sencilla como el

valor de esta sección correspondiente a 1,29 está por sobre el valor del criterio de aceptabilidad definido como 1,0. Para concluir, la condición de sismo operacional es que todas las secciones correspondiente a los tres botaderos son estables, puesto que bajo los criterios de aceptabilidad de FS y PF definidos se cumplen la condición de estabilidad.

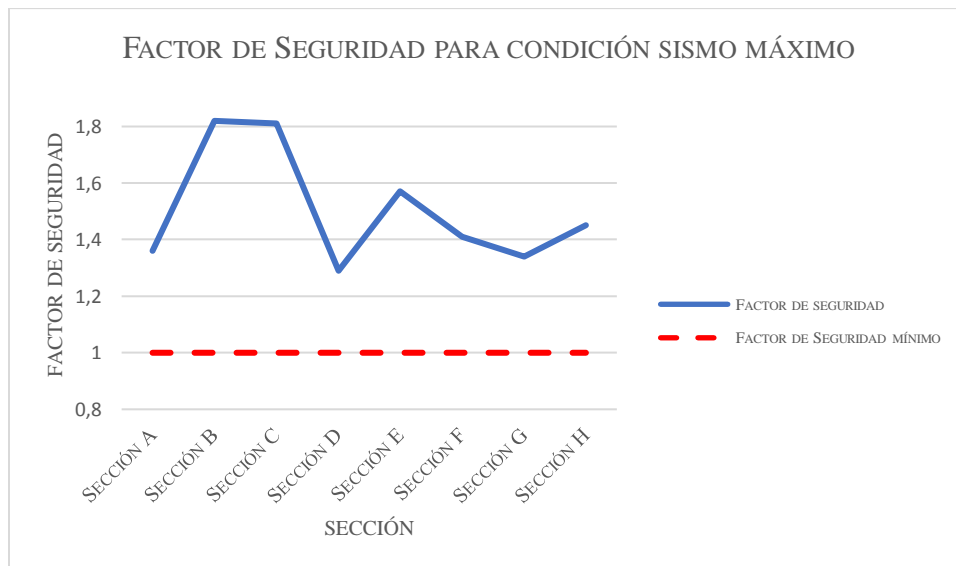


Figura 6.3: Factor de Seguridad para condición de sismo máximo probable

En conclusión, como se observó en las Figura 6.1, Figura 6.2 y Figura 6.3 los factores de seguridad que se obtuvieron del análisis son superiores al criterio mínimo aceptable definidos con anterioridad. Adicionalmente, se observa en la Figura 6.4 cómo afecta cuando analizamos condiciones pseudoestática, ya que al incluir un evento sísmico en su análisis este va reduciendo su Factor de Seguridad.

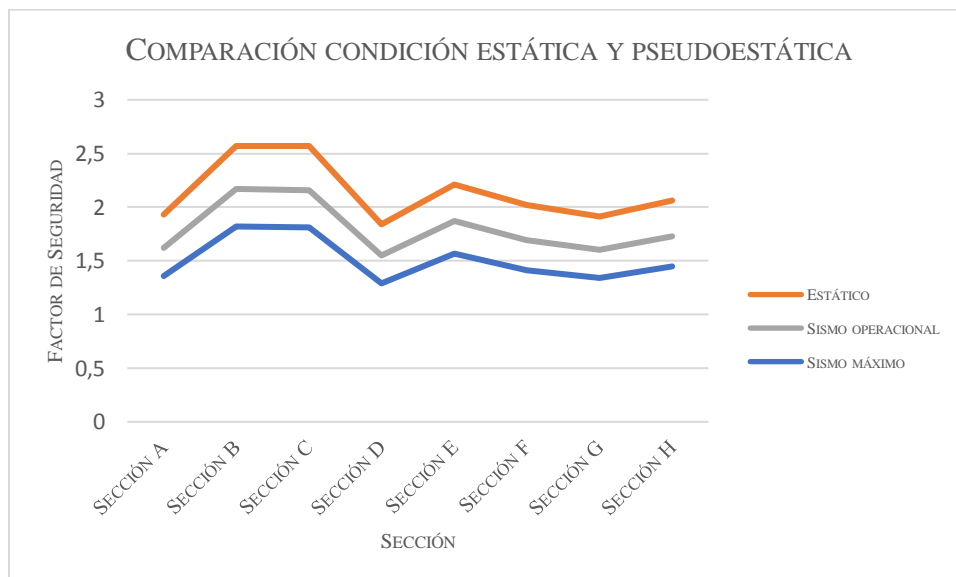


Figura 6.4: Comparación condición estática y pseudoestática

Finalmente, al realizar una comparación entre los factores que se obtuvieron en la sección de resultados los que corresponden al SRF y FS como se observa en la Figura 6.5 se resalta que el factor obtenido por el modelamiento numérico es menor al que se obtuvo por equilibrio limite. Adicionalmente, al comparar estos factores los cuales están en su condición estática y evaluarlo bajo el criterio de aceptabilidad se puede corroborar que en ambos casos el diseño para los botaderos es estable.

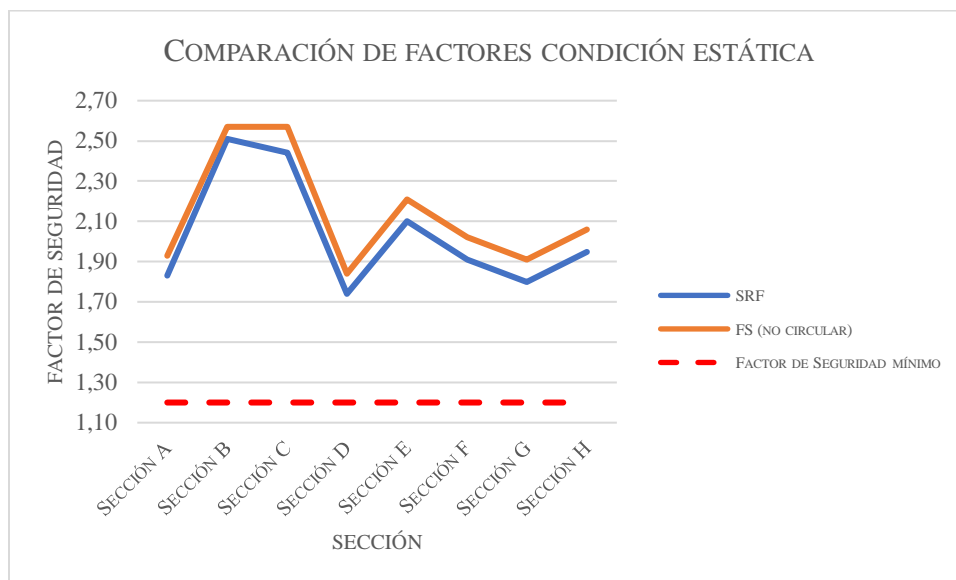


Figura 6.5: Comparación factores asociados a métodos de análisis

Recomendación para posteriores evaluaciones de estabilidad: analizar fallas o roturas por inestabilidad física que estén influenciado por la presencia de agua que incrementa las presiones intersticiales o producen efectos erosivos internos o externos. Por otra parte, también es de interés un análisis de estabilidad con la redefinición de la altura de los botaderos y cuál sería la máxima altura a la que se puede llegar o determinar la estabilidad al agregar un piso al botadero.

7 REFERENCIAS

- Cárdenas, M. O. (2009). *Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en yacimiento Franke*. Santiago de Chile .
- F. Leyton, S. R. (2009). *Preliminary re-evaluation of probabilistic seismic hazard assessment in Chile: from Arica to Taitao Peninsula*.
- Finn, W. (1988). Dynamic analysis in geotechnical engineering. *Geotechnical Special Publication No. 20*.
- G. Castro, S. P. (1985). Re-examination of slide of lower San Fernando Dam. *Journal of the geotechnical engineering division, ASCE, Vol. 111*, 1093-1107.
- J.H. Prevest, A. A.-G. (1985). Nonlinear dynamic analysis of an earth Dam. *Journal*, 882-897.
- L., L. G. (3 de 11 de 2009). *Cátedra Geomecánica*. Obtenido de https://www.ucurcos.cl/ingenieria/2009/2/CI44B/2/material_docente/bajar?id_material=260890
- Lopez, E. (2016). *Estudio geotécnico y diseño del talud final de una mina a cielo abierto aplicando modelos numéricos*. Lima, Perú.
- Luis I. González de Vallejos, M. F. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- S.L. Houston, W. H. (1987). Microcompute. aided evaluation of earthquake-induced. En *Microcomputers in civil engineering, Vol.2* (págs. 207-222). Amsterdam: Elsevier.
- SERNAGEOMIN. (9 de Marzo de 2018). *Guías Metodológica para la Estabilidad Física de Faenas e Instalaciones Mineras*. Obtenido de http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/04/Guia_Metodologica_E_Fisica.pdf
- Sociedad Contractual Minera Franke. (2016). *Estudio de Impacto Ambiental "Proyecto Continuidad Operacional Franke"*.
- 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.
- Véliz, J. D. (s.f.). *Métodos de estabilización de taludes mediante estructuras de suelo reforzado*.

8 ANEXOS

8.1 ANEXO A

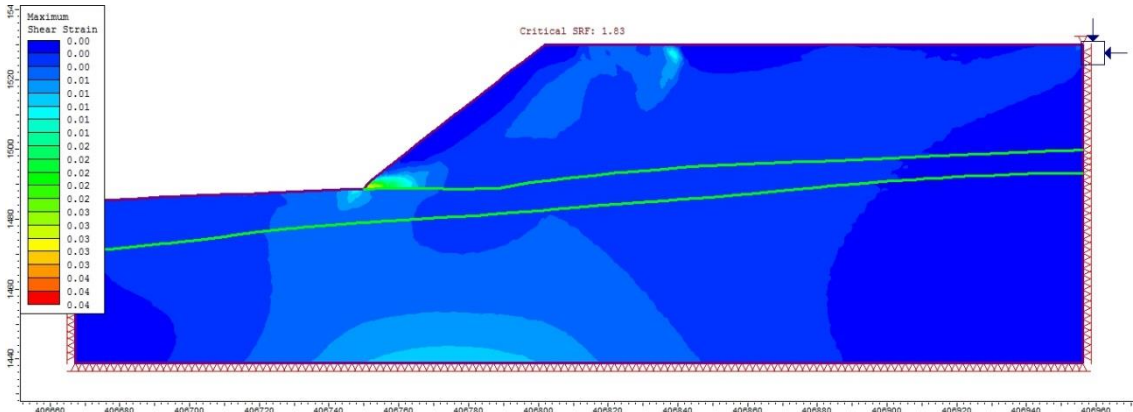


Figura 8.1: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección A con un SRF 1,83

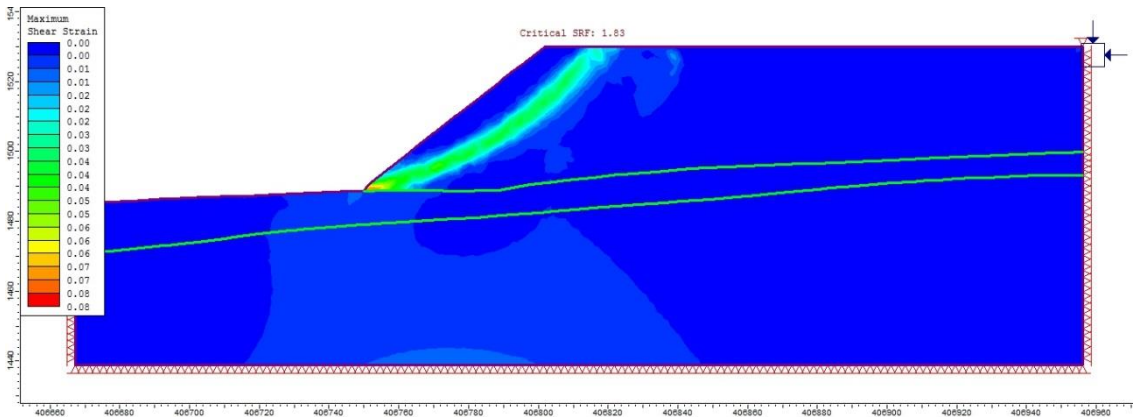


Figura 8.2: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección A con un SRF 1,84

Tabla 8.1: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección A

SRF	Desplazamiento máximo (m)	Convergencia	Propiedades de resistencia		
			Material	Cohesión (kPa)	Ángulo fricción (°)
1	0,51	Si	Botaderos	40	40
			Gravas de Atacama	120	40
			Andesita (Ocoíta)	1.010	62
1,4	0,52	Si	Botaderos	28,6	31

			Gravas de Atacama	85,7	31
			Andesita (Ocoíta)	721,4	54
1,8	0,55	Si	Botaderos	66,7	25
			Gravas de Atacama	66,7	25
			Andesita (Ocoíta)	561,1	46
1,81	0,55	Si	Botaderos	22,2	25
			Gravas de Atacama	66,7	25
			Andesita (Ocoíta)	561,1	46
1,82	0,56	Si	Botaderos	22,0	25
			Gravas de Atacama	65,9	25
			Andesita (Ocoíta)	555,0	46
1,83 (critico)	0,56	Si	Botaderos	21,9	25
			Gravas de Atacama	65,6	25
			Andesita (Ocoíta)	551,9	46
1,84	0,88	No	Botaderos	21,7	25
			Gravas de Atacama	65,2	25
			Andesita (Ocoíta)	549,0	46
1,85	1,19	No	Botaderos	21,6	24
			Gravas de Atacama	64,9	24
			Andesita (Ocoíta)	546,0	46
1,9	1,73	No	Botaderos	21,1	24
			Gravas de Atacama	63,2	24
			Andesita (Ocoíta)	531,6	45
2	3,66	No	Botaderos	20,0	23
			Gravas de Atacama	60,0	23
			Andesita (Ocoíta)	505,0	43
2,2	6,16	No	Botaderos	18,2	21

			Gravas de Atacama	54,6	21
			Andesita (Ocoíta)	459,1	41

8.2 ANEXO B

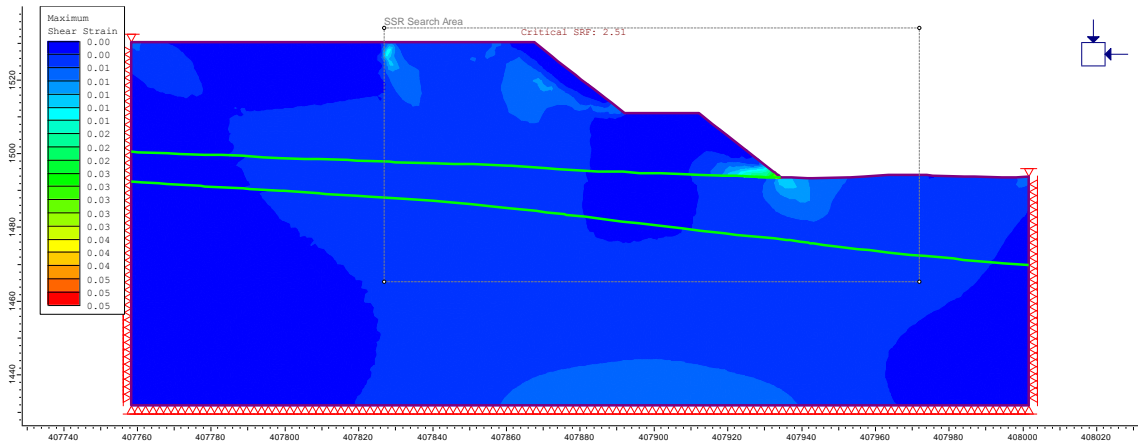


Figura 8.3: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección B con un SRF 2,46

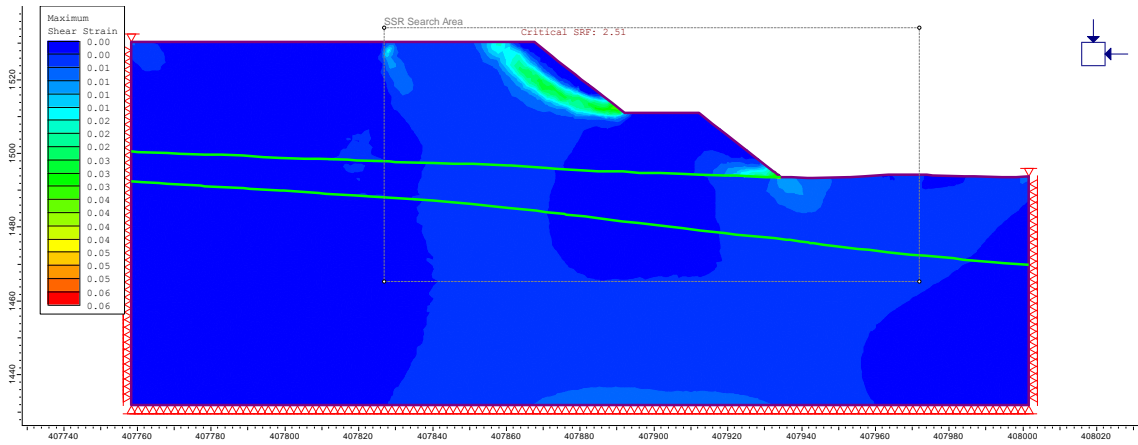


Figura 8.4: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección B con un SRF 2,51

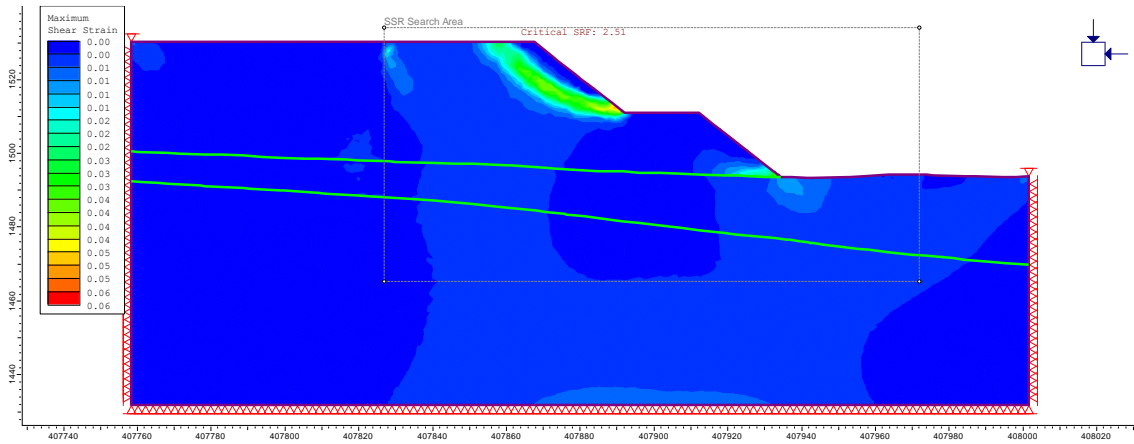


Figura 8.5: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección B con un SRF 2,52

Tabla 8.2: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección B

SRF	Desplazamiento máximo (m)	Convergencia	Propiedades de resistencia		
			Material	Cohesión (kPa)	Ángulo fricción (°)
1	0,40	Si	Botaderos	40	40
			Gravas de Atacama	120	40
			Andesita (Ocoíta)	1.010	62
1,4	0,40	Si	Botaderos	28	31
			Gravas de Atacama	85,7	31
			Andesita (Ocoíta)	721,4	54
1,8	0,42	Si	Botaderos	22,2	25
			Gravas de Atacama	66,7	25
			Andesita (Ocoíta)	561,1	46
2,2	0,44	Si	Botaderos	18,2	21
			Gravas de Atacama	54,6	21
			Andesita (Ocoíta)	459,1	41
2,45	0,46	Si	Botaderos	16,3	19
			Gravas de Atacama	49,0	19
			Andesita (Ocoíta)	412,3	38

2,46	0,47	Si	Botaderos	16,3	19
			Gravas de Atacama	48,8	19
			Andesita (Ocoíta)	410,8	38
2,51 (critico)	0,64	Si	Botaderos	15,9	19
			Gravas de Atacama	47,8	19
			Andesita (Ocoíta)	402,4	37
2,52	0,74	No	Botaderos	15,9	18
			Gravas de Atacama	47,6	18
			Andesita (Ocoíta)	400,8	37
2,54	0,90	No	Botaderos	15,8	18
			Gravas de Atacama	47,2	18
			Andesita (Ocoíta)	397,6	37
2,57	1,10	No	Botaderos	15,6	18
			Gravas de Atacama	46,7	18
			Andesita (Ocoíta)	393,0	36
2,7	2,20	No	Botaderos	14,8	17
			Gravas de Atacama	44,4	17
			Andesita (Ocoíta)	374,1	35
2,95	4,10	No	Botaderos	13,6	16
			Gravas de Atacama	40,7	16
			Andesita (Ocoíta)	342,4	33

8.3 ANEXO C

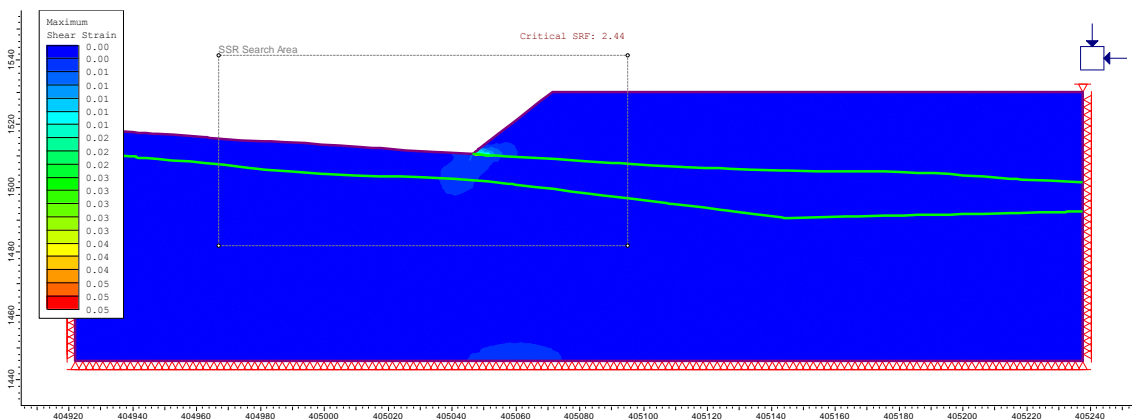


Figura 8.6: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección C con un SRF 2,44

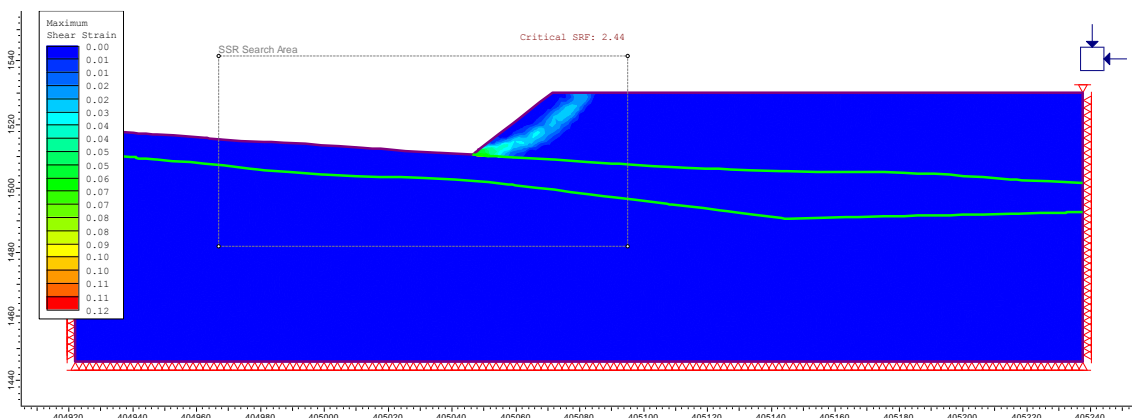


Figura 8.7: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección C con un SRF 2,5

Tabla 8.3: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección C

SRF	Desplazamiento máximo (m)	Convergencia	Propiedades de resistencia		
			Material	Cohesión (kPa)	Ángulo fricción (°)
1	0,17	Si	Botaderos	40	40
			Gravas de Atacama	120	40
			Andesita (Ocoíta)	1.010	62
1,4	0,18	Si	Botaderos	28,6	31
			Gravas de Atacama	85,7	31

			Andesita (Ocoíta)	721,4	54
1,7	0,18	Si	Botaderos	23,5	24
			Gravas de Atacama	70,6	26
			Andesita (Ocoíta)	594,1	48
2,1	0,19	Si	Botaderos	19,1	22
			Gravas de Atacama	57,1	22
			Andesita (Ocoíta)	481,0	42
2,29	0,19	Si	Botaderos	17,5	20
			Gravas de Atacama	52,4	20
			Andesita (Ocoíta)	441,1	40
2,39	0,19	Si	Botaderos	19,7	19
			Gravas de Atacama	50,2	19
			Andesita (Ocoíta)	422,6	38
2,44 (critico)	0,20	Si	Botaderos	16,4	19
			Gravas de Atacama	49,2	19
			Andesita (Ocoíta)	413,9	38
2,45	0,23	No	Botaderos	16,3	19
			Gravas de Atacama	49,0	19
			Andesita (Ocoíta)	412,3	38
2,46	0,26	No	Botaderos	16,3	19
			Gravas de Atacama	48,8	19
			Andesita (Ocoíta)	410,6	38
2,5	0,43	No	Botaderos	16,0	19
			Gravas de Atacama	48,0	19
			Andesita (Ocoíta)	404,0	37
2,79	1,24	No	Botaderos	14,3	17
			Gravas de Atacama	43,0	17

			Andesita (Ocoíta)	362,0	34
--	--	--	----------------------	-------	----

8.4 ANEXO D

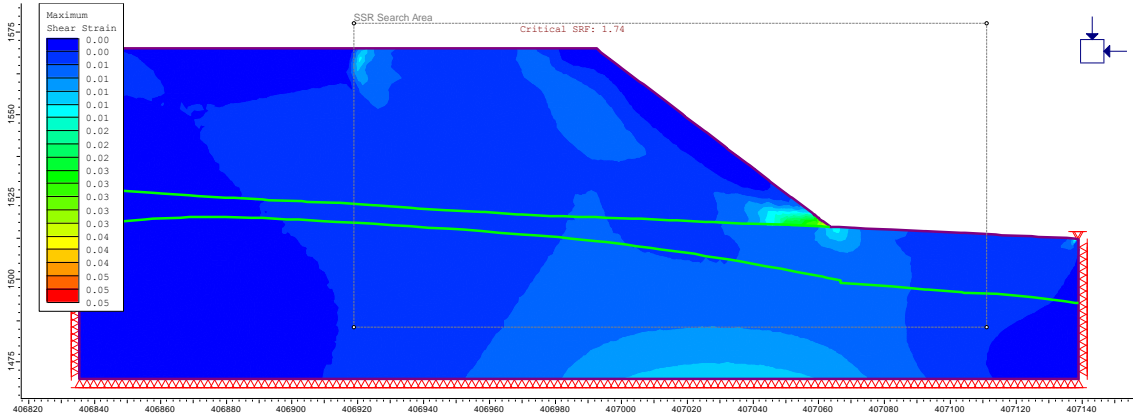


Figura 8.8: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección D con un SRF 1,74

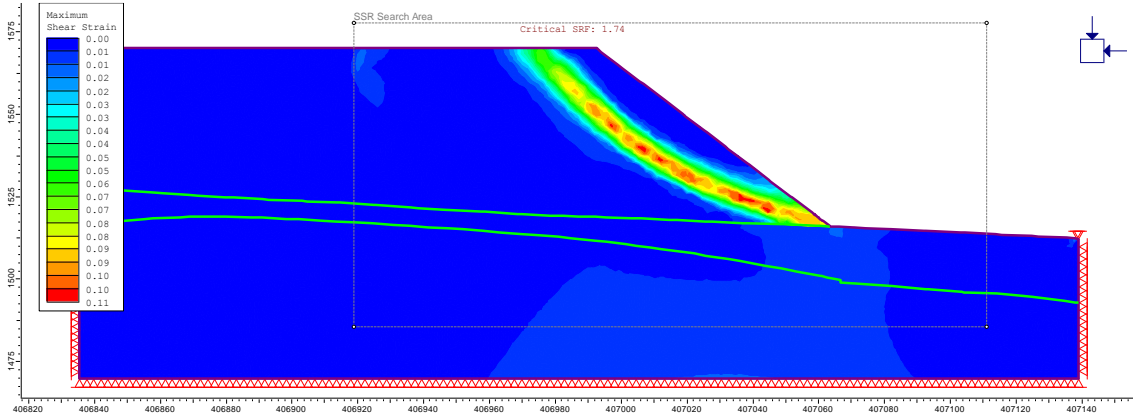


Figura 8.9: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección D con un SRF 1,75

Tabla 8.4: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección D

SRF	Desplazamiento máximo (m)	Convergencia	Propiedades de resistencia		
			Material	Cohesión (kPa)	Ángulo fricción (°)
1	0,68	Si	Botaderos	40	40
			Gravas de Atacama	120	40
			Andesita (Ocoíta)	1.096	61
1,4	0,70	Si	Botaderos	28,6	31
			Gravas de Atacama	85,7	31

			Andesita (Ocoíta)	782,9	52
1,65	0,72	Si	Botaderos	24,2	27
			Gravas de Atacama	72,7	27
			Andesita (Ocoíta)	664,2	47
1,66	0,73	Si	Botaderos	24,1	27
			Gravas de Atacama	72,3	27
			Andesita (Ocoíta)	660,2	47
1,71	0,73	Si	Botaderos	23,4	26
			Gravas de Atacama	70,2	26
			Andesita (Ocoíta)	641,0	46
1,74 (crítico)	0,74	Si	Botaderos	23,0	26
			Gravas de Atacama	69,0	26
			Andesita (Ocoíta)	629,9	46
1,75	1,89	No	Botaderos	22,9	26
			Gravas de Atacama	68,6	26
			Andesita (Ocoíta)	626,3	46
1,77	2,70	No	Botaderos	22,6	25
			Gravas de Atacama	67,8	25
			Andesita (Ocoíta)	619,2	45
1,9	5,09	No	Botaderos	21,1	24
			Gravas de Atacama	63,2	24
			Andesita (Ocoíta)	576,8	43
2,15	15,07	No	Botaderos	18,6	21
			Gravas de Atacama	55,8	21
			Andesita (Ocoíta)	509,8	38

8.5 ANEXO E

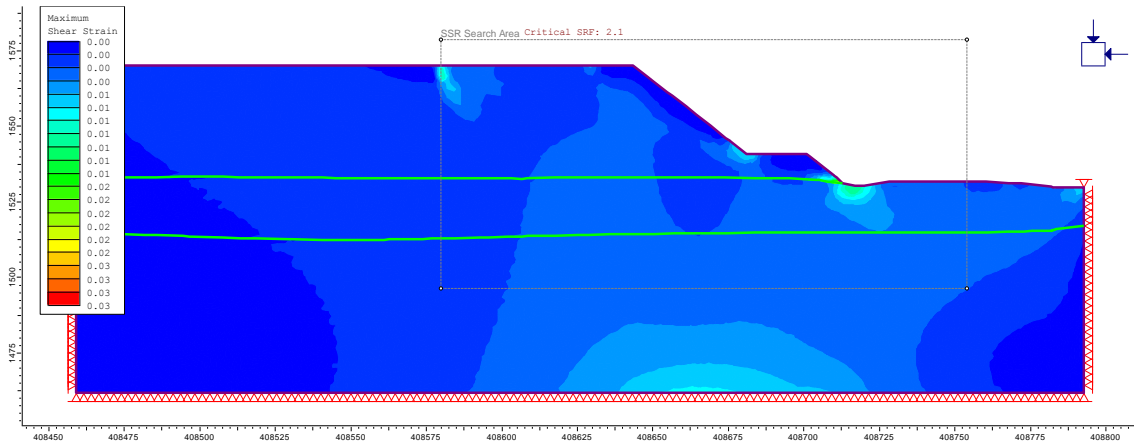


Figura 8.10: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección E con un SRF 2,1

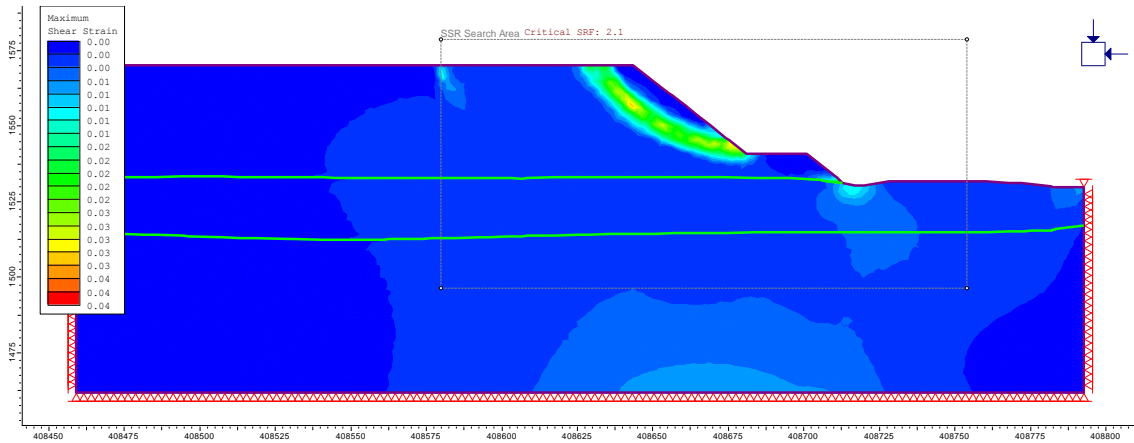


Figura 8.11: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección E con un SRF 2,11

Tabla 8.5: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección E

SRF	Desplazamiento máximo (m)	Convergencia	Propiedades de resistencia		
			Material	Cohesión (kPa)	Ángulo fricción (°)
1	0,52	Si	Botaderos	40	40
			Gravas de Atacama	120	40
			Andesita (Ocoíta)	1.096	40
1,4	0,52	Si	Botaderos	28,6	31
			Gravas de Atacama	85,7	31

			Andesita (Ocoíta)	782,9	52
1,9	0,53	Si	Botaderos	21,1	24
			Gravas de Atacama	63,2	24
			Andesita (Ocoíta)	576,8	43
2,02	0,54	Si	Botaderos	19,8	23
			Gravas de Atacama	59,4	23
			Andesita (Ocoíta)	542,6	42
2,08	0,55	Si	Botaderos	19,2	22
			Gravas de Atacama	57,7	22
			Andesita (Ocoíta)	526,9	41
2,09	0,55	Si	Botaderos	19,1	22
			Gravas de Atacama	57,4	22
			Andesita (Ocoíta)	524,4	41
2,1 (critico)	0,55	Si	Botaderos	19,1	22
			Gravas de Atacama	57,1	22
			Andesita (Ocoíta)	521,9	40
2,11	0,79	No	Botaderos	19,0	22
			Gravas de Atacama	56,9	22
			Andesita (Ocoíta)	519,4	40
2,15	1,26	No	Botaderos	18,6	21
			Gravas de Atacama	55,8	21
			Andesita (Ocoíta)	509,8	40
2,4	3,80	No	Botaderos	16,7	19
			Gravas de Atacama	50	19
			Andesita (Ocoíta)	456,7	37

8.6 ANEXO F

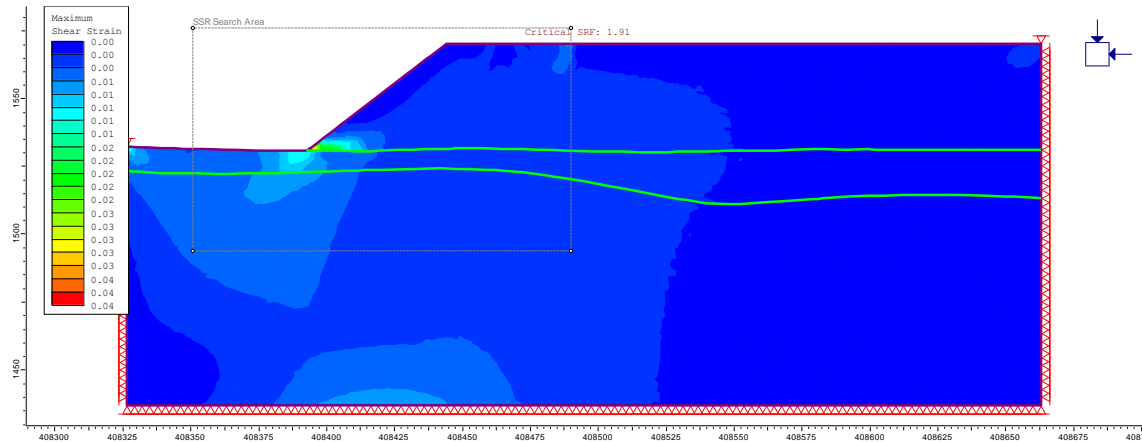


Figura 8.12: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección F con un SRF 1,91

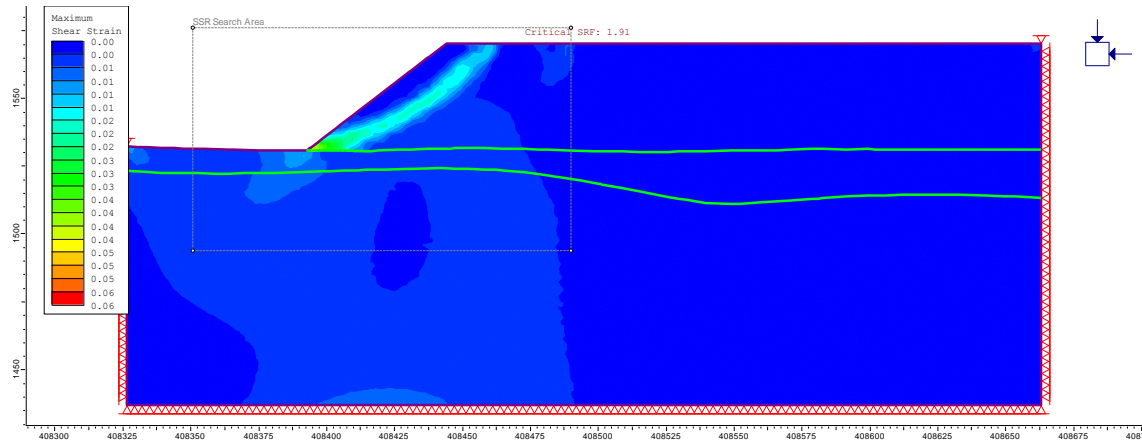


Figura 8.13: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección F con un SRF 1,92

Tabla 8.6: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección F

SRF	Desplazamiento máximo (m)	Convergencia	Propiedades de resistencia		
			Material	Cohesión (kPa)	Ángulo fricción (°)
1	0,57	Si	Botaderos	40	40
			Gravas de Atacama	120	40
			Andesita (Ocoíta)	1.090	61
1,4	0,59	Si	Botaderos	28,6	31
			Gravas de Atacama	85,7	31

			Andesita (Ocoíta)	778,6	52
1,9	0,64	Si	Botaderos	21,1	24
			Gravas de Atacama	63,2	24
			Andesita (Ocoíta)	573,7	43
1,91 (critico)	0,65	Si	Botaderos	21,0	24
			Gravas de Atacama	62,8	24
			Andesita (Ocoíta)	570,7	43
1,92	0,80	No	Botaderos	20,8	24
			Gravas de Atacama	62,5	24
			Andesita (Ocoíta)	567,7	43
1,93	0,97	No	Botaderos	20,7	24
			Gravas de Atacama	62,2	24
			Andesita (Ocoíta)	564,8	43
1,95	1,30	No	Botaderos	20,5	23
			Gravas de Atacama	61,5	23
			Andesita (Ocoíta)	559,0	43
2,02	2,52	No	Botaderos	19,8	23
			Gravas de Atacama	59,4	23
			Andesita (Ocoíta)	539,6	42
2,15	4,21	No	Botaderos	18,6	21
			Gravas de Atacama	55,8	21
			Andesita (Ocoíta)	507,0	38
2,4	9,24	No	Botaderos	16,7	19
			Gravas de Atacama	50,0	19
			Andesita (Ocoíta)	454,2	37

8.7 ANEXO G

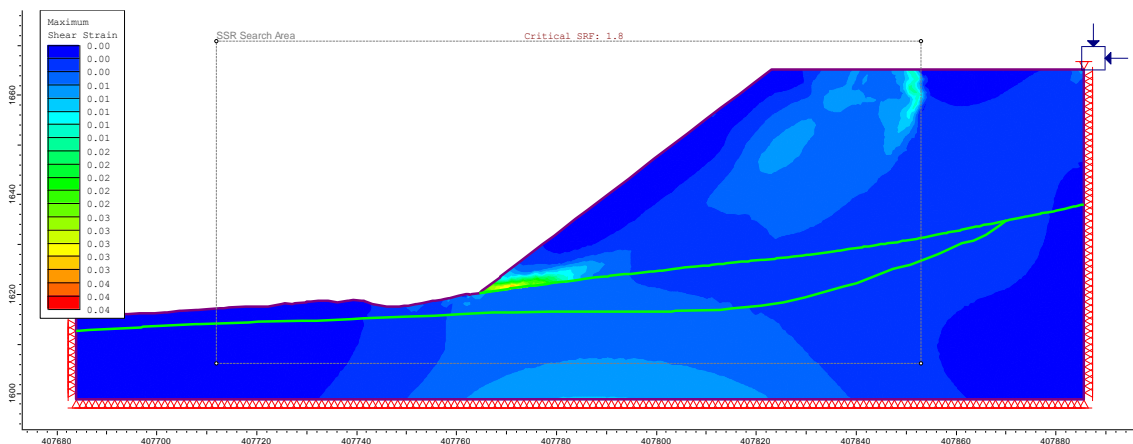


Figura 8.14: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección G con un SRF 1,8

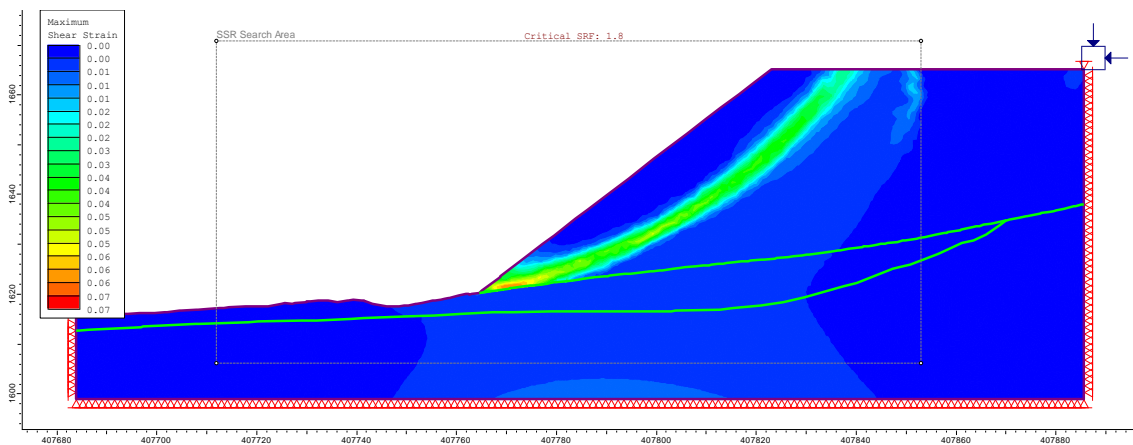


Figura 8.15: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección G con un SRF 1,81

Tabla 8.7: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección G

SRF	Desplazamiento máximo (m)	Convergencia	Propiedades de resistencia		
			Material	Cohesión (kPa)	Ángulo fricción (°)
1	0,30	Si	Botaderos	40	40
			Gravas de Atacama	120	40
			Andesita (Ocoíta)	1.031	62
1,3	0,31	Si	Botaderos	30,8	33
			Gravas de Atacama	92,3	33

			Andesita (Ocoíta)	793,1	55
1,7	0,33	Si	Botaderos	23,5	26
			Gravas de Atacama	70,6	26
			Andesita (Ocoíta)	606,5	48
1,8 (critico)	0,34	Si	Botaderos	22,2	25
			Gravas de Atacama	66,7	25
			Andesita (Ocoíta)	572,8	46
1,81	0,58	No	Botaderos	22,1	25
			Gravas de Atacama	66,3	25
			Andesita (Ocoíta)	569,6	46
1,82	0,93	No	Botaderos	22,0	25
			Gravas de Atacama	65,9	25
			Andesita (Ocoíta)	566,5	46
1,85	1,52	No	Botaderos	21,6	24
			Gravas de Atacama	64,9	24
			Andesita (Ocoíta)	557,3	45
1,9	2,28	No	Botaderos	21,1	24
			Gravas de Atacama	63,2	24
			Andesita (Ocoíta)	542,6	44
2,1	4,14	No	Botaderos	19,1	22
			Gravas de Atacama	57,1	22
			Andesita (Ocoíta)	491,0	42

8.8 ANEXO H

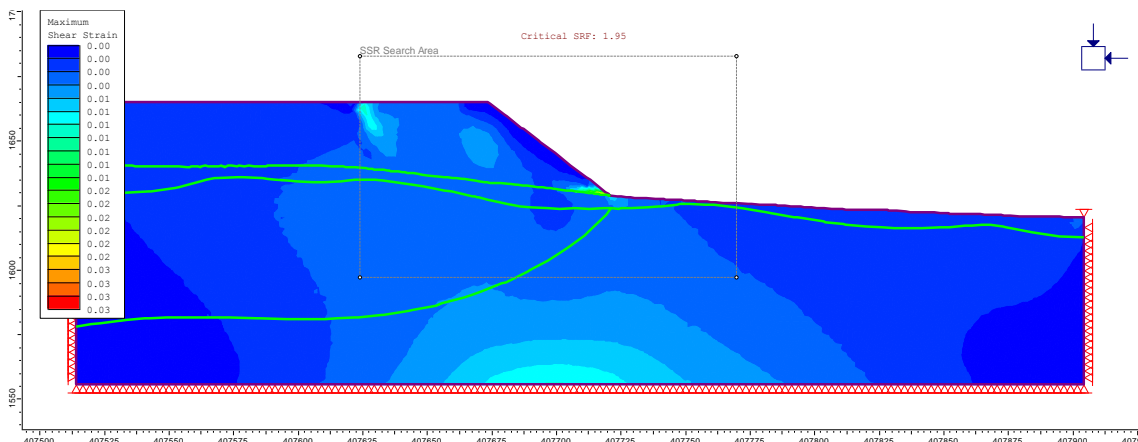


Figura 8.16: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección H con un SRF 1,95

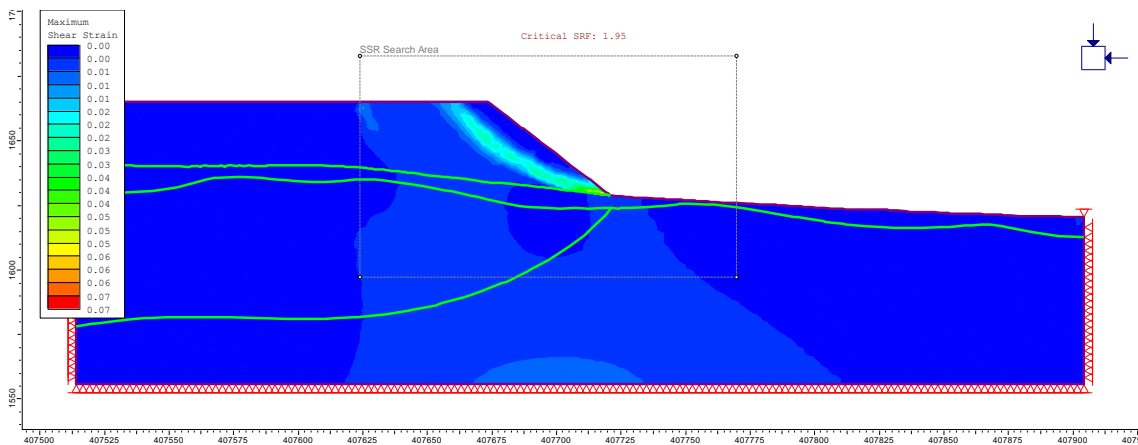


Figura 8.17: Resultado reducción de la fuerza de corte para la Sección H con un SRF 1,96

Tabla 8.8: Resultados obtenidos para cada SRF de la Sección H

SRF	Desplazamiento máximo (m)	Convergencia	Propiedades de resistencia		
			Material	Cohesión (kPa)	Ángulo fricción (°)
1	0,62	Si	Botaderos	40	40
			Gravas de Atacama	120	30
			Andesita (Ocoíta)	939	64
				1.031	62
1,4	0,62	Si	Botaderos	28,6	31

			Gravas de Atacama	85,7	31
			Andesita (Ocoíta)	670,7	55
				736,4	53
1,9	0,65	Si	Botaderos	21,1	24
			Gravas de Atacama	63,2	24
			Andesita (Ocoíta)	494,2	47
				542,6	44
1,95 (critico)	0,66	Si	Botaderos	20,5	23
			Gravas de Atacama	61,5	23
			Andesita (Ocoíta)	481,5	46
				528,7	44
1,96	0,85	No	Botaderos	20,4	23
			Gravas de Atacama	61,2	23
			Andesita (Ocoíta)	479,1	46
				526,0	44
1,98	1,28	No	Botaderos	20,2	23
			Gravas de Atacama	60,6	23
			Andesita (Ocoíta)	474,2	45
				520,7	43
2,02	1,74	No	Botaderos	19,8	23
			Gravas de Atacama	59,4	23
			Andesita (Ocoíta)	464,9	45
				510,4	43
2,15	3,23	No	Botaderos	18,6	21
			Gravas de Atacama	55,8	21
			Andesita (Ocoíta)	436,7	43
				479,5	41
2,4	5,46	No	Botaderos	16,7	19

			Gravas de Atacama	50,0	19
			Andesita (Ocoíta)	391,25	40
				429,6	38

8.9 ANEXO I

En el presente apartado, se muestra en detalle los resultados obtenidos mediante equilibrio límite para falla no circulares.

Tabla 8.9: Resultado análisis de estabilidad estático

CONDICIÓN	BOTADERO	SECCIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD				PROBABILIDAD DE FALLA			
			Bishop	Janbu	Spencer	Gle	Bishop	Janbu	Spencer	Gle
Estático	China Sur	A	1,95	1,88	1,93	1,93	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		B	2,58	2,48	2,60	2,57	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		C	2,57	2,47	2,57	2,57	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Japón/India	D	1,85	1,77	1,85	1,84	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		E	2,21	2,12	2,22	2,21	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		F	2,05	1,97	2,02	2,02	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Tailandia	G	1,93	1,85	1,92	1,91	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		H	2,07	1,99	2,06	2,06	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabla 8.10: Resultado análisis de estabilidad sismo operacional

CONDICIÓN	BOTADERO	SECCIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD				PROBABILIDAD DE FALLA			
			Bishop	Janbu	Spencer	Gle	Bishop	Janbu	Spencer	Gle
Sismo operacional	China Sur	A	1,64	1,56	1,62	1,62	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		B	2,17	2,06	2,21	2,17	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		C	2,16	2,05	2,15	2,16	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Japón/India	D	1,56	1,48	1,56	1,55	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		E	1,87	1,76	1,88	1,87	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		F	1,72	1,64	1,69	1,69	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Tailandia	G	1,63	1,54	1,62	1,60	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		H	1,74	1,65	1,74	1,73	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabla 8.11: Resultado de análisis de estabilidad sismo máximo probable

CONDICIÓN	BOTADERO	SECCIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD				PROBABILIDAD DE FALLA			
			Bishop	Janbu	Spencer	Gle	Bishop	Janbu	Spencer	Gle
Sismo máximo probable	China Sur	A	1,37	1,29	1,36	1,36	0,2%	1,4%	0,3%	0,3%
		B	1,81	1,70	1,91	1,82	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		C	1,80	1,69	1,80	1,81	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Japón/India	D	1,30	1,22	1,32	1,29	1,7%	4,4%	1,5%	1,9,0%
		E	1,56	1,45	1,59	1,57	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		F	1,43	1,35	1,41	1,41	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%
	Tailandia	G	1,36	1,27	1,37	1,34	0,2%	2,0%	0,2%	0,4%
		H	1,46	1,36	1,45	1,45	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%

8.10 ANEXO J

En el siguiente apartado se adjunta los resultados del análisis estático realizado a la Sección D del Botadero Japón/India, con el propósito mostrar en detalle el Factor de Seguridad obtenido mediante los métodos de Bishop, Janbu, Spencer y GLE y que en esta ocasión de análisis no circular la sección corresponde a la más desfavorable en comparación a las demás secciones que también se evaluaron.

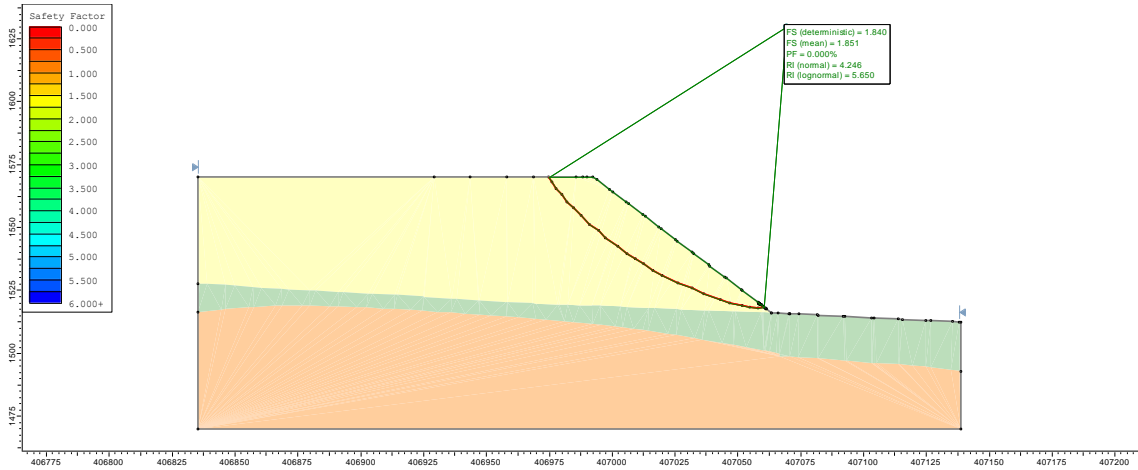


Figura 8.18: Resultado análisis estático mediante método de Bishop

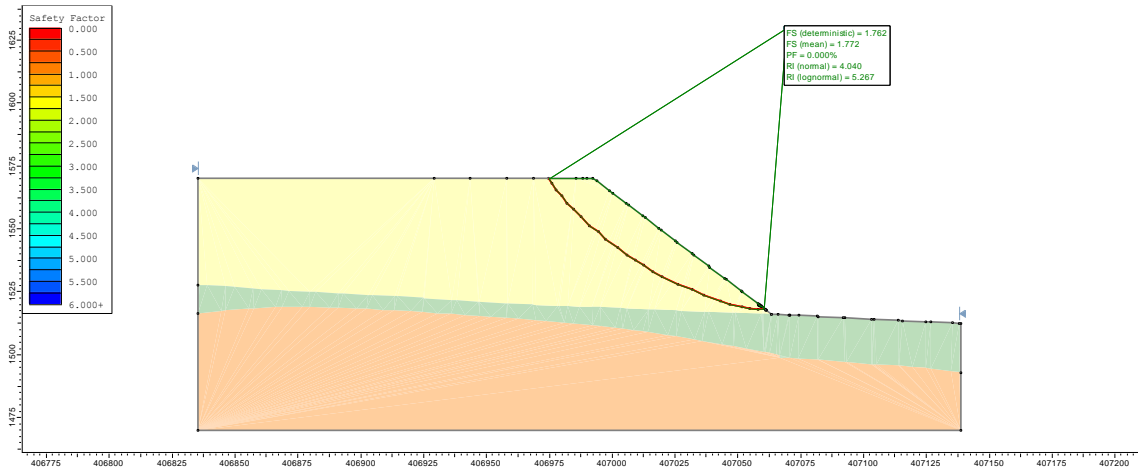


Figura 8.19: Resultado análisis estático mediante método Janbu

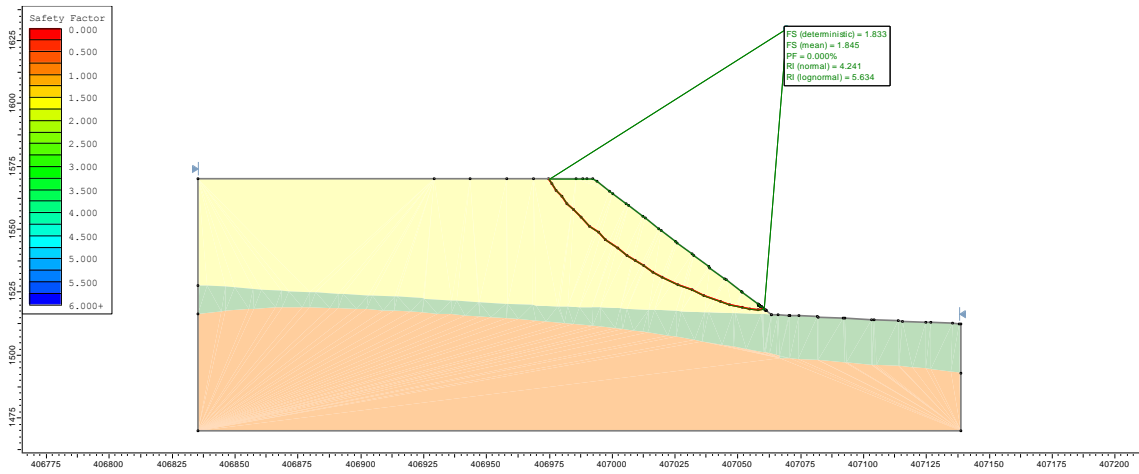


Figura 8.20: Resultado análisis estático mediante método Spencer

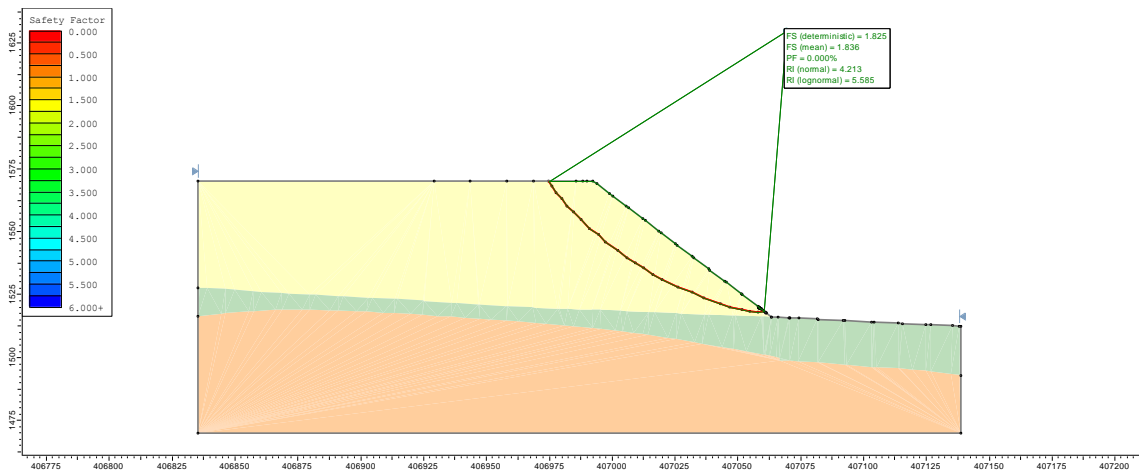


Figura 8.21: Resultado análisis estático mediante método GLE

8.11 ANEXO K

En el siguiente apartado se adjunta los resultados del análisis pseudoestático de sismo operacional realizado a la Sección D del Botadero Japón/India, con el propósito mostrar en detalle el Factor de Seguridad obtenido mediante los métodos de Bishop, Janbu, Spencer y GLE y que en esta ocasión de análisis no circular la sección corresponde a la más desfavorable en comparación a las demás secciones que también se evaluaron.

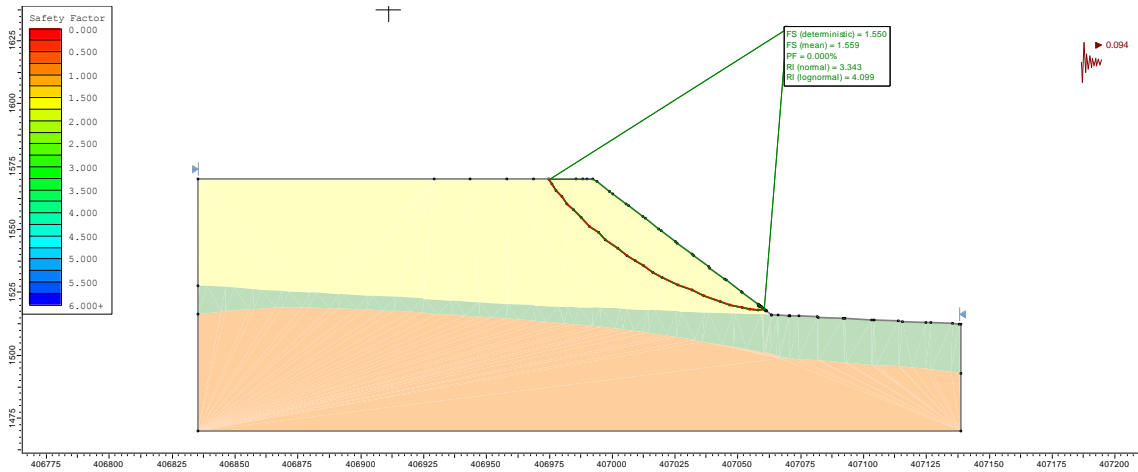


Figura 8.22: Resultado análisis sismo operacional mediante método Bishop

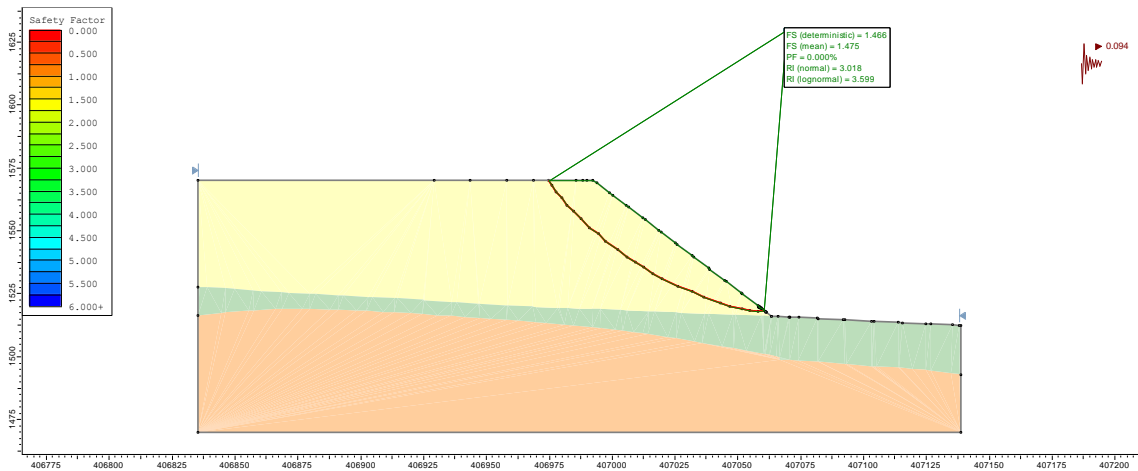


Figura 8.23: Resultado análisis sismo operacional mediante método Janbu

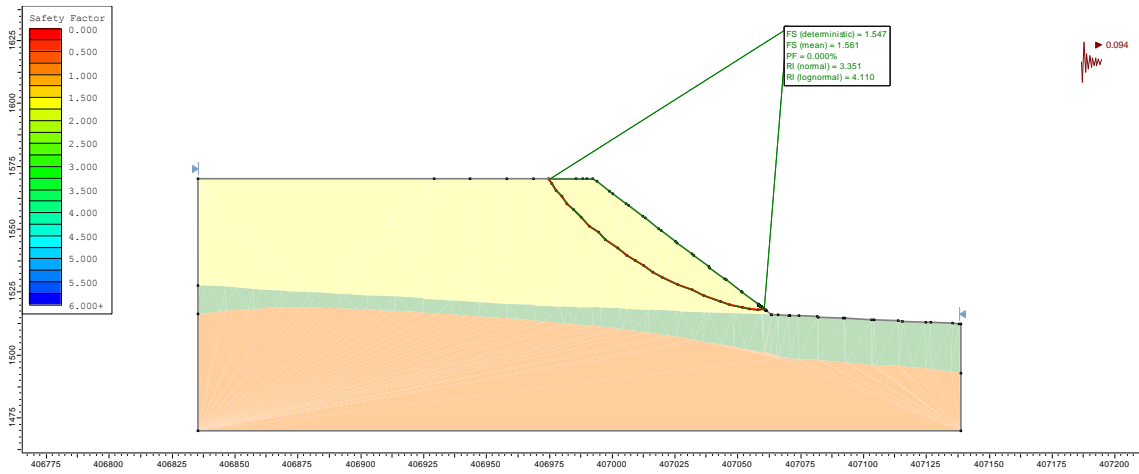


Figura 8.24: Resultado análisis sismo operacional mediante método Spencer

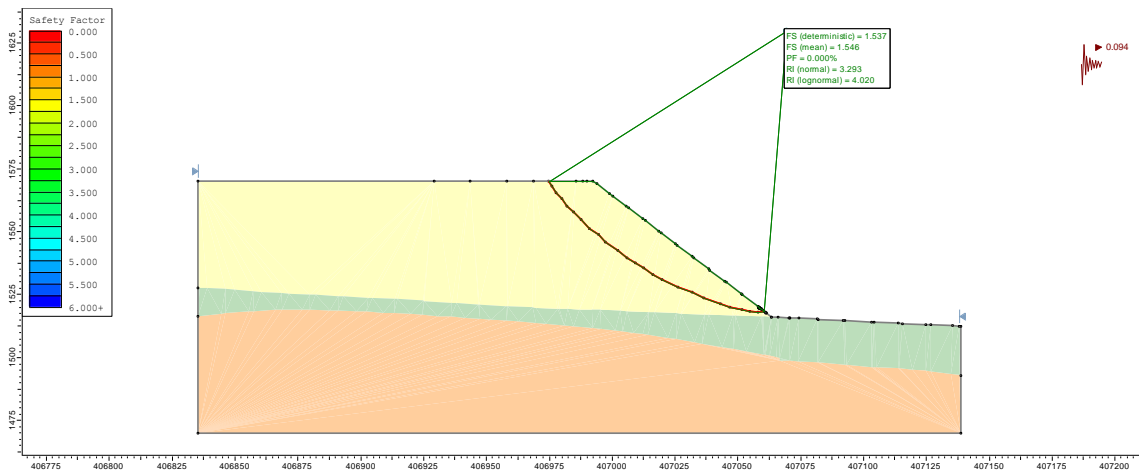


Figura 8.25: Resultado análisis sismo operacional mediante método GLE

8.12 ANEXO L

En el siguiente apartado se adjunta los resultados del análisis pseudoestático de sismo máximo probable realizado a la Sección D del Botadero Japón/India, con el propósito mostrar en detalle el Factor de Seguridad obtenido mediante los métodos de Bishop, Janbu, Spencer y GLE y que en esta ocasión de análisis no circular la sección corresponde a la más desfavorable en comparación a las demás secciones que también se evaluaron.

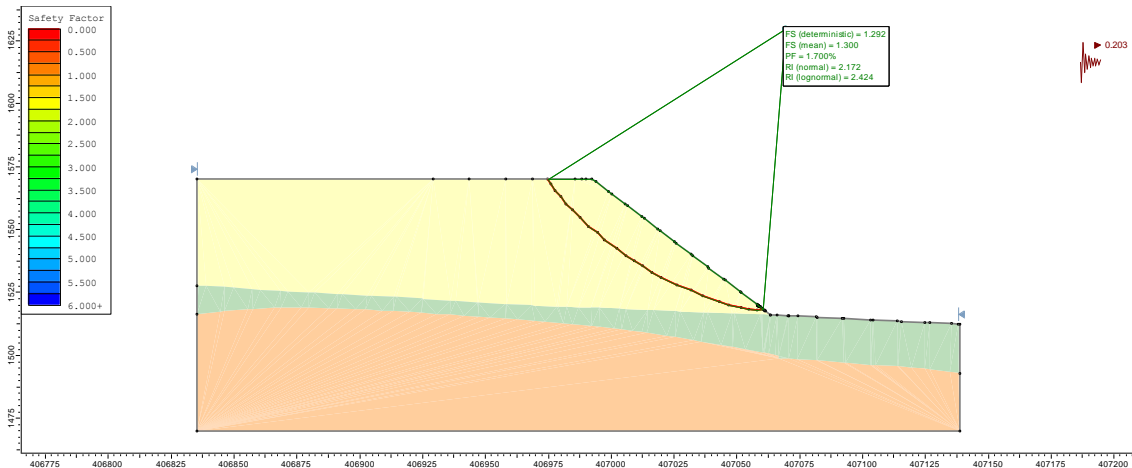


Figura 8.26: Resultado análisis sismo máximo probable mediante método Bishop

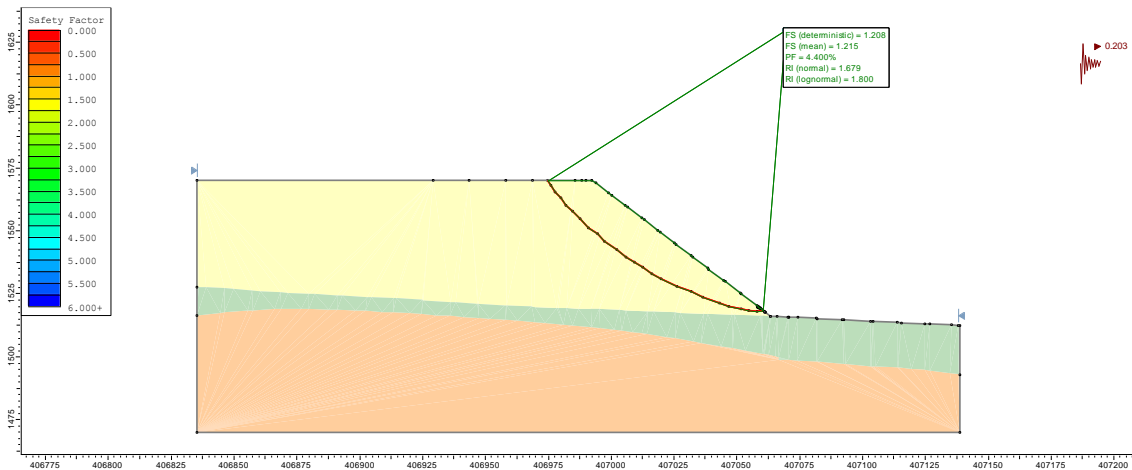


Figura 8.27: Resultado análisis sismo máximo probable mediante método Janbu

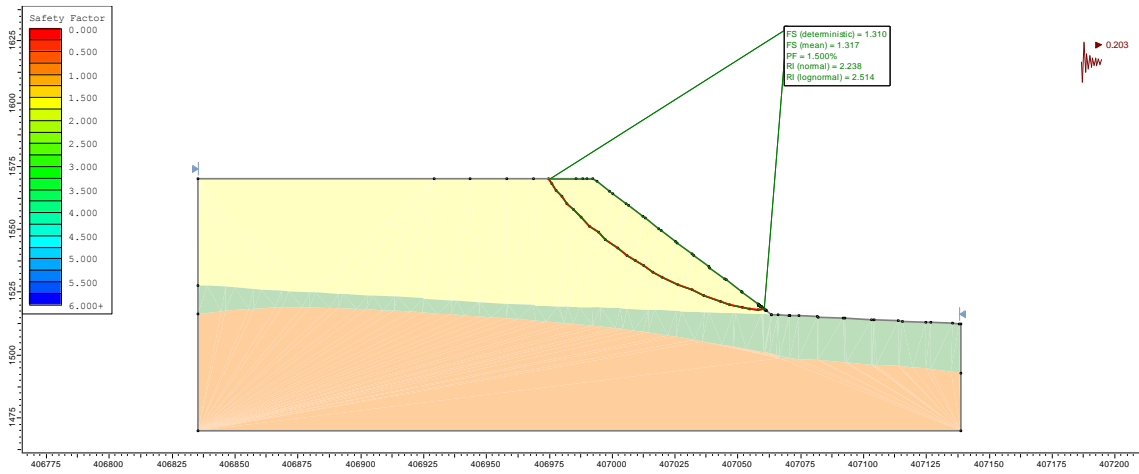


Figura 8.28: Resultado análisis sismo máximo probable mediante método Spencer

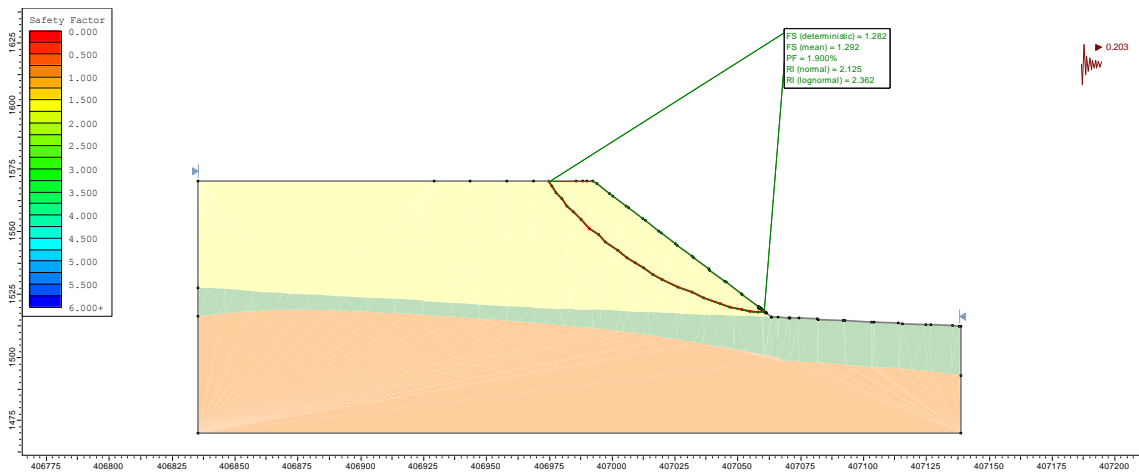


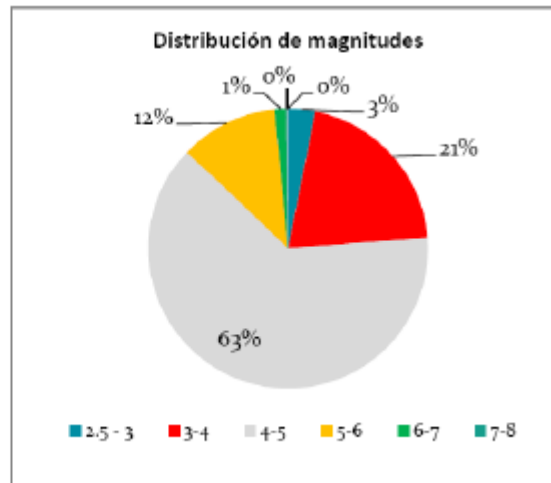
Figura 8.29: Resultado análisis sismo máximo probable mediante método GLE

8.13 ANEXO M

El estudio de sismicidad a escala regional y local, para el Proyecto Continuidad Mina Gabriela, se trabaja desde la base de dato del United States Geological Survey (USGS). En la Tabla 8.12 se recopilan la distribución de los sismos, donde se destacan 3 sismos de gran magnitud superior a 8 en la escala de Richter.

Tabla 8.12: Distribución de sismo corresponde a la zona de PCMG

Magnitud	Cantidad	%
2,5 - 3	466	3,15
3-4	3.060	20,68
4-5	9.363	63,28
5-6	1.682	11,37
6-7	200	1,35
7-8	23	0,16
> 8	3	0,02
Total	14.797	100



8.14 ANEXO N

A continuación, se observa en la Figura 8.30 la división de las zonas según (F. Leyton, 2009), donde el proyecto continuidad Mina Gabriela está ubicado en la zona 6, donde los valores de a y b para la ecuación de Gutenberg-Richter toman los valores de la Tabla 8.13.

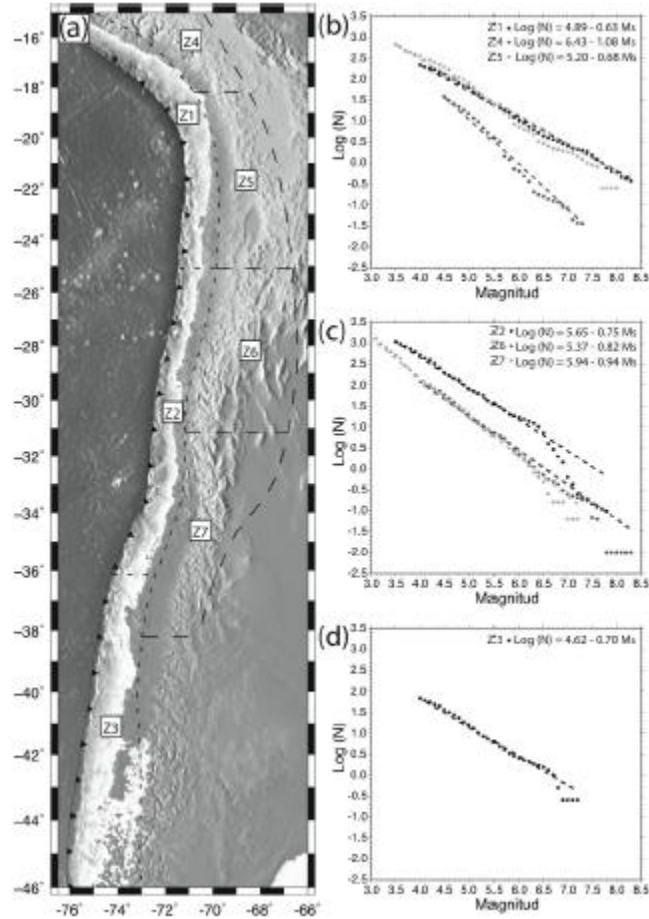


Figura 8.30: Mapa zonas (F. Leyton, 2009)

Tabla 8.13: Valores de a y b correspondiente para las zonas estudiadas

Zona	a	b
Z1	4,89	0,63
Z2	5,65	0,75
Z3	4,62	0,70
Z4	6,43	1,08
Z5	5,20	0,68
Z6	5,37	0,82
Z7	5,94	0,94

8.15 ANEXO Ñ

Periodo De Retorno De Sismos

El periodo de retorno corresponde al número de años en los cuales se espera suceda un sismo de magnitud considerable.

Para caracterizar la región según las distintas fuentes sismogénicas, se utiliza la ley de Gutenberg-Richter la cual establece una relación entre la frecuencia de sismo para magnitud M , determinada, en un periodo de tiempo establecido.

Donde N es el número acumulativo de eventos de magnitud igual o superior a M , el parámetro corresponde a la productividad sísmica entendida como la capacidad que tiene una determinada zona para generar terremotos y b es el coeficiente que indica la proporción de sismos pequeños con respecto a la cantidad de eventos mayores.

Para definir los valores de a y b , estos son seleccionados por medio del estudio realizado por Ruiz y Saragoni (2005) actualizadas por Leyton (F. Leyton, 2009) presenta un estudio destinado a una evaluación preliminar de riesgo sísmico en Chile, lo cual permite la comprensión de estos y su prevención en materia de pérdidas producidas por grandes terremotos. En el ANEXO N se observa un extracto de la zona de interés, la cual corresponde según la ubicación de los botaderos China Sur, Japón/India y Tailandia, y los valores utilizados para los cálculos de coeficientes.

$$\log N = a - Mb$$

Ecuación 12

Donde:

$N =$ Frecuencia acumulada de ocurrencia de eventos sísmicos

$M =$ Magnitud

a

$=$ Constante que relaciona la intensidad del movimiento con la magnitud de Richter

$b =$ Distancia focal en una zona sísmica

A partir de la aplicación de la Ecuación 12 de Gutenberg-Richter para sismos mayores a 7.0, se obtiene el periodo de retorno en años para dichos sismos, presentados en la Figura 8.31.



Figura 8.31: Periodo de retorno para la zona de PCMG

Coefficiente Sísmico Y Aceleración

El coeficiente sísmico es una representación de una fuerza inercial producida por movimientos fuertes de tierra durante un terremoto de diseño, y este se representa como una fracción de la aceleración sísmica máxima esperada en el sitio de interés.

En este caso para determinar el coeficiente sísmico, se definió un sismo operacional de 7,4 y un sismo máximo probable de magnitud 8,4.

Para determinar la aceleración, producida por este tipo de sismos, se utilizará la Ecuación 13:

$$\log a = \frac{I}{3} - \frac{1}{2}$$

Ecuación 13

Donde:

$$a = \text{Aceleración} \left(\frac{cm}{s^2} \right)$$

$I = \text{Intensidad del sismo}$

Aplicando esta Ecuación 13, a los valores de sismos superiores a 7,0 se obtiene la curva de aceleración que se describe en la Figura 8.32. En cuanto a la obtención del coeficiente sísmico, este se desprende de la división de la aceleración obtenida y la aceleración de gravedad. Considerando lo anterior se obtienen los valores de coeficiente sísmico que se muestran en la Figura 4.9.

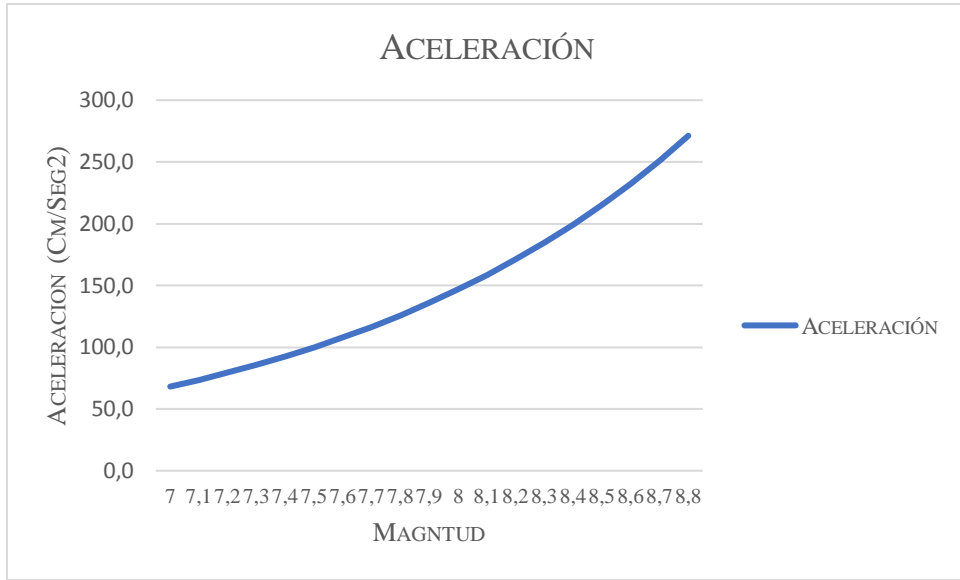


Figura 8.32: Aceleración para PCGM