



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

HACIA LA AUTOMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE
TALUDES MINEROS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO E INGENIERO
CIVIL DE MINAS

FELIPE JAVIER HERNÁNDEZ CÁCERES

PROFESOR GUÍA:
LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA
MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS
CRISTIAN POBLETE MATAMALA

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Geólogo e Ingeniero Civil de
Minas

POR: Felipe Javier Hernández Cáceres

FECHA: 13/03/2019

PROFESOR GUÍA: Luis Felipe Orellana Espinoza

HACIA LA AUTOMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES MINEROS

La estabilidad mecánica de taludes mineros es una temática de primera relevancia en todas las operaciones mineras a cielo abierto del mundo. Esto debido a que tiene repercusiones directas en la continuidad de la explotación y la seguridad de trabajadores, así como en la maquinaria e instalaciones mineras.

El procedimiento convencional de evaluación de estabilidad de taludes en minería a cielo abierto consiste en caracterizar su potencialidad de falla mediante un factor de seguridad. Este procedimiento se relaciona directamente con las etapas de planificación minera y de diseño minero en un macroproceso cuyo objetivo final es definir la geometría final del rajo. No obstante, su falta de integración se traduce en prolongados periodos de procesamiento y en resultados que no siempre maximizan el valor del proyecto minero.

El objetivo principal de este proyecto es obtener un procedimiento automatizado, que permita evaluar la estabilidad mecánica de taludes mineros y que pueda ser acoplado con los resultados tradicionales obtenidos en la etapa de planificación minera. Esto permite disminuir los tiempos de procesamiento y avanzar en la futura integración completa de los tres procedimientos: diseño, planificación y análisis de estabilidad.

Para alcanzar este objetivo, este trabajo utiliza e integra los softwares: Whittle y Surpac de GEOVIA, Abaqus y Isight de SIMULIA y Python de código abierto. Tras la integración de estos softwares, se presenta un procedimiento de evaluación de estabilidad de taludes mineros automatizado. Este procedimiento recibe como variable de entrada el modelo de bloques proveniente de la etapa de planificación minera y las propiedades del macizo rocoso. Con esto se abre la puerta a nuevas oportunidades en la planificación de minas a cielo abierto, ya que ahora es posible caracterizar la estabilidad de las paredes del rajo planeado, considerando la espacialidad y temporalidad de la explotación. El modelo automatizado es apto para realizar análisis de sensibilidad, al modificar las variables de entrada.

Los resultados de este estudio muestran la importancia de considerar la incertidumbre en los parámetros de entrada. En efecto, se detecta una caída dramática del 81% al 31% de los taludes considerados estables, al reducir un 15% los parámetros de Mohr-Coulomb, asociados a la resistencia de la roca.

TOWARDS THE AUTOMATION OF MINE SLOPE STABILITY ANALYSIS

The stability of slopes is one of the most important challenges for the exploitation of all open-pit mines in the world. In the literature and in practice, there is indeed vast evidence that recognizes the importance the stability of slopes amongst the most important factors that guarantee the mine exploitation and secure the safety of the workers, machinery and infrastructure.

The conventional approach for assessing the slope stability in open pit mining is to characterize its potential for failure by a safety factor. This procedure is directly related to the stages of mining planning and mining design in a macroprocess. Here the final objective is to define the final geometry of the pit. However, the lack of integration of these stages translates into time-consuming periods of processing. Moreover, results do not always maximize the value of the mining project.

This aim of this project is to introduce an automatic procedure that integrates the stability of slopes and the mine planning process for open-pit mine operations. In this way, time consuming processes can be now handled efficiently, while the stability of slopes is examined in an environment where mine planning process is integrated.

This project integrates the following software: Whittle and Surpac from GEOVIA, Abaqus and Isight from SIMULIA, and Python, an open source code. In this way, this work generates an automatic slope stability procedure, which receives as input variables the mine planning results e.g., the blocks to extract in every period, and the rock massif properties e.g., the cohesion and friction angle. This allows characterizing the open pit stability by considering both spatiality and the temporality of an open pit mine exploitation. The automatic model here, is suitable for sensitivity analysis when modifying the input variables.

The results of this work show the importance of considering the uncertainty of the input parameters during the mine planning processes. For instance, in a case study included in this work, a dramatic fall from 81% to 31% of the slopes considered stable was detected by reducing the rock strength parameters by 15%.

Quisiera dedicar la tranquilidad y felicidad que tengo al terminar este trabajo a quienes han dedicado algo de su tiempo en brindarme apoyo, en darme algún consejo o sacarme una carcajada jeje. Pero en especial quiero dedicárselo a quien ha hecho todo eso y mucho muchísimo más:

Gracias mamá por levantarte temprano, día a día, por más de veintiséis años y por enseñarme cómo luchar por mis sueños.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Generalidades.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos metodológicos.....	3
1.2.3	Alcances.....	3
2	Marco técnico y teórico.....	4
2.1	Conceptos principales.....	4
2.1.1	Talud.....	4
2.1.2	Talud minero.....	4
2.1.3	Análisis de estabilidad de taludes.....	5
2.1.4	Automatización.....	11
2.2	Softwares utilizados y sus características.....	12
2.2.1	Abaqus.....	12
2.2.2	Isight.....	12
2.2.3	Python.....	13
2.2.4	Surpac.....	13
2.2.5	Whittle.....	14
3	Antecedentes.....	15
3.1	Geometría discretizada del talud.....	15
3.2	Tipo y propiedades de los elementos.....	18
3.3	Propiedades de material.....	18
3.4	Historial de simulación.....	19
3.4.1	Procedimientos de análisis.....	20
3.4.2	Fuerzas aplicadas y condiciones de borde.....	20
3.4.3	Campo de esfuerzos inicial.....	21
3.4.4	Requerimientos de salida.....	21
3.4.5	Implementación del MRR.....	21
3.4.6	Reducción del ángulo de dilatación.....	22
3.5	Criterios de convergencia de los resultados.....	22
3.5.1	Incrementación.....	22
3.6	Resultados obtenidos por otros autores.....	22
3.6.1	Resultados numéricos.....	23

3.6.2	Resultados asociados al comportamiento de la solución.....	23
3.6.3	Resultados visuales.....	25
4	Metodología.....	26
4.1	Modelo-A.....	28
4.1.1	Procedimiento de análisis de forma manual.....	28
4.1.2	Detección de variables del procedimiento manual.....	29
4.1.3	Automatización.....	29
4.1.4	Diseño de experimentos para el Modelo-A.....	30
4.1.5	Efecto del ángulo de dilatación.....	32
4.2	Modelo-B.....	34
4.2.1	Obtención de secciones en 2D.....	34
4.2.2	Automatización de la generación de secciones en 2D.....	34
4.2.3	Separación de paredes contenidas en la misma sección.....	35
4.2.4	Generación del modelo de elementos finitos.....	36
4.2.5	Integración de los procedimientos.....	38
4.2.6	Diseño de experimentos para el Modelo-B.....	40
5	Implementación y resultados.....	41
5.1	Modelo-A.....	41
5.1.1	Automatización del modelo.....	41
5.2	Modelo-B.....	42
5.2.1	Automatización del modelo.....	42
5.2.2	Resultados visuales.....	48
6	Análisis de resultados.....	50
6.1	Modelo-A.....	50
6.1.1	Automatización del modelo.....	50
6.1.2	Diseño de experimentos.....	50
6.2	Modelo-B.....	52
6.2.1	Automatización del modelo.....	52
6.2.2	Diseño de experimentos.....	53
6.2.3	Resultados visuales.....	54
7	Conclusiones.....	55
8	Bibliografía.....	58
9	Anexos.....	61
9.1	Características de Abaqus.....	61

9.1.1	Productos principales.....	61
9.1.2	Etapas de un análisis en Abaqus.....	61
9.1.3	Componentes de un modelo en Abaqus	62
9.1.4	Otros conceptos asociados a Abaqus.....	65
9.2	Terminología y herramientas de análisis de resultados asociadas a Isight	67
9.2.1	Experimento	67
9.2.2	Factores estudiados.....	67
9.2.3	Niveles y tratamientos	67
9.2.4	Error aleatorio.....	68
9.2.5	Diseño completamente al azar.....	68
9.2.6	Análisis de varianza.....	68
9.2.7	Diseño factorial.....	68
9.2.8	Matriz de diseño	68
9.2.9	Efecto de un factor.....	68
9.2.10	Tabla de ANOVA.....	69
9.2.11	Gráfico de efectos principales	69
9.2.12	Gráfico de Pareto	70
9.3	Detección de variables del procedimiento manual del Modelo-A.....	70
9.3.1	Geometría discretizada del talud	70
9.3.2	Tipo y propiedades de los elementos.....	72
9.3.3	Propiedades del material.....	72
9.3.4	Historial de simulación.....	72
9.3.5	Procedimientos de análisis	73
9.3.6	Criterios de convergencia de los resultados	75
9.4	Resultados del Modelo-A	75
9.4.1	Incertidumbre en las variables de entrada	75
9.4.2	Incertidumbre en las variables de diseño.....	82
9.4.3	Resultados visuales.....	98
9.4.4	Efecto del ángulo de dilatación.....	102
9.5	Resultados del Modelo-B.....	103
9.5.1	Tabla de resultados de ejemplo	103
9.6	Análisis del Modelo-A.....	106
9.6.1	Incertidumbre en las variables de diseño.....	106
9.6.2	Resultados visuales.....	109

Índice de figuras

Figura 1.1: Deslizamiento de gran envergadura ocurrido en la mina del cañón de Bingham en abril del 2013. Fuente: www.mining.com	1
Figura 1.2: Ciclo cerrado e iterativo en el cual se encuentra inmerso el procedimiento de análisis de estabilidad de taludes, en el contexto de minería de rajo. Fuente: elaboración propia.	2
Figura 2.1: Taludes naturales en las montañas Pitons, Venezuela. Fuente: www.edition.cnn.com , fotógrafo: Philippe Giraud.	4
Figura 2.2: Esquema de taludes mineros. Se destacan los conceptos asociados de: pie, cresta, altura, base y ángulo de talud. Elaboración propia.	5
Figura 2.3: Posibles superficies de fallas circulares de un talud. Basada de Suarez (2009). .	7
Figura 2.4: Ejemplo del uso del método de equilibrio límite al dividir en tajadas el cuerpo libre. Se muestran las fuerzas actuantes sobre una de ellas. Basada de Suarez (2009).	8
Figura 2.5: Círculo de Mohr y variación de la envolvente de falla al aplicar el MRR. Tomada de Dyson & Tolooiyan (2018).	10
Figura 3.1: Parámetros y variables asociados a la geometría artificial del modelo. Basada en Kai & Yin (2012).	16
Figura 3.2: Diferentes enmallados utilizadas por autores previos para discretizar la geometría del modelo de talud en dos dimensiones.	17
Figura 3.3: Condiciones de borde tradicionales para el MRR. Basada en Kai & Yin (2012).	20
Figura 3.4: Resultados visuales obtenidos por otros autores.	25
Figura 4.1: Resumen esquemático de los Modelo-A y Modelo-B.	27
Figura 4.2: Procedimiento manual de análisis de taludes simplificados. Elaboración propia.	28
Figura 4.3: Procedimiento automatizado para el análisis de estabilidad de taludes del Modelo-1. Elaboración propia.	29
Figura 4.4: Vista en dos dimensiones de diferentes fases de explotación, basadas en un modelo de bloques. Elaboración propia.	35
Figura 4.5: Separación de paredes de la segunda fase de explotación mostrada en la Figura 4.4. Elaboración propia.	36
Figura 4.6: Distribución de elementos finitos sobre un talud minero. Elaboración propia. .	36
Figura 4.7: Tamaño de los bloques en dos dimensiones según el rumbo de la sección de análisis. Elaboración propia.	37
Figura 4.8: Esquema de los bancos de un talud. Elaboración propia.	37
Figura 4.9: Integración propuesta para el Modelo-B. Elaboración propia.	39
Figura 5.1: Modelo-A automatizado.	41
Figura 5.2: Modelo-B automatizado.	44
Figura 5.3: Patrones de deformación observados en la ejecución del Modelo-B.	47
Figura 5.4: Funcionamiento del Modelo-B mostrado de forma gráfica.	49

Figura 9.1: Etapas de un análisis típico en Abaqus. Tomada de la guía <i>Getting Started with Abaqus. Interactive Edition</i> (2008) elaborada por Dassault Systèmes.....	62
Figura 9.2: Familias de elementos de Abaqus.....	63
Figura 9.3: Tipos de distribución de los elementos considerados, para discretizar la geometría de talud analizada. Elaboración propia.....	71
Figura 9.4: Variables de diseño l_x y l_y asociadas al tamaño máximo de los elementos en los ejes 1 y 2 respectivamente. Elaboración propia.	71
Figura 9.5: Tipos de elementos considerados expresados en la variable de diseño <i>elem_type</i> con dos niveles. Basada en la guía <i>Isight User's Guide</i> (2018) elaborada por Dassault Systèmes.....	72
Figura 9.6: Historial de simulación y procedimientos de análisis. Elaboración propia.	73
Figura 9.7: Condición de borde variable para los límites laterales del modelo. Elaboración propia.....	74
Figura 9.8: Progresión de la deformación plástica experimentada por el talud de roca al incrementar el valor de SRF.	99
Figura 9.9: Superficie final de deformación plástica modificando los parámetros: <i>elem_type</i> , <i>wi</i> , <i>wd</i> y <i>hb</i> del talud de suelo, y el FS obtenido para tal configuración.	100
Figura 9.10: Ejemplo de deformaciones, esfuerzos y desplazamientos obtenidos utilizando el método de reducción de la resistencia. Se muestran tres incrementos distintos y el SRF asociado hasta el punto de falla.	101

Índice de gráficos

Gráfico 5.1: Frecuencia acumulada del FS, obtenida para el Plan-45.....	46
Gráfico 5.2: Frecuencia acumulada de la altura de taludes, obtenida para el Plan-45.	46
Gráfico 9.1: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.....	76
Gráfico 9.2: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática, para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.....	77
Gráfico 9.3: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.	77
Gráfico 9.4: Gráfico de interacción ángulo de talud-ángulo de fricción, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.	78
Gráfico 9.5: Gráfico de interacción razón de Poisson-altura de talud, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.	78
Gráfico 9.6: Gráfico de interacción razón de Poisson-peso específico, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.	79
Gráfico 9.7: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de roca.	80
Gráfico 9.8: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática, para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de roca.	80
Gráfico 9.9: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de roca.....	81
Gráfico 9.10: Gráfico de interacción altura de talud-cohesión, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de roca.	81

Gráfico 9.11: Gráfico de interacción ángulo de talud-ángulo de fricción, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de roca. .	82
Gráfico 9.12: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.	83
Gráfico 9.13: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.	84
Gráfico 9.14: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.	84
Gráfico 9.15: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo. Segunda parte.	85
Gráfico 9.16: Gráfico de interacción ángulo de dilatancia- <i>elem_type</i> , obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.	85
Gráfico 9.17: Gráfico de interacción ángulo de dilatancia- <i>geom_type</i> , obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.	86
Gráfico 9.18: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca.	87
Gráfico 9.19: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca.	88
Gráfico 9.20: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca.	88
Gráfico 9.21: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca. Segunda parte.	89
Gráfico 9.22: Gráfico de interacción ángulo de dilatancia- <i>geom_type</i> , obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca.	89
Gráfico 9.23: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de suelo.	92
Gráfico 9.24: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de suelo.	92
Gráfico 9.25: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de suelo.	93
Gráfico 9.26: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de suelo. Segunda parte.	93
Gráfico 9.27: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de roca.	95
Gráfico 9.28: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de roca.	95
Gráfico 9.29: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de roca.	96
Gráfico 9.30: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de roca. Segunda parte.	96
Gráfico 9.31: Efecto del ángulo de dilatancia sobre el FS computado para el talud de suelo.	102
Gráfico 9.32: Efecto del ángulo de dilatancia sobre el FS computado para el talud de roca.	103

Índice de tablas

Tabla 2.1: Criterios de aceptación típicos en la industria minera de rajos. Tomada de (Read & Stacey, 2009)	6
Tabla 4.1: Variables de entrada y parámetros utilizados para evaluar la incertidumbre de las variables de entrada sobre el FS, en el modelo de talud de suelo.	31
Tabla 4.2: Variables de entrada y parámetros utilizados para evaluar la incertidumbre de las variables de entrada sobre el FS, en el modelo de talud de roca.	31
Tabla 4.3: Variables de diseño utilizadas para evaluar su impacto sobre el factor de seguridad computado del experimento-A.	33
Tabla 4.4: Variables de diseño utilizadas para evaluar su impacto sobre el factor de seguridad computado del experimento-B.	33
Tabla 5.1: Resumen de variables del Modelo-A.	42
Tabla 5.2: Estadísticas básicas de las variables de respuesta del Modelo-B, al analizar diferentes modelos de planificación.	45
Tabla 5.3: Tiempo de trabajo total y media por talud, asociado a cada modelo de planificación evaluado.....	45
Tabla 5.4: Variación porcentual del FS y el porcentaje de paredes aceptables, ante una variación porcentual del 15% en los parámetros de MC.	48
Tabla 9.1: Ejemplo de tabla de ANOVA de Isight.....	69
Tabla 9.2: Tiempo de trabajo del Modelo-A para la evaluación de la incertidumbre en las variables de entrada, en el talud de suelo.	76
Tabla 9.3: Tiempo de trabajo del Modelo-A para la evaluación de la incertidumbre en las variables de entrada, en el talud de roca.	79
Tabla 9.4: Tiempo de trabajo del Modelo-A para el experimento-A en el talud de suelo ...	83
Tabla 9.5: Tabla de ANOVA para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.	86
Tabla 9.6: Tiempo de trabajo del Modelo-A para el experimento-A en el talud de roca.	87
Tabla 9.7: Tabla de ANOVA para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca.....	90
Tabla 9.8: Tabla comparativa de los efectos obtenidos por los gráficos de Pareto del experimento-A, para ambos taludes.	90
Tabla 9.9: Tabla comparativa de los efectos obtenidos por los gráficos de Pareto y tablas de ANOVA del experimento-A, para ambos taludes.	91
Tabla 9.10: Tiempo de trabajo del Modelo-A para el experimento-B en el talud de suelo.	91
Tabla 9.11: Tabla de ANOVA para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de suelo.	94
Tabla 9.12: Tiempo de trabajo del Modelo-A para el experimento-B en el talud de roca. ...	94
Tabla 9.13: Tabla de ANOVA para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de roca.	97
Tabla 9.14: Tabla comparativa de los efectos obtenidos por los gráficos de Pareto del experimento-B, para ambos taludes.....	97
Tabla 9.15: Tabla comparativa de los efectos obtenidos por los gráficos de Pareto y tablas de ANOVA del experimento-B, para ambos taludes.	98
Tabla 9.16: Ejemplo de los resultados obtenidos utilizando el modelo-B.	103

Fórmula 2.1: Definición del FS considerando resistencia disponible y esfuerzos actuantes.	6
Fórmula 2.2: Definición del FS considerando momento resistente y actuante.	6
Fórmula 2.3: Definición del FS para el método de equilibrio límite, considerando resistencia disponible y esfuerzos actuantes.....	8
Fórmula 2.4: Definición del FS para el método de equilibrio límite, considerando momento resistente y actuante.....	8
Fórmula 2.5: Criterio de falla de Mohr-Coulomb	9
Fórmula 2.6: Razón de reducción de la cohesión en el MRR.	9
Fórmula 2.7: Razón de reducción del ángulo de fricción en el MRR.	9
Fórmula 2.8: Factor de seguridad obtenido al realizar el MRR.	9
Fórmula 3.1: Esfuerzos iniciales del talud en sus componentes vertical y horizontal.	21
Fórmula 3.2: Constante que relaciona los esfuerzos iniciales vertical y horizontal.....	21
Fórmula 3.3: Método alternativo de reducción de los parámetros de resistencia.....	22
Fórmula 3.4: Reducción del ángulo de dilatancia para material con flujo no asociado.	22
Fórmula 9.1: Carga aplicada en cada <i>incremento</i> de un <i>step</i>	66
Fórmula 9.2: Parámetros l_x y l_y controlan el tamaño máximo de los elementos.	71
Fórmula 9.3: Parámetro de control del ángulo de dilatancia, en casos de ser desconocido o no reportado.....	72
Fórmula 9.4: Espaciamiento de los datos ingresados asociados a el MRR.....	75

1 Introducción

1.1 Generalidades

La estabilidad mecánica de taludes mineros es una temática de central interés y de suma relevancia en todas las operaciones mineras a cielo abierto del mundo. No solo está relacionada de manera directa con la preservación de la geometría de las paredes de un rajo, sino también, con la continuidad de la explotación misma, con la seguridad de los trabajadores y la preservación de maquinaria e instalaciones mineras. Un buen análisis de estabilidad permite evitar grandes deslizamientos de roca como el ocurrido en la mina del cañón de Bingham, Kennecott Utah Cooper, ubicada en Utah, Estados Unidos, en abril del 2013 como se muestra en la Figura 1.1.



Figura 1.1: Deslizamiento de gran envergadura ocurrido en la mina del cañón de Bingham en abril del 2013.

Fuente: www.mining.com.

En el contexto de minería a cielo abierto, el procedimiento de análisis de estabilidad de taludes, que permite caracterizar la estabilidad mecánica de las paredes de un rajo, forma parte de un macroproceso, cuyo objetivo es definir el diseño o geometría final que tendrán las paredes de la mina. Integran también este macroproceso los procedimientos de planificación minera y de diseño minero, los cuales permiten definir las fases de explotación y el diseño de las paredes del rajo respectivamente. Además de ser procedimientos colaborativos y dependientes entre ellos, cada uno de ellos depende de una serie de variables o parámetros que varían en el tiempo, como se muestra en la Figura 1.2. Cualquier agente externo que afecte alguno de los procedimientos, afecta también al macroproceso completo.

El procedimiento convencional, utilizado para evaluar la estabilidad mecánica de taludes, consiste en caracterizar su potencialidad de falla o deslizamiento mediante un valor numérico, denominado factor de seguridad. Este valor es comparable con un criterio de

aceptabilidad, valor numérico definido por juicio experto que determina el factor de seguridad mínimo que garantiza la preservación de la geometría del talud, durante toda su vida útil.

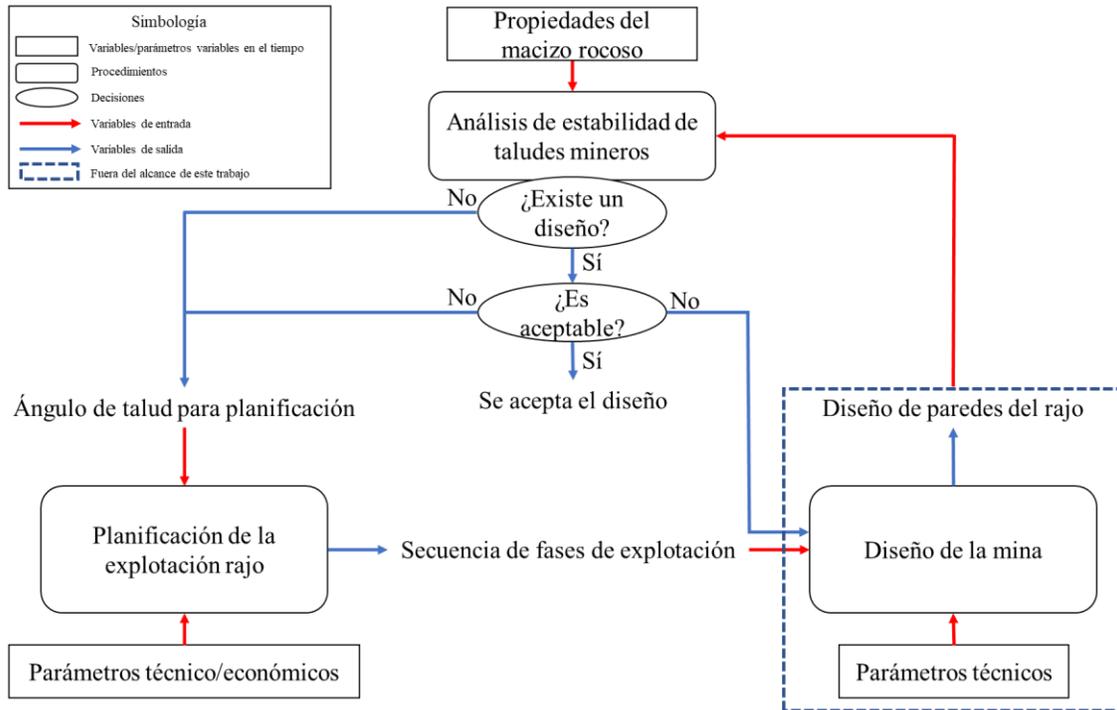


Figura 1.2: Ciclo cerrado e iterativo en el cual se encuentra inmerso el procedimiento de análisis de estabilidad de taludes, en el contexto de minería de rajos. Fuente: elaboración propia.

El diseño de la mina es aceptado cuando logra satisfacer los objetivos de cada procedimiento por separado, basados principalmente en beneficio económico, operatividad y seguridad. Se desprende que: cada procedimiento posee objetivos e indicadores claves (KPI) diferentes y es realizado de forma independiente y por distintos grupos de profesionales. Esta falta de integración se traduce en: prolongados periodos de procesamiento y en resultados que no siempre maximizan el valor del proyecto minero.

Los largos plazos requeridos para conseguir un diseño definitivo no permiten responder de manera rápida y efectiva a numerosas perturbaciones de corto plazo que impactan en la planificación, diseño y análisis de estabilidad, como: el precio de los *commodities*, el aumento de información geotécnica disponible o cambios en las capacidades operativas de extracción y procesamiento de minerales. Esto conlleva a resolver, constantemente, un problema ya expirado, bajo condiciones y restricciones no actualizadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es generar un procedimiento automatizado de evaluación de estabilidad mecánica de taludes mineros, que pueda acoplarse a procedimientos automáticos de planificación minera de rajos, ya disponibles en el mercado.

Esto permitiría disminuir la duración del macroproceso conjunto, mejorar la respuesta ante perturbaciones de las condiciones iniciales de análisis y unificar los objetivos e indicadores claves de rendimiento. Al agilizar la ejecución del análisis de estabilidad, sería posible incluir la incertidumbre de los parámetros geotécnicos, expresadas en el ángulo de talud de planificación, y detectar escenarios que aumenten el beneficio económico del proyecto minero utilizando análisis multi-escenarios.

1.2.2 Objetivos metodológicos

Para llevar a cabo el objetivo general se plantean una serie de objetivos metodológicos que lo anteceden:

- i. Determinar un procedimiento de análisis de estabilidad mecánica de taludes utilizando software de elementos finitos; que sea posible de automatizar.
- ii. Automatización del procedimiento; incorporando la mayor cantidad de variables o parámetros que afecten sus resultados.
- iii. Analizar el comportamiento de los resultados del procedimiento automatizado, contrastándolo con resultados de referencia.
- iv. Modificar el procedimiento ya validado, para analizar taludes mineros, provenientes de una etapa de planificación minera.

1.2.3 Alcances

Los alcances o limitaciones que presenta este proyecto son:

- i. Para llevar a cabo el análisis de estabilidad y su automatización se cuenta con los softwares: Whittle y Surpac de GEOVIA, Abaqus y Isight de SIMULIA, y Python de código abierto.
- ii. El análisis de estabilidad se realizará para geometrías en dos dimensiones.
- iii. El procedimiento automatizado solo contempla la etapa de análisis de estabilidad mecánica de taludes, el cual recibe resultados de planificación como variables de entrada.
- iv. No se considerará la integración con el procedimiento de diseño minero, por lo tanto, se analizarán las paredes de la mina provenientes directamente de la etapa de planificación minera. Por este motivo solo se analizarán paredes de mina cuya geometría representa de forma aproximada la geometría que tendrían dichas paredes, tras la etapa de diseño minero.
- v. Se considerará el macizo rocoso como un material de tipo: isótropo, homogéneo y drenado, que cumple el criterio de falla de Mohr-Coulomb.

2 Marco técnico y teórico

2.1 Conceptos principales

A continuación, se detallan los conceptos principales abordados a lo largo de este informe. La lectura de esta sección es fundamental para unificar conceptos y es absolutamente recomendada para el lector.

2.1.1 Talud

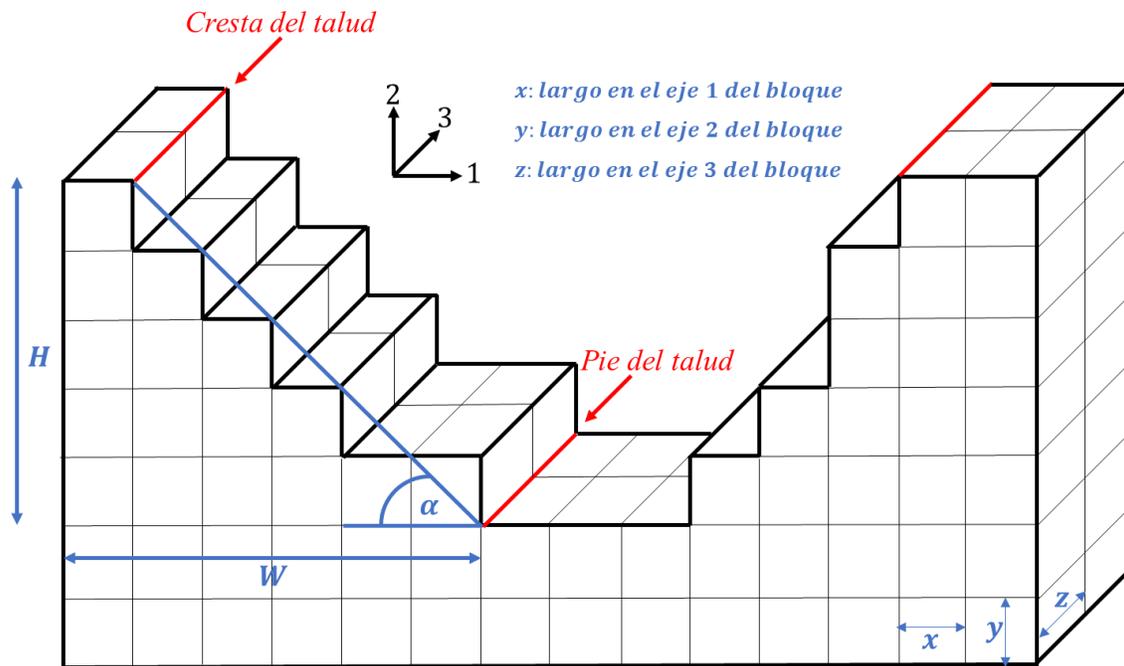
Corresponde a cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que las estructuras de la tierra adopten permanentemente, ya sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana (SERNAGEOMIN & PUCV, 2018). En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo de taludes naturales, formados por la erosión continua de la roca en las montañas Pitons en Venezuela.



Figura 2.1: Taludes naturales en las montañas Pitons, Venezuela. Fuente: www.edition.cnn.com, fotógrafo: Philippe Giraud.

2.1.2 Talud minero

En este informe se utilizará el concepto de *talud minero*, para hacer referencia a las paredes de una mina a rajo, generadas como resultado del procedimiento de planificación minera. Estos taludes son representados en base a un modelo de bloques y son una primera aproximación a la geometría que adoptará el rajo, durante el proceso de extracción. En la Figura 2.2 se esquematizan dos paredes de un rajo basadas en bloques de iguales dimensiones: x , y y z ; y se muestran los conceptos asociados a un talud minero: *pie*, *cresta*, *altura* (H), *base* (W) y *ángulo de talud* (α).



H: Altura del talud W: Base del talud α : Ángulo del talud

Figura 2.2: Esquema de taludes mineros. Se destacan los conceptos asociados de: pie, cresta, altura, base y ángulo de talud. Elaboración propia.

2.1.3 Análisis de estabilidad de taludes

Es una práctica de la ingeniería geotécnica, con el objeto de analizar y modelar matemáticamente las condiciones de estabilidad de los taludes naturales y la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales (Suarez, 2009). Computar el factor de seguridad y la locación de la superficie crítica de falla forman las bases de esta práctica, llevada a cabo utilizando un enfoque determinístico o probabilístico (Carranza-Torres & Hormazabal, 2018).

Se describen a continuación tres conceptos claves del análisis de estabilidad y dos métodos con que se lleva a cabo.

2.1.3.1 Factor de seguridad (FS)

Si bien el concepto de factor de seguridad (FS) está bien establecido dentro de la ingeniería geotécnica, no hay una definición única y debe adaptarse al diseño en particular. En el caso de problemas de análisis de estabilidad de taludes, el factor de seguridad es usualmente definido respecto a la resistencia del terreno (Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis, 2015).

Para un talud, el FS es a menudo considerado como la razón entre la resistencia al corte disponible y la resistencia al corte mínima del terreno que es requerida para mantener el talud en equilibrio (Bishop, 1955). También se puede considerar como el factor mínimo por el cual la resistencia (al corte) del terreno debe ser reducida, para producir una falla inminente

(Duncan, 1996). En términos prácticos el FS puede ser computado según las Fórmula 2.1 y Fórmula 2.2 tomadas de Suarez (2009):

$$FS = \frac{\textit{Resistencia al corte disponible}}{\textit{Esfuerzo cortante actuante}}$$

Fórmula 2.1: Definición del FS considerando resistencia disponible y esfuerzos actuantes.

$$FS = \frac{\textit{Momento resistente disponible}}{\textit{Momento actuante}}$$

Fórmula 2.2: Definición del FS considerando momento resistente y actuante.

2.1.3.2 Criterio de aceptabilidad

El criterio de aceptabilidad del diseño minero es un valor que refleja los requerimientos de estabilidad de las paredes del rajo en términos de un perfil de riesgo corporativo. Tradicionalmente, el criterio de aceptabilidad ha sido realizado en base a un factor de seguridad mínimo permitido. Sin embargo, a través de los años, otros criterios de aceptación han sido introducidos, como la probabilidad de falla (PF), que corresponde a la probabilidad de que el FS sea menor a 1, o las consecuencias de un desplazamiento (Read & Stacey, 2009).

El nivel de riesgo que puede ser aceptado por una compañía minera es una decisión corporativa. Pero también se encuentra gobernada por una compleja mezcla entre la cultura de la compañía (la actitud frente al riesgo), requerimientos legislativos, económicos y la visión social (Read & Stacey, 2009). En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de criterios de aceptación utilizado por las compañías mineras de rajo, según el nivel riesgo de ocurrencia de una falla.

Tabla 2.1: Criterios de aceptación típicos en la industria minera de rajos. Tomada de (Read & Stacey, 2009)

Criterio de aceptación		
Consecuencias de la falla	FS mínimo	PF
Bajas	1,2-1,3	15-20%
Moderadas	1,3	10%
Altas	1,3-1,5	5%

2.1.3.3 Rotura o fallamiento

Se considera que un talud ha fallado cuando ha alcanzado niveles de desplazamientos que generan inseguridad para operar o bajo los cuales el talud ya no cumple las funciones para las cuales fue construido. Tiene por consecuencia un cambio en la configuración y el diseño ingenieril inicial. Se habla de una falla o rotura progresiva cuando los desplazamientos aceleran lentamente, hasta el punto de colapso (Read & Stacey, 2009).

2.1.3.4 Superficie de falla

El término superficie (crítica) de falla se utiliza para referirse a aquella superficie, a lo largo de la cual, puede ocurrir un deslizamiento o rotura del talud (Suarez, 2009).

Una práctica común es asumir que la superficie crítica de falla es de forma circular (Carranza-Torres & Hormazabal, 2018) como se muestra en la Figura 2.3.

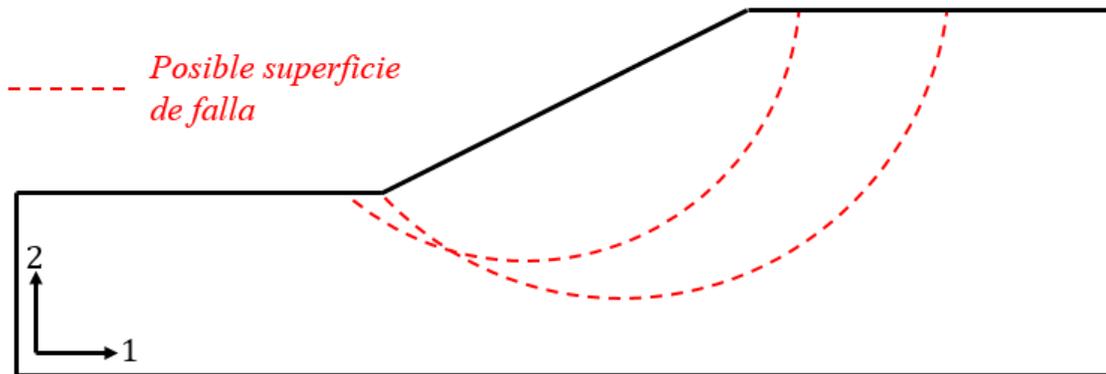


Figura 2.3: Posibles superficies de fallas circulares de un talud. Basada de Suarez (2009).

Existe una gran cantidad de metodologías de modelación matemática de taludes, cuyo uso depende del objetivo del análisis y de los resultados que se deseen obtener (Suarez, 2009). En este informe se hará referencia a dos de estos métodos: de equilibrio límite (MEL) y de reducción de la resistencia (MRR). Se destaca, que estos métodos no son invariantes en el tiempo y, además, su implementación, consideraciones o supuestos y resultados obtenidos de su uso varían según el autor que lo utilice. Por este motivo, y en lo siguiente, se hará referencia a “el/los MEL/MRR” o “el/los método(s) basados en el MEL/MRR” indistintamente.

2.1.3.5 Método de equilibrio límite (MEL)

Los métodos de equilibrio límite han sido la manera principal de estimar la estabilidad de taludes por décadas. Estos procedimientos están basados en encontrar el factor de seguridad del talud asociado a diferentes superficies de falla (Ho, 2014).

El método del equilibrio límite establece que la rotura del terreno se produce a través de una línea que representa la superficie de rotura. De esta forma, se interpreta que la masa de terreno por encima de dicha línea se desplaza respecto la masa inferior, produciéndose, así, la rotura del terreno (UPC, 2008).

Para calcular las fuerzas actuantes y resistentes se divide al cuerpo libre (masa que se encuentra por sobre la superficie de falla) en tajadas, dovelas o bloques (Suarez, 2009) y se calcula el momento y fuerzas acumulados para la masa total deslizante. En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo de este método y las fuerzas actuantes sobre una tajada: fuerza de peso (P), fuerza de fricción (F_R), fuerza normal (N_R) y las fuerzas horizontales (E_n, E_{n+1}) y verticales (T_n, T_{n+1}) ejercidas por las tajadas contiguas; las que se deben encontrar en equilibrio de fuerzas y momento, utilizando las Fórmula 2.3 y Fórmula 2.4 . Al estudiar diferentes superficies de falla, el FS mínimo obtenido corresponderá al FS del talud.

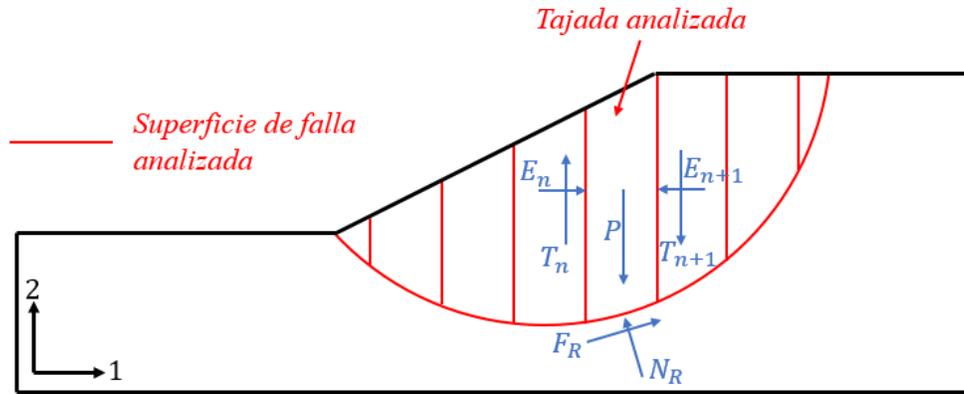


Figura 2.4: Ejemplo del uso del método de equilibrio límite al dividir en tajadas el cuerpo libre. Se muestran las fuerzas actuantes sobre una de ellas. Basada de Suarez (2009).

$$FS = \frac{\sum_{tajadas} \text{Resistencia al corte disponible}}{\sum_{tajadas} \text{Esfuerzo cortante actuante}}$$

Fórmula 2.3: Definición del FS para el método de equilibrio límite, considerando resistencia disponible y esfuerzos actuantes.

$$FS = \frac{\sum_{tajadas} \text{Momento resistente disponible}}{\sum_{tajadas} \text{Momento actuante}}$$

Fórmula 2.4: Definición del FS para el método de equilibrio límite, considerando momento resistente y actuante.

En la práctica ingenieril, el factor de seguridad es principalmente determinado con el método de equilibrio límite. Sin embargo, no siempre entrega un valor único, por lo que no es necesariamente adecuado para generar una solución de referencia o proveer exactitud en resultados obtenidos utilizando métodos alternativos (Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis, 2015).

Respecto de sus limitaciones, en este método se asume la superficie deslizante y se consideran supuestos que permiten simplificar las fuerzas laterales entre tajadas contiguas (Ho, 2014).

2.1.3.6 Método de reducción de la resistencia (MRR)

También conocido como técnica de reducción de la resistencia al corte, este método fue inicialmente utilizado por Zienkiewicz, Humpheson, & Lewis (1975) y su uso y popularidad han crecido fuertemente durante las últimas dos décadas (Xiang & Zi-Hang, 2017). Si bien este método es actualmente ampliamente conocido, existe poca unificación del análisis de inestabilidad al presente e incluso, los diferentes métodos matemáticos utilizados, influyen al factor de seguridad obtenido (Yang, Yang, & Yu, 2012).

El método de reducción de la resistencia tiene un concepto simple: reducir sistemáticamente la envolvente de resistencia al corte del material por un factor de seguridad y computar el modelo de elementos finitos del talud, hasta que las deformaciones sean inaceptablemente

grandes o la solución no converja (Hammah, Yacoub, & Corkum, 2005). En general, las simulaciones del terreno son llevadas a cabo utilizando un análisis de deformación plana para un modelo elástico lineal y considerando el criterio de falla de Mohr–Coulomb (Dyson & Tolooyan, 2018). Para el criterio de falla de Mohr-Coulomb (MC) la resistencia al corte (τ) está dada por la Fórmula 2.5 donde c , ϕ y σ_n corresponden a la cohesión, el ángulo de fricción del material y esfuerzos normales que experimenta la superficie teórica de falla del talud, respectivamente.

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

Fórmula 2.5: Criterio de falla de Mohr-Coulomb

Como bien lo presenta Tschuchnigg, Oberhollenzer, & Schweiger (2018) las Fórmula 2.6 y Fórmula 2.7 definen el procedimiento del MRR. En estas ecuaciones c_0 y ϕ_0 corresponden a la cohesión y ángulo de fricción originales del material. Los parámetros reducidos c y ϕ , utilizando valores crecientes del factor de reducción de la resistencia de prueba (SRF) son evaluados en el criterio de MC, hasta alcanzar la condición de falla.

$$c = \frac{c_0}{SRF}$$

Fórmula 2.6: Razón de reducción de la cohesión en el MRR.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\tan \phi_0}{SRF}$$

Fórmula 2.7: Razón de reducción del ángulo de fricción en el MRR.

Aplicar el MRR conlleva a obtener el FS del talud según la Fórmula 2.8. En esta fórmula c_f y ϕ_f son los parámetros que permiten llevar al talud a un estado de falla inminente. En la Figura 2.5 tomada de Dyson & Tolooyan (2018) se esquematiza el círculo de Mohr y la variación de la envolvente de falla al aplicar el MRR.

$$FS = \frac{c_0}{c_f} = \frac{\tan \phi_0}{\tan \phi_f}$$

Fórmula 2.8: Factor de seguridad obtenido al realizar el MRR.

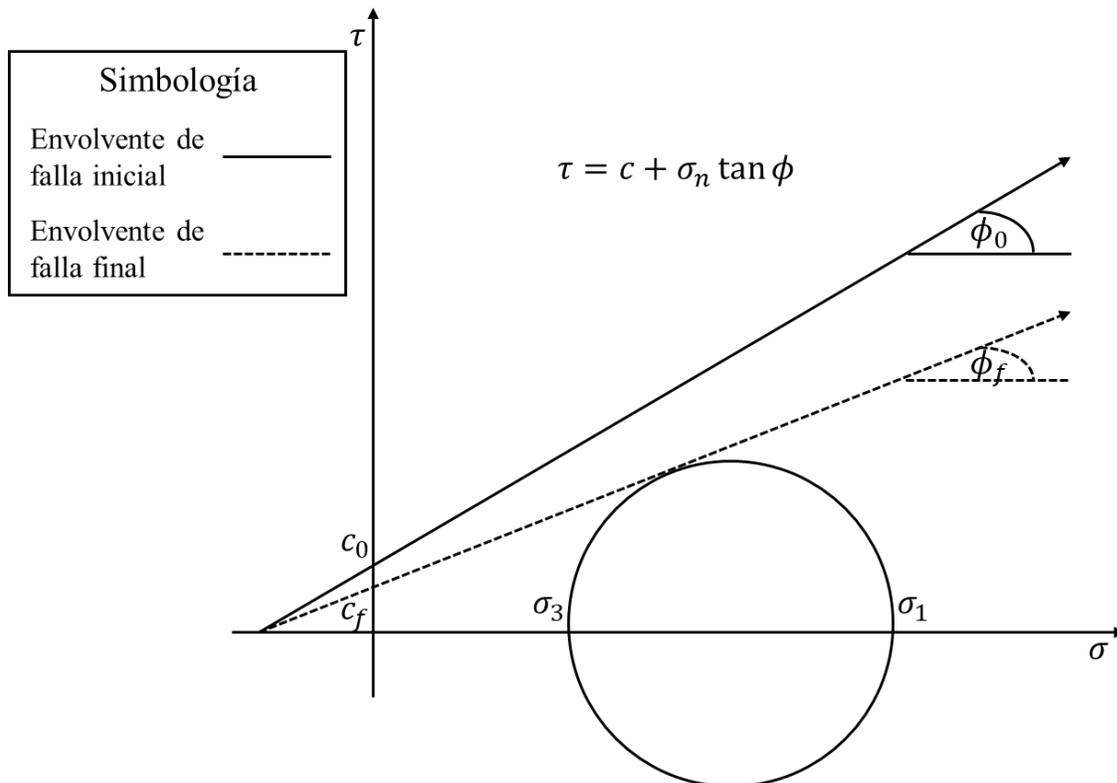


Figura 2.5: Círculo de Mohr y variación de la envolvente de falla al aplicar el MRR. Tomada de Dyson & Tolooiyan (2018).

El estado de falla inminente bajo el cual, si el valor de SRF creciera un poco el talud colapsaría, se expresa en cualquier software de elementos finitos a través de la no convergencia de la solución. La no convergencia significa que: el software no puede obtener una distribución de esfuerzos que satisfaga simultáneamente el equilibrio global y el criterio de falla (Burman, Acharya, Sahay, & Maity, 2015).

Es necesario destacar que en la actualidad aún no existe una solución rigurosa bien establecida para resolver el problema de computar el factor de seguridad y la ubicación de la zona crítica de falla del talud. Por lo tanto, de los métodos tradicionales reconocidos (equilibrio límite o método de reducción de la resistencia) se espera obtener solo una solución aproximada al problema de estabilidad (Carranza-Torres & Hormazabal, 2018).

2.1.3.6.1 Ventajas del método de reducción de la resistencia

Debido a que este trabajo utiliza el MRR implementado en un software de elementos finitos para computar el FS de un talud, se destacan las principales ventajas de este método. Como bien lo resume Griffiths & Lane (1999) las principales ventajas de utilizar el MRR versus el método tradicional de equilibrio límite son:

- i. No hay necesidad de presumir la locación de la superficie de falla. La falla ocurre de manera “natural” a través de las zonas en las cuales la resistencia del terreno no es capaz de sostener los esfuerzos de corte aplicados.

- ii. Al no utilizar tajadas/dovelas, no hay necesidad de asumir valores para las fuerzas internas (fuerzas laterales entre tajadas). El método de elementos finitos preserva el equilibrio global hasta que la falla es alcanzada.
- iii. Si se usan valores realistas de parámetros de elasticidad, se puede obtener información de las deformaciones esperadas para diferentes niveles de esfuerzo.

Además, considerando que la progresión de la falla puede ser observada al utilizar el método de elementos finitos, se puede tomar métodos de remediación más apropiados que permitan aumentar la estabilidad del talud. Entender la locación de la falla en etapas iniciales es importante y permite diseñar remediaciones apropiadas para estabilizar el talud en etapas tempranas (Ho, 2014).

Adicionalmente, debe considerarse que el método de reducción de la resistencia también puede ser implementado para analizar materiales heterogéneos como en el trabajo de Dyson & Tolooiyan (2018). Esto es de particular interés en zonas de contacto entre materiales de diferente litología o calidad geotécnica.

A pesar de las ventajas ya mencionadas se destaca que, para el análisis de taludes de paredes lisas y material isótropo y homogéneo que obedecen el criterio de falla de Mohr-Coulomb, los resultados del FS no varían significativamente al utilizar el MEL y el MRR (Carranza-Torres & Hormazabal, 2018).

2.1.4 Automatización

Corresponde al acto y consecuencia de hacer que determinadas acciones de desarrollen por sí solas y sin la participación de un individuo.

En el contexto de este trabajo se hablará de automatizar un procedimiento cuando se busca disminuir la cantidad de acciones que se llevan a cabo para su realización. En particular, se busca disminuir la cantidad de acciones que debe realizar el usuario para obtener un factor de seguridad que caracterice la estabilidad de un talud minero, y extender esto dentro del contexto de la minería de rajos.

En este informe se adoptan las siguientes definiciones para hacer referencia a la información de entrada y salida de un proceso automatizado:

2.1.4.1 Variables de entrada

Valores cuantitativos o cualitativos que deben conocerse antes de ejecutar un proceso automatizado. A diferencia de las variables de diseño, las variables de entrada no son controladas por el usuario. Ejemplos de variables de entrada tradicionales son variables ambientales (temperatura, humedad, luminosidad), la calidad del material que se recibe del proveedor, etc.

2.1.4.2 Variable de diseño

Valores cuantitativos o cualitativos que deben conocerse previamente a ejecutar un proceso automatizado. A diferencia de las variables de entrada, las variables de diseño sí son

controlados por el usuario. Ejemplos de variables de diseño típicas son: el método de operación, el tiempo de residencia, velocidad, cantidad de cierto reactivo, etc.

Se considerarán como sinónimo de variables de diseño en este informe los conceptos: condiciones, parámetros o factores del proceso.

2.1.4.3 Variables de salida o respuesta

Son valores cuantitativos o cualitativos que se obtienen como resultado de ejecutar un proceso automatizado. Por lo general, se ven afectado por las variaciones en las variables de entrada y parámetros del proceso.

2.2 Softwares utilizados y sus características

A continuación, se describen las principales características de los softwares utilizados en el proceso de automatización de taludes mineros.

2.2.1 Abaqus

Abaqus es un paquete de programas que permiten realizar simulaciones en el ámbito ingenieril. Está basado en el método de elementos finitos, y puede resolver problemas lineales como no-lineales (Dassault Systèmes, Getting Started with Abaqus. Interactive Edition. Version 6.8, 2008). Abaqus posee una extensa librería de elementos que pueden modelar virtualmente cualquier geometría y una extensa librería de materiales que permite simular el comportamiento de los materiales más comunes usados en ingeniería, incluyendo materiales geotécnicos como suelos y roca.

Abaqus fue diseñado como un software de simulación multi-propósito; en este sentido, es capaz de analizar problemas de diferente naturaleza: de origen estructural (esfuerzo y deformación), de transferencia de calor, transferencia de materia, análisis termal de componentes eléctricos (termoeléctricos), acústicos, de suelo (incluyendo presión de poros) y piezoeléctricos.

Para simular problemas multi-componentes debe asociarse la geometría de cada componente con el modelo de material apropiado y especificar las propiedades de contacto e interacción entre estos. Para problemas no-lineales Abaqus escoge automáticamente los incrementos de carga y la tolerancia de convergencia; ajustándolas continuamente durante la simulación para asegurar que la exactitud de los resultados sea obtenida eficientemente (Dassault Systèmes, Getting Started with Abaqus. Interactive Edition. Version 6.8, 2008).

En la sección 9.1 se presenta mayor detalle de las características de Abaqus. Se describen sus productos principales, las etapas de un análisis, las componentes de un modelo y otros conceptos asociados, que son relevantes al momento de utilizar este software.

2.2.2 Isight

Isight es programa pensado en la concatenación y automatización de actividades. Permite utilizar una amplia gama de otras aplicaciones/softwares de manera secuenciada. De esta

forma, las variables de salida de un software pueden ser manejadas directamente como variables de entrada del siguiente software en la cadena. Esto permite disminuir la lentitud o errores humanos al ingresar parámetros o variables de forma manual.

La integración de aplicaciones y la habilidad de Isight de automatizar procesos acelera enormemente la evaluación de alternativas de diseño de un producto (Dassault Systèmes, Isight User's Guide, 2018). Además, provee de herramientas avanzadas de post-procesamiento que permiten analizar *trade-offs* y relaciones entre los parámetros y los resultados del proceso.

Alguna de las herramientas disponibles en Isight son las componentes: Simcode y de Abaqus. La componente Simcode permite modificar archivos de texto y ejecutar archivos de ordenes simultáneamente, y la componente de Abaqus permite ejecutar el simulador de Abaqus sin la necesidad de abrir su interfase gráfica, y guardar los resultados de la simulación.

Considerando que la integración de procedimientos realizados en distintos softwares se realizará usando Isight y que algunos resultados obtenidos serán analizados con sus herramientas de post-procesamiento, a continuación, en la sección 9.2 se detallan una serie de términos asociados al uso y evaluación de resultados en este software y asociadas a diseño de experimentos, tomadas de la guía *Isight User's Guide* (2018) elaborada por Dassault Systèmes y de Gutiérrez & De la Vara (2012) respectivamente.

2.2.3 Python

Python es un lenguaje de programación de código abierto que permite secuenciar actividades expresadas en un archivo de órdenes. Está orientado a objetos y es comparable con otros lenguajes como *Ruby* o *Java*. Se considera un lenguaje fácil de aprender y usar y posee una sintaxis fácil de leer (Python, 2018).

Otras características de este programa son:

- i. Posee una gran librería de funciones que disminuyen el tiempo de programación del usuario.
- ii. Su módulo interactivo permite testear rápidamente fragmentos del código del archivo de órdenes.
- iii. Corre en todos los sistemas operativos.

2.2.4 Surpac

Surpac es uno de los softwares de geología y planificación minera más populares en el mercado, dando apoyo a operaciones de minera de rajo y subterránea y proyectos de exploración en más de ciento veinte países (Dassault Systèmes, 3D Experience Company, 2018). El software se caracteriza por su fácil aprendizaje, gráficas en tres dimensiones y la posibilidad de generar flujos de trabajo automatizados utilizando el lenguaje de programación TCL (*Tool Command Language*).

Surpac posee un set de herramientas especializadas para asistir el diseño gráfico, entre las cuales destacan, la generación de sólidos en base a triangulaciones, y la generación y rotación de planos en dos dimensiones.

2.2.5 Whittle

Whittle es un paquete de productos de planificación minera estratégica. Tiene como principal objetivo determinar la forma del rajo que maximice el beneficio económico del proyecto minero, determinando qué material debe ser extraído y en qué periodo de tiempo. Esto se expresa en un modelo de bloques planificado, que muestra qué conjuntos de bloques deben ser minados, en cada fase de explotación.

Posee una serie de algoritmos de optimización que incorporan las variables de tiempo y riesgo sobre el valor presente neto y permite realizar análisis de sensibilidad para planificación a largo plazo.

3 Antecedentes

En esta sección se presentan los principales antecedentes recabados respecto a la implementación del análisis de estabilidad de taludes en softwares de elementos finitos.

Como ya fue mencionado en la subsección 2.1.3, la implementación, supuestos y resultados de los métodos de análisis de estabilidad de taludes varían según el autor que lo utilice. Esto se debe a que no existe una solución consensuada para resolver el problema de computar el factor de seguridad y la ubicación de la zona crítica de falla del talud.

En este trabajo, la información recopilada permite generar un caso base y detectar fuentes de variabilidad en la implementación y uso del MRR. Esto permite identificar variables de entrada, de diseño y de respuesta para su posterior automatización. Las fuentes de incerteza no solo provienen de la variabilidad detectada en las investigaciones consultadas, sino también de las incertidumbres o escasez de información.

Considerando las características del software de elementos finitos utilizado, presentadas en la subsección 9.1.1.3, más la recopilación de información realizada, el MRR queda definido dentro de Abaqus mediante:

- i. Geometría discretizada del talud
- ii. Tipo y propiedades de los elementos
- iii. Propiedades de material
- iv. Historial de simulación
 - a. Procedimientos de análisis
 - b. Uso de no linealidades geométricas
 - c. Fuerzas aplicadas y condiciones de borde
 - d. Campo de esfuerzos inicial
 - e. Requerimientos de salida
 - f. Implementación del MRR
- v. Criterios de convergencia de los resultados
 - a. Incrementación

Los antecedentes recopilados, conjunto con las variables del método se presentan en el mismo orden anterior:

3.1 Geometría discretizada del talud

Al analizar un talud en un software de elementos finitos es necesario definir bordes artificiales que limiten la geometría del modelo. Por lo tanto, además de conocer la altura del talud (H) y el ángulo de talud (α); o en su defecto, la razón entre la altura y la base del talud (H/W), es necesario definir tres parámetros que controlan el tamaño de la geometría a analizar, los cuales son esquematizados en la Figura 3.1.

- i. Factor de extensión horizontal superior (w_d)
- ii. Factor de extensión horizontal inferior (w_i)

iii. Factor de extensión vertical inferior (hb)

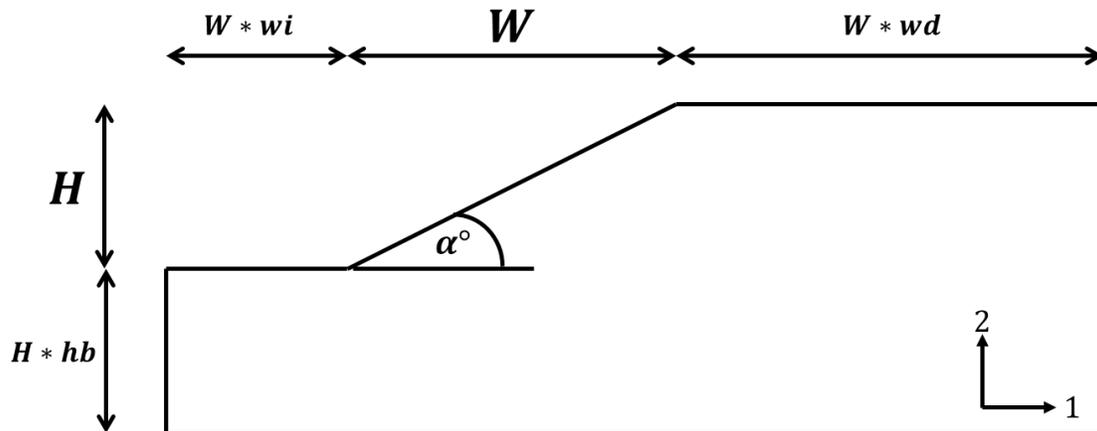
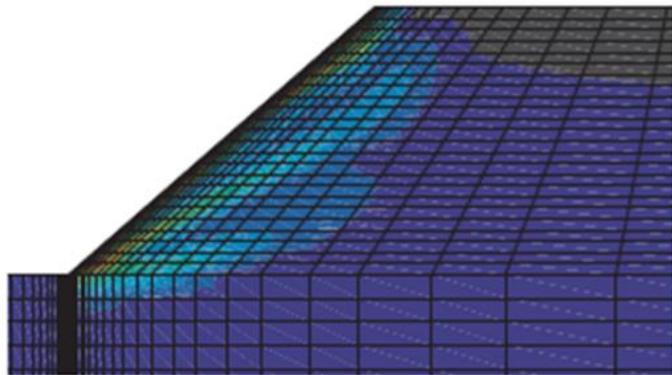


Figura 3.1: Parámetros y variables asociados a la geometría artificial del modelo. Basada en Kai & Yin (2012).

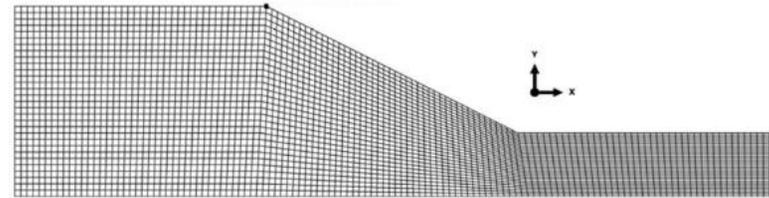
Para Dyson & Tolooiyan (2018) los bordes artificiales de la geometría analizada deben encontrarse lejanos a la zona del talud, para evitar interacciones entre la condición de esfuerzo del talud y las condiciones de borde durante la carga y falla del talud. En su investigación se utilizan valores de wd , wi y hb cercanos a 4.

En la investigación presentada por Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis (2015) se contrastan los resultados obtenidos con valores de hb de 1 y 5; manteniendo wd y wi constantes, de valor 4, y se concluye que la variable de respuesta no presenta variaciones significativas para este parámetro. Sin embargo, en el trabajo presentado por Ho (2014) se concluye que hb sí tiene efectos en el factor de seguridad computado y el mecanismo de falla observado: para bases de mayor espesor, la superficie de falla es más profunda y un mayor factor de seguridad es obtenido. Una mezcla de estos resultados fue obtenida previamente por Griffiths & Lane (1999), cuyos resultados muestran que el uso o ausencia de una base del talud, no afecta significativamente los resultados obtenidos, pero sí se observa que, al usar una base, la superficie de deformación pasa levemente por debajo del pie del talud. En el otro extremo, en el trabajo presentado por Xiang & Zi-Hang (2017) se utilizan valores para wd , wi y hb de: 0.8, 0.2 y 0.3 respectivamente.

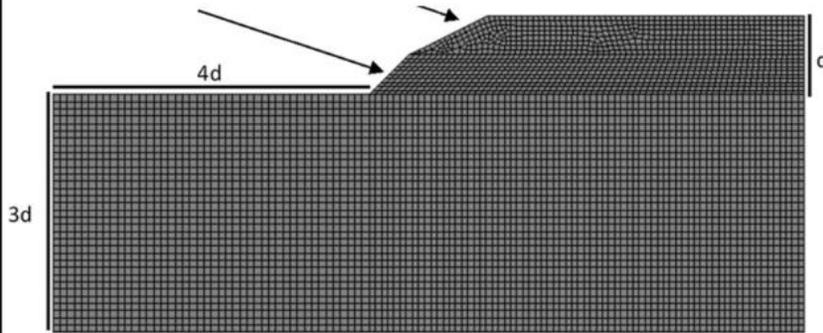
En las investigaciones revisadas se observa que la geometría discretizada se realiza principalmente, utilizando elementos de tres y/o cuatro nodos y con diferentes distribuciones y variación de tamaño de los elementos a través de la geometría. En la Figura 3.2 se observa la variación del enmallado utilizado previamente por otros autores.



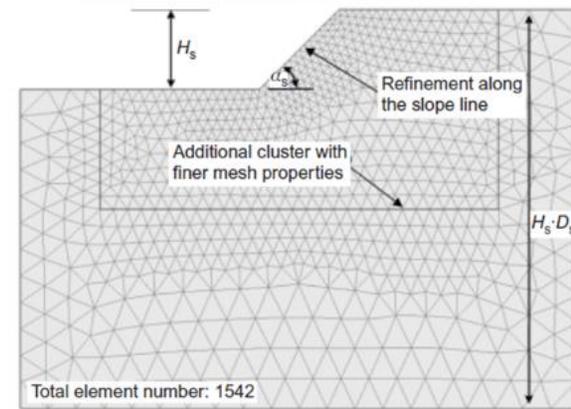
(Schneider-Muntau, Medicus, & Fellin, 2017)



(Kai & Yin, 2012)



(Dyson & Tolooiyan, 2018)



(Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis, 2015)

Figura 3.2: Diferentes enmallados utilizadas por autores previos para discretizar la geometría del modelo de talud en dos dimensiones.

A pesar de la importancia de la densidad de elementos finitos sobre el FS computado mencionada por Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis (2015), otros autores han concluido que el tamaño de los elementos no ha mostrado un impacto significativo en los resultados del MRR (Schneider-Muntau, Medicus, & Fellin, 2017).

3.2 Tipo y propiedades de los elementos

Como bien lo detalla Ho (2014) para análisis de estabilidad de taludes, deben utilizarse elementos del tipo deformación plana. Estos elementos corresponden a la familia de elementos continuos (sólidos) y poseen 2 grados de libertad: los desplazamientos en ambos ejes. Pueden poseer 3 o 4 nodos para interpolación lineal y 6 u 8 para interpolación cuadrática, y en ambos casos, poseer integración completa como reducida (Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Manual. Version 6.10, 2010). Respecto a la formulación de los elementos, para este tipo de análisis, corresponden al comportamiento tipo Lagrangiano.

Diferentes autores se han inclinado por usar diferentes tipos de elementos para llevar a cabo la implementación del MRR en sus investigaciones, por ejemplo: elementos de 4 nodos con integración completa (CPE4) en Xiang & Zi-Hang (2017), elementos de 8 nodos con integración reducida (CPE8R) en Burman, Acharya, Sahay, & Maity (2015), y elementos de 4 nodos con integración reducida (CPE4R) en Dyson & Tolooiyan (2018). Respecto a esto, Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis (2015) menciona que el efecto del tipo de elemento sobre el FS computado puede ser minimizado, utilizando elementos de alto orden y enmallados finos.

3.3 Propiedades de material

Para llevar a cabo el MRR deben especificarse: el peso específico y las propiedades elásticas y plásticas del material. Por lo tanto, como lo realiza Kai & Yin (2012), deben especificarse las siguientes propiedades:

- i. Módulo de Young (E)
- ii. Razón de Poisson (ν)
- iii. Peso específico (γ) o densidad (ρ)
- iv. Cohesión (c_0)
- v. Ángulo de fricción (ϕ_0)
- vi. Ángulo de dilatancia (ψ_0)

De la lista anterior, existen discrepancias respecto al valor utilizado para el ángulo de dilatancia. La dilatancia es una característica bien conocida de los materiales rocosos, y corresponde al incremento del volumen durante el proceso de deformación. Es comúnmente encontrada en rocas intactas durante el proceso de fracturamiento mientras son sometidas a estrés de tipo compresivo o de corte; y en fracturas preexistentes que sufren desplazamiento de cizalle al ser sometidas a esfuerzos normales de baja magnitud. La dilatancia tiene un comportamiento no lineal, caracterizado generalmente por una primera etapa de compresión y luego una etapa de aumento de volumen. En la mayoría de los trabajos en donde se ha

considerado la dilatancia se simplifica a un valor constante conocido como el ángulo de dilatancia para caracterizar el comportamiento del material (Yuan & Harrison, 2004).

Varios estudios consideran un ángulo de dilatancia de valor nulo (Xiang & Zi-Hang, 2017) o de igual valor al ángulo de fricción del material, aplicando una regla de flujo-asociado (Kai & Yin, 2012). Sin embargo, muchos ensayos de roca muestran que el ángulo de dilatancia es menor al ángulo de fricción en situaciones reales para materiales geotécnicos (Abramson, S., Sunil, Boyce, & M., 2002).

Se han realizado investigaciones que buscan determinar el efecto del valor del ángulo de dilatancia utilizado, en análisis de estabilidad de taludes. Se destaca que:

- i. Los factores de seguridad obtenidos mediante MEL y MRR utilizando flujo asociado son muy similares (Tschuchnigg, Oberhollenzer, & Schweiger, 2018).
- ii. Altos valores del ángulo de dilatancia conllevan a una sobreestimación de la estabilidad del talud (Kolymbas, Fellin, Schneider-Muntau, Medicus, & Schranz, 2016).
- iii. La regla de flujo tiene una influencia importante sobre el FS computado (Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis, 2015).
- iv. El uso de un ángulo de dilatancia menor al ángulo de fricción del material podría conducir a inestabilidades numéricas y mecanismos de falla poco claros y conllevar a obtener resultados oscilatorios como consecuencia de un mecanismo de falla no-único (Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis, 2015).
- v. Existe un comportamiento de parábola entre el ángulo de dilatancia y el factor de seguridad obtenido, al mantener el ángulo de fricción constante y variar el ángulo de dilatancia entre cero y el valor del ángulo de fricción (Lin & Cao, 2012).
- vi. Al utilizar un flujo no asociado la no convergencia se alcanza a un factor de reducción mayor, pero el salto en los desplazamientos nodales se mantiene más o menos constante (Kai & Yin, 2012).
- vii. Si bien el uso de un flujo asociado trae ventajas evidentes al poder comparar los resultados con los obtenidos por el método de equilibrio límite, es conocido que usar esta regla de flujo predice mayores deformaciones que las observadas en la realidad (Griffiths & Lane, 1999).

Debe destacarse que el método de equilibrio límite no pueden reflejar las características de la dilatancia del material estudiado, al no tomar en consideración la regla de flujo del material (Lin & Cao, 2012). Por lo tanto, poder reflejar esta característica de los materiales, sería una gran ventaja del MRR, utilizado en este trabajo, sobre los MEL.

3.4 Historial de simulación

Realizar el MRR en Abaqus contempla el uso de al menos dos *steps* como lo explicita el trabajo de Kai & Yin (2012) y Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis (2015). En el primer *step* se considera la carga gravitacional y en el *step* posterior se realiza la reducción de los parámetros de resistencia del material.

3.4.1 Procedimientos de análisis

El procedimiento de análisis tradicional para el uso del MRR consiste en análisis de tipo estático usando Abaqus/Standard (Kai & Yin, 2012), sin embargo otros autores han implementado este método en Abaqus/Explicit con una disminución sustancial del costo computacional y resultados similares a los obtenidos por métodos implícitos (Dyson & Tolooiyan, 2018).

Abaqus ofrece un procedimiento específico para problemas geomecánicos denominado procedimiento de tipo geoestático (Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Manual. Version 6.10, 2010). Este procedimiento es generalmente utilizado como primer *step* de la simulación y permite verificar si los esfuerzos iniciales (de ser definidos en el modelo) se encuentran en equilibrio con las cargas y condiciones de borde, e iterar, de ser necesario, hasta obtener el equilibrio. Este procedimiento de análisis tiene un parámetro adicional a los de tipo estático, asociado al máximo desplazamiento nodal permitido durante este procedimiento, de excederse este valor, los resultados no convergen.

3.4.1.1 Uso de no linealidades geométricas

En las referencias visitadas no se reporta información sobre el uso de este parámetro disponible en Abaqus. A criterio del autor, el uso de este parámetro podría ser adecuado debido a que el MRR exige al talud a fallar, lo cual puede ir acompañado de desplazamientos y deformaciones significativos de los elementos.

3.4.2 Fuerzas aplicadas y condiciones de borde

Para el caso más simple de análisis de estabilidad, solo se considera la fuerza de peso (Dyson & Tolooiyan, 2018). Otros autores han considerado en su análisis cargas sobreyacentes al talud (Lin & Cao, 2012), que podrían representar instalaciones mineras (por ejemplo: maquinarias) cercanas al talud.

Las condiciones de borde tradicionales para este tipo de análisis se muestran en la Figura 3.3 donde los bordes laterales poseen desplazamientos restringidos en el eje 1, el borde inferior tiene desplazamientos restringidos en ambos ejes y el borde superior se encuentra libre (Dyson & Tolooiyan, 2018).

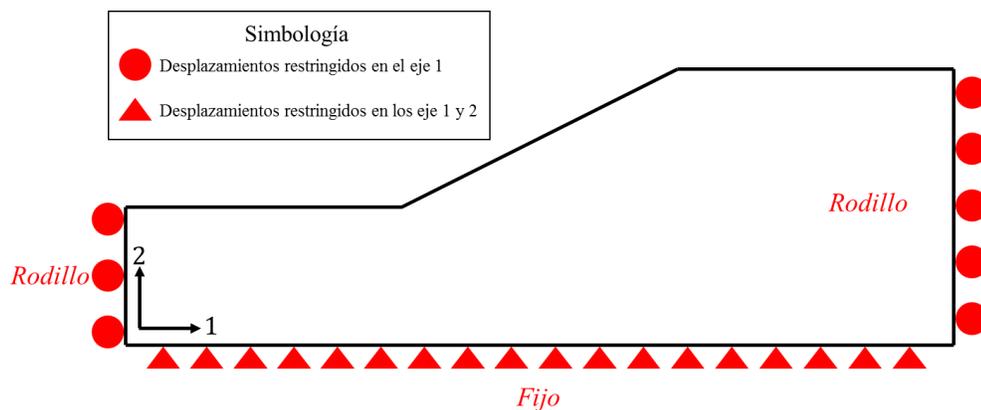


Figura 3.3: Condiciones de borde tradicionales para el MRR. Basada en Kai & Yin (2012).

3.4.3 Campo de esfuerzos inicial

En las referencias estudiadas existe poca información respecto al uso de un campo de esfuerzos inicial en el análisis de estabilidad de taludes mediante el MRR. Sin embargo, sí se definen en el trabajo presentado por Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis (2015) para la simulación de un túnel de 8 metros de diámetro y con una sobrecarga de 8 metros. Estos esfuerzos iniciales vienen dados por la Fórmula 3.1, donde σ_v y σ_h representan los esfuerzos verticales y horizontales respectivamente, γ es el peso específico del terreno, z es la profundidad y K una constante que, para análisis de deformación plana, se obtiene mediante la Fórmula 3.2.

$$\begin{aligned}\sigma_v &= \gamma * z \\ \sigma_h &= K * \sigma_v\end{aligned}$$

Fórmula 3.1: Esfuerzos iniciales del talud en sus componentes vertical y horizontal.

$$K = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

Fórmula 3.2: Constante que relaciona los esfuerzos iniciales vertical y horizontal.

3.4.4 Requerimientos de salida

Los requerimientos de salida del MRR están asociados a la forma en que se escoge el FS que caracteriza al talud. Este valor puede ser obtenido de diferentes formas, dependiendo de la definición de falla de talud (Dyson & Tolooiyan, 2018). Algunos de estos criterios son:

- i. Desarrollo de una zona plástica desde el pie hasta la cresta del talud (Dyson & Tolooiyan, 2018).
- ii. Ocurrencia de grandes deformaciones, bajo una cierta tolerancia definida por el usuario, que dependen del problema analizado (Dyson & Tolooiyan, 2018) o detección de un incremento rápido en los desplazamientos nodales (Kai & Yin, 2012).
- iii. No convergencia de la solución en el software de elementos finitos (Yang, Yang, & Yu, 2012).

Para cada uno de estos criterios deben solicitarse como variables de salida:

- i. La magnitud de la deformación plástica equivalente (Dyson & Tolooiyan, 2018) y debe observarse manualmente su distribución sobre el talud.
- ii. La magnitud de los desplazamientos de nodos asociados a la geometría real del talud (Kai & Yin, 2012).
- iii. El valor del factor de reducción de la resistencia de prueba máximo alcanzado.

3.4.5 Implementación del MRR

Abaqus no posee integrado el método de reducción de la resistencia en su código. Sin embargo, la reducción puede ser llevada a cabo definiendo una variable de estado, que represente el factor de reducción de la resistencia de prueba y que varíe durante la simulación (Yang, Yang, & Yu, 2012). Esto se realiza entregando una matriz de datos que represente las curvas $SRF - \phi$ y $SRF - c$. A mayor cantidad de datos entregados, más exactas serán las curvas generadas por el software.

De la literatura, una definición alternativa del método de reducción de la resistencia es propuesta por Dyson & Tolooiyan (2018). Esta definición modifica la tasa en que los parámetros de Mohr-Coulomb son reducidos utilizando la Fórmula 3.3. En su trabajo concluye que, para terrenos con valores bajos de ángulo de fricción (menor a 30°), se reducirían los tiempos de simulación requeridos para computar el FS.

$$\phi = \frac{\phi}{SRF}$$

$$c = \tan \tan^{-1} \frac{c}{SRF}$$

Fórmula 3.3: Método alternativo de reducción de los parámetros de resistencia.

3.4.6 Reducción del ángulo de dilatancia

Como se puede notar en la subsección 2.1.3.6, las ecuaciones características del MRR no se refieren a la tasa de reducción del ángulo de dilatancia. Esto es abordado en el trabajo de Tschuchnigg, Schweiger, & Sloan (2015) donde utiliza que: para flujo asociado, la reducción es análoga a la del ángulo de fricción, y para flujos no asociados ($\psi_0 \neq \phi_0$), el ángulo de dilatancia sólo se reduce una vez el ángulo de fricción reducido haya alcanzado su valor ($\phi = \psi_0$) y lo hace de manera simultánea como se muestra en la Fórmula 3.4.

$$\psi = \begin{cases} \psi_0 & \text{si } \phi \geq \psi_0 \\ \tan^{-1} \tan \frac{\phi_0}{SRF} & \text{si } \phi < \psi_0 \end{cases}$$

Fórmula 3.4: Reducción del ángulo de dilatancia para material con flujo no asociado.

3.5 Criterios de convergencia de los resultados

3.5.1 Incrementación

En la literatura existe poca información respecto a los parámetros de incrementación utilizados al implementar el MRR. Solo existe información respecto a la cantidad máxima de incrementos permitidos durante un *step*. En el trabajo de Griffiths & Lane (1999) y Burman, Acharya, Sahay, & Maity (2015) se utiliza un máximo de iteraciones permitidas de 1000. En tanto, Lin & Cao (2012) emplean un máximo de 30.000 iteraciones.

Se remarca que la selección de la condición de convergencia es, en especial, un trabajo muy difícil y se espera que la experiencia y decisiones del usuario afecte los resultados obtenidos (Gao, Wang, Dai, & Chen, 2016).

3.6 Resultados obtenidos por otros autores

A continuación, se presenta una serie de resultados obtenidos por investigaciones previas, asociados al análisis de estabilidad de taludes. Se utilizarán tres criterios de comparación: resultados numéricos, comportamiento de la solución ante parámetros variables y resultados visuales del patrón de deformación obtenidos durante la simulación. Estos resultados servirán de referencia y comparación para los resultados obtenidos en este informe.

3.6.1 Resultados numéricos

Como resultados numéricos del factor de seguridad, se considerarán las investigaciones realizadas por Kai & Yin (2012) y Carranza-Torres & Hormazabal (2018), los cuales serán aludidos como modelo de suelo y modelo de roca, respectivamente. Ambos trabajos consideran taludes homogéneos e isótropos, que obedecen el criterio de falla de Mohr-Coulomb. Estas dos investigaciones son escogidas pues representan dos taludes de condiciones notablemente diferentes y cuyas características geométricas y propiedades de material se encuentran en los extremos de los taludes analizados comúnmente en la disciplina de análisis de estabilidad de taludes.

3.6.1.1 Kai & Yin (2012) – Modelo de suelo

En esta investigación se utiliza el método de reducción de la resistencia para analizar un talud de 10m de altura y ángulo de 26.57° . Las propiedades de material son: $E=0.1\text{GPa}$, $\nu=0.3$, $\gamma=0.020\text{MN/m}^3$, $c_0=15\text{KPa}$, $\phi_0=20^\circ$ y $\psi_0=20^\circ$. Para este talud obtiene un FS =1.667 considerando como criterio de falla un salto en la magnitud en los desplazamientos nodales. A la vez entrega los resultados obtenidos utilizando métodos de equilibrio límite los cuales se mueven entre el valor 1.57 y 1.88. En particular con el método tradicional de Bishop se obtiene FS =1.59.

3.6.1.2 Carranza-Torres & Hormazabal (2018) – Modelo de roca

En esta investigación se utiliza el método de equilibrio límite para analizar un talud de 300m de altura y ángulo de 52° . Las propiedades de material son: $\gamma=0.025\text{MN/m}^3$, $c_0=667\text{KPa}$ y $\phi_0=37^\circ$. Los parámetros E , ν y ψ_0 no considerados. Para este talud obtiene un factor de seguridad de valor 1.56 y 1.57 utilizando dos métodos distintos.

3.6.2 Resultados asociados al comportamiento de la solución

A continuación, se presentan resultados asociados al comportamiento del FS al modificarse las variables de entrada o condiciones de proceso del MRR. Estos resultados se entregan con el objetivo de destacar el comportamiento variable del FS utilizando el MRR detectados en investigaciones anteriores.

Considerando los resultados obtenidos por Carranza-Torres & Hormazabal (2018):

- i. Para un valor fijo de ángulo de fricción, el factor de seguridad se incrementa significativamente con un aumento de la cohesión.
- ii. El factor de seguridad decrece con un aumento del ángulo de talud.
- iii. La superficie crítica de una falla circular, generada durante el proceso de deformación o falla del talud, es más profunda para terrenos predominantemente cohesivos y más superficial para terrenos predominantemente friccionales.

Considerando lo mencionado en Xiang & Zi-Hang (2017):

- iv. El factor de seguridad incrementa con el ángulo de dilatancia y alcanza su valor mínimo y máximo, cuando se considera un ángulo de dilatancia de valor cero y flujo asociado respectivamente.

Considerando lo mencionado en Burman, Acharya, Sahay, & Maity (2015):

- v. El módulo de Young y la razón de Poisson tiene un impacto profundo en las deformaciones computadas previo a la falla del talud, pero tienen poca influencia en el factor de seguridad predicho en el análisis de estabilidad del talud.
- vi. El ángulo de dilatación tiene un efecto directo en el cambio de volumen del terreno durante la deformación (lo menciona, pero no lo comprueba).

Considerando lo mencionado en Ho (2014):

- vii. Al aumentar el espesor de la fundación (equivalente al parámetro hb), una superficie de falla más profunda puede ocurrir, y obtenerse un mayor factor de seguridad.

Considerando lo mencionado en Kai & Yin (2012):

- viii. La ocurrencia de una zona plástica desde el pie hasta la cima del talud es un requisito, pero no un indicador suficiente de la falla del talud. El factor de reducción puede seguir aumentando mientras esta zona crece hasta el punto de no convergencia numérica. Este mismo resultado es mencionado por Yang, Yang, & Yu (2012), quienes mencionan que la zona plástica puede haberse formado, pero el cálculo numérico aún no haber llegado al punto de no convergencia.

Considerando lo mencionado en Lin & Cao (2012):

- ix. El factor de seguridad primero crece y luego decrece con el aumento del ángulo de dilatación, y su relación muestra principalmente la forma de una curva parabólica. Con el aumento del ángulo de fricción, la pendiente de la parábola crece gradualmente.

3.6.3 Resultados visuales

En la Figura 3.4 se presentan imágenes asociadas al progreso de la deformación de taludes, al considerar magnitudes crecientes del SRF, tomadas de las investigaciones de Yang, Yang, & Yu (2012) y Kai & Yin (2012). Se observa en colores la deformación acumulada al momento de ocurrir la falla. Se escogen estas imágenes por ser representativas de los resultados visuales presentes en la literatura.

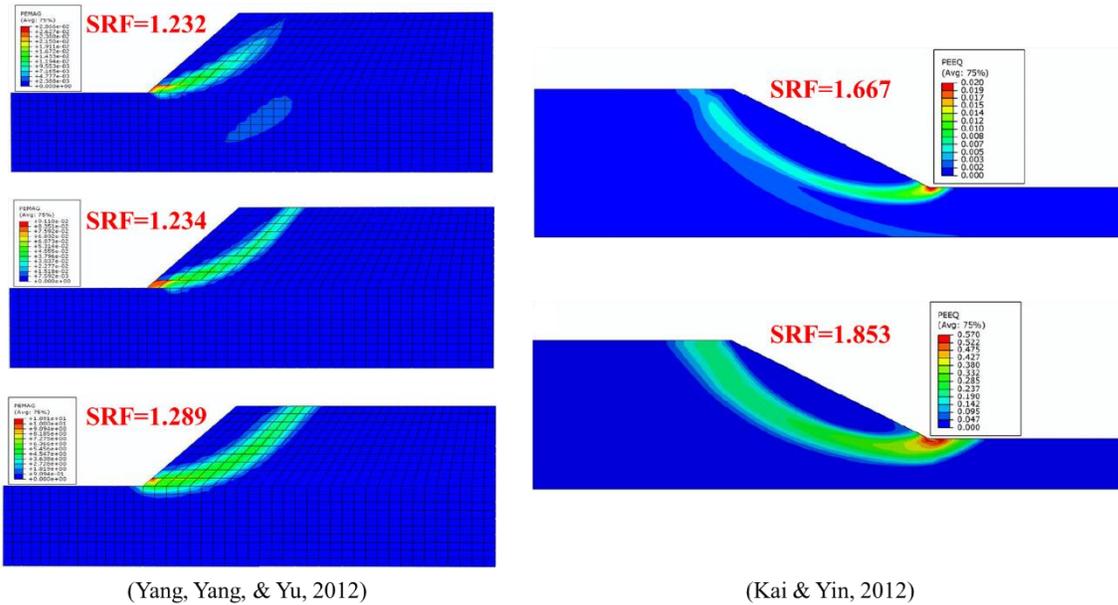


Figura 3.4: Resultados visuales obtenidos por otros autores.

4 Metodología

Para llevar a cabo el objetivo general del proyecto, el cual consiste en generar un procedimiento automatizado de evaluación de estabilidad de taludes mineros, acoplado a procedimientos de planificación minera, se genera la siguiente guía metodológica que considera la creación de dos modelos automatizados distintos (Modelo-A y Modelo-B):

Modelo A:

- I. En primera instancia se busca automatizar el procedimiento de análisis de estabilidad de taludes, utilizando en el método de reducción de la resistencia. Este análisis se realizará para taludes de pared lisa en dos dimensiones, y será denominado Modelo-A, lo cual corresponde al problema habitual abordado por otros autores en las referencias presentada en la sección de Antecedentes. Esto conlleva:
 - a. Identificar cómo realizar este procedimiento en el software de elementos finitos disponible de forma manual, el cual debe tener potencial de ser automatizado con los softwares disponibles.
 - b. Identificar las variables de diseño, que den cuenta de la variabilidad en la implementación de este método descrita en la sección de Antecedentes y las variables de entrada y de respuesta del modelo.
 - c. Automatizar el procedimiento manual, considerando las variables detectadas.

Modelo B:

- II. En segunda instancia se busca extender el uso del Modelo-A para el análisis de estabilidad de taludes mineros, generados en una etapa previa de planificación. Este nuevo modelo será denominado Modelo-B. Para completar esta tarea se requiere:
 - a. Identificar un procedimiento manual que permita caracterizar la geometría de las paredes de la mina a partir de secciones en dos dimensiones. Para esto, debe tomarse como *input* las variables de salida del procedimiento de planificación minera.
 - b. Identificar las variables del procedimiento anterior y automatizarlo. Este procedimiento automatizado debe ser capaz de caracterizar la mina en diferentes ubicaciones en el espacio, a lo largo de toda su extensión; y considerar la temporalidad de la explotación.
 - c. Separar las diferentes paredes contenidas en una misma sección. Al igual que el Modelo-A se planea analizar taludes unitarios, por lo que es necesario desacoplar la información contenida en cada sección. Este procedimiento debe ser posteriormente automatizado, para aplicarlo a cada sección obtenida en el procedimiento previo.
 - d. Crear un modelo de elementos finitos para cada pared, utilizando la experiencia adquirida en el Modelo-A y extendiendo su uso para taludes mineros basados en bloques. El modelo debe ser automatizado considerando las variables de diseño previamente identificadas.
 - e. Integrar los procedimientos anteriores, obteniendo como resultado un modelo automatizado que toma las variables de salida de planificación, y logra

caracterizar la mina planificada en toda su extensión y en diferentes periodos de la explotación, a partir de la estabilidad de sus paredes.

Un resumen esquemático de ambos modelos se muestra en la Figura 4.1 donde se observan sus principales diferencias. En el Modelo-A se analiza un talud de pared lisa de dimensiones y propiedades de material aleatorios. En cambio, en el Modelo-B se analizan paredes provenientes de un modelo de bloques planificado cuyas dimensiones y propiedades no son aleatorias debido a que están asociadas al modelo de bloques en particular.

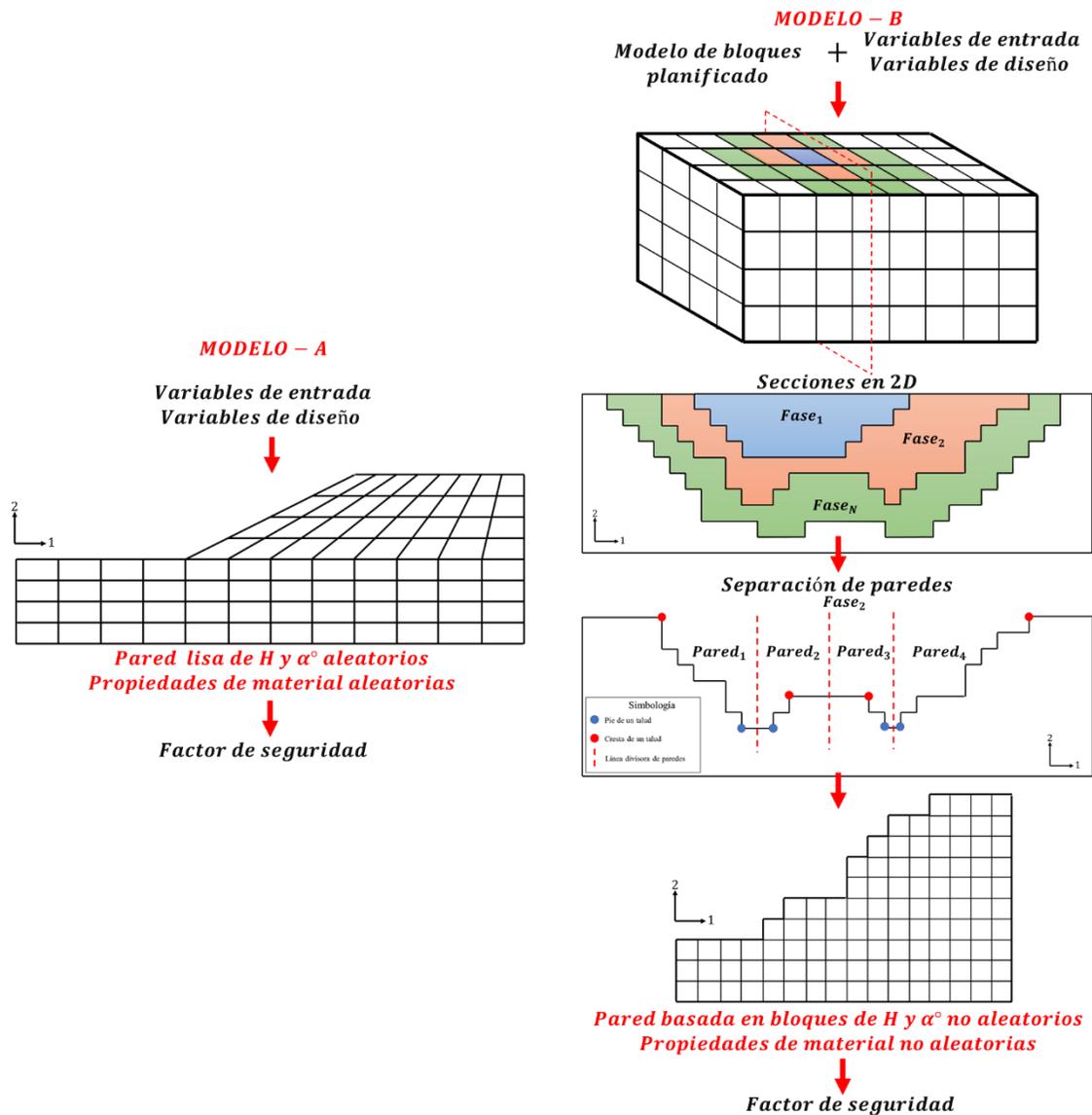


Figura 4.1: Resumen esquemático de los Modelo-A y Modelo-B.

A continuación, se describe la metodología en detalle, considerando la guía metodológica anterior.

4.1 Modelo-A

4.1.1 Procedimiento de análisis de forma manual

Considerando las capacidades de Abaqus, el software de elementos finitos disponible en este proyecto, y como es descrito en la sección 9.1.2, existe la posibilidad de generar el archivo de entrada a la etapa de simulación utilizando un software alternativo. La sintaxis de este archivo se describe con detalle en *Abaqus Keywords Reference Guide* (2010) elaborada por Dassault Systèmes. El simulador de Abaqus debe recibir como entrada un archivo de texto, el cual contiene todas las componentes del modelo generalmente definidas a través de la interfaz gráfica de Abaqus/CAE.

El modelo de elementos finitos queda descrito en su totalidad por: la geometría discretizada, tipo y propiedades de elementos, propiedades de material y el historial de simulación, además de parámetros de incrementación, que afectan la convergencia de los resultados. Cada uno de estos aspectos se maneja a través de diferentes variables de entrada o variables de proceso, detalladas en la sección 9.3.

Una vez generado el archivo, se encuentra apto para ser procesado por Abaqus y post-procesado utilizando el módulo de visualización de Abaqus/CAE o un software alternativo. Utilizando la componente de Abaqus disponible en Isight, es posible leer el archivo binario de salida del simulador de Abaqus, y extraer los valores mínimos y máximos de las variables de respuesta solicitadas en el modelo, sin embargo, para analizar los resultados de forma visual, se requiere utilizar el módulo de visualización disponible en Abaqus/CAE. La secuencia de actividades realizadas en forma manual se esquematiza en la Figura 4.2.

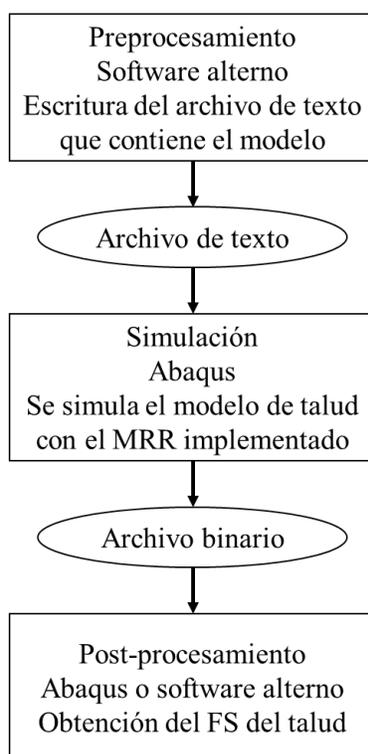


Figura 4.2: Procedimiento manual de análisis de taludes simplificados. Elaboración propia.

4.1.2 Detección de variables del procedimiento manual

Como fue presentado en la sección de Antecedentes, pese a que el método de reducción de la resistencia ha aumentado su popularidad en los últimos años, existe poca unificación de los parámetros utilizados, por lo que ha sido implementado de diferentes formas, en base a los criterios de cada autor.

En la sección 9.3 se detallan las variables identificadas para el Modelo-A con el fin de considerarlas en el procedimiento automatizado. La sección sigue el mismo orden en que fue presentada la sección de Antecedentes.

4.1.3 Automatización

Para automatizar la creación del archivo de texto que recibe el simulador del software de elementos finitos Abaqus, se decide reemplazar el preprocesador de Abaqus por un archivo de ordenes creado en Python, debido a sus cualidades para crear y modificar archivos de texto. El archivo generado debe incorporar todas las variables detectadas.

Para integrar los procedimientos realizados en Python y el simulador de Abaqus se crea un modelo en Isight, usando las componentes Simcode y de Abaqus respectivamente. Los niveles de cada factor del modelo son controlados por una componente de diseño de experimentos. Como se muestra en la Figura 4.3, el proceso integrado permite obtener un factor de seguridad para diferentes taludes, caracterizados por sus variables de entrada, y para diferentes condiciones de proceso, asociando las entradas y salidas de cada procedimiento.

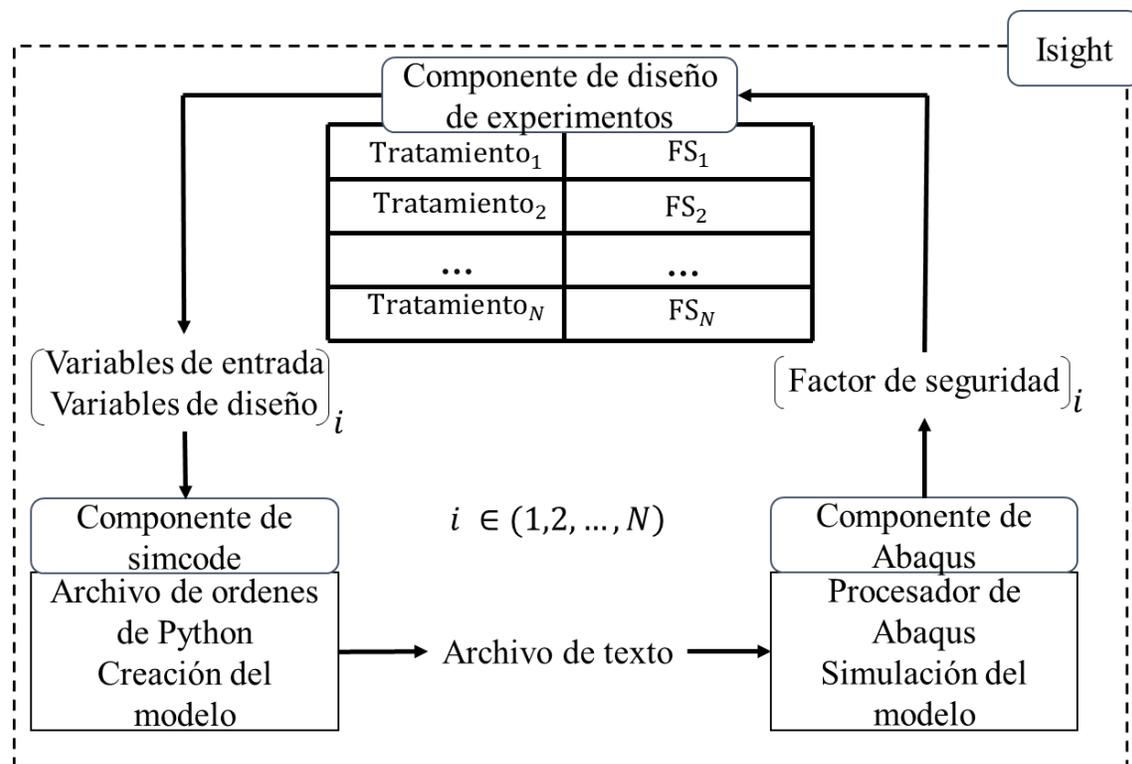


Figura 4.3: Procedimiento automatizado para el análisis de estabilidad de taludes del Modelo-1. Elaboración propia.

Tomando provecho de la automatización del Modelo-1 y utilizando la componente de diseño de experimentos de Isight, será posible analizar el comportamiento del factor de seguridad para diferentes tratamientos y factores estudiados. Utilizando esta herramienta, es posible validar los parámetros del modelo, en función del espacio de respuesta.

4.1.4 Diseño de experimentos para el Modelo-A

A continuación, se describe una serie de experimentos a realizar una vez implementado el Modelo-A, considerando como variables de entrada la geometría y propiedades de material utilizadas por Kai & Yin, 2012 (2012) y Carranza-Torres & Hormazabal (2018), los cuales serán aludidos como talud de suelo y roca respectivamente. Para este último, debido a la escasez de información requerida para llevar a cabo el MRR, se considerará: $E = 10\text{GPa}$, $\nu = 0.3$ y $\psi_0 = 37^\circ$. Los experimentos realizados fueron:

- i. Incertidumbre en las variables de entrada en un rango de $\pm 25\%$, en un diseño factorial completo. El ángulo de dilatancia no será considerado en este experimento, por lo que se considerará una regla de flujo asociado.
- ii. Variación en los parámetros de diseño. Se realizarán diseños factoriales completos considerando los parámetros que impacten más los resultados, determinados mediante análisis preliminares.
- iii. Variación del ángulo de dilatancia, considerando el parámetro *dilatancy_angle*, en un rango de 101 niveles equiespaciados.

4.1.4.1 Incertidumbre en las variables de entrada

En las Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se muestra el valor fijo de los parámetros de diseño y los niveles de las variables de entrada de los taludes de suelo (Kai & Yin, 2012) y de roca (Carranza-Torres & Hormazabal, 2018) respectivamente, considerados para estudiar el comportamiento del factor de seguridad ante la incertidumbre de las variables de entrada del Modelo-A. Los niveles son definidos en base a la frecuencia de su uso o elegidos por criterio del autor, debido a la escasez de información.

Tabla 4.1: Variables de entrada y parámetros utilizados para evaluar la incertidumbre de las variables de entrada sobre el FS, en el modelo de talud de suelo.

Variables de entrada				Variables de diseño		
Altura del talud =	7,5m	10,0m	12,5m	$wd = 2$	$nlgeom = no$	$step_srf = 0,05$
Ángulo del talud =	19,92°	26,57°	33,21°	$wi = 1$	$bc_izq = rodillo$	(3) $time_step_s = 1$
Módulo de Young =	7,50E7Pa	1,00E8Pa	1,25E8Pa	$hb = 1$	$bc_der = rodillo$	(3) $increment_initialS = 0,1$
Razón de Poisson =	0,225	0,3	0,375	$geom_type = D1$	$fieldcond_use = sí$	(3) $increment_minimum_s = 1E-5$
Peso específico =	15,00KN/m ³	20,00KN/m ³	25,00KN/m ³	$lx = 0,05$	$matprop_optimized = no$	(3) $increment_maximum_s = 1$
Cohesión =	11,25KPa	15,00KPa	18,75KPa	$ly = 0,05$	$matprop_decrease = tradicional$	
Ángulo de fricción =	15°	20°	25°	$elem_type = CPE4R$	$srf_initial = 0,5$	$max_displacement_geo = 1E-5$
Ángulo de dilatación =	20°			$geostep_use = sí$	$srf_final = 5$	

Tabla 4.2: Variables de entrada y parámetros utilizados para evaluar la incertidumbre de las variables de entrada sobre el FS, en el modelo de talud de roca.

Variables de entrada				Variables de diseño		
Altura del talud =	225m	300m	375m	$wd = 2$	$nlgeom = no$	$step_srf = 0,05$
Ángulo del talud =	39°	52°	65°	$wi = 1$	$bc_izq = rodillo$	(3) $time_step_s = 1$
Módulo de Young =	7,50E9Pa	1,00E10Pa	1,25E10Pa	$hb = 1$	$bc_der = rodillo$	(3) $increment_initialS = 0,1$
Razón de Poisson =	0,225	0,3	0,375	$geom_type = D1$	$fieldcond_use = sí$	(3) $increment_minimum_s = 1E-5$
Peso específico =	18,75KN/m ³	25,00KN/m ³	31,25KN/m ³	$lx = 0,05$	$matprop_optimized = no$	(3) $increment_maximum_s = 1$
Cohesión =	500,25KPa	667,00KPa	833,75KPa	$ly = 0,05$	$matprop_decrease = tradicional$	
Ángulo de fricción =	27,75°	37,00°	46,25°	$elem_type = CPE4R$	$srf_initial = 0,5$	$max_displacement_geo = 1E-5$
Ángulo de dilatación =	37°			$geostep_use = sí$	$srf_final = 4$	

4.1.4.2 Incertidumbre de las variables de diseño

La cantidad de variables de diseño (30) es excesiva para generar un diseño factorial completo que, en el caso más simple, representaría la necesidad de realizar $2^{30} = 1.073.741.824$ tratamientos. Debido a esto, y tras las primeras pruebas exploratorias, se decide estudiar solo los parámetros que, a criterio del autor, tendrían un mayor impacto en el factor de seguridad computado.

Para ambos taludes de suelo (Kai & Yin, 2012) y roca (Carranza-Torres & Hormazabal, 2018) se realizan dos experimentos: A y B, considerando un conjunto diferente de factores estudiados, mostrados en las Tabla 4.3 y Tabla 4.4. Nótese que, en el primer experimento, el ángulo de dilatación se maneja como un parámetro de dos niveles: valor nulo o flujo asociado, y que los parámetros *increment_minimum_{s3}* y *time_steps_{s3}* corresponden al incremento mínimo y al *periodo* del último *step* de la simulación respectivamente, donde se realiza la reducción de los parámetros de MC. En el experimento-A y experimento-B se consideran 11 y 9 factores respectivamente; 3 de ellos se repiten en ambos experimentos: *bc_der*, *lx* y *increment_minimum_{s3}*, aumentándose el rango de variación para los dos últimos en el experimento-B. Todos los tratamientos se realizan en orden aleatorio.

4.1.5 Efecto del ángulo de dilatación

Considerando los parámetros mostrados en las Tabla 4.3 y Tabla 4.4 para los modelos de talud de suelo y roca respectivamente, se estudia el impacto del valor del ángulo de dilatación sobre el FS computado por el Modelo-A. Se consideran 101 niveles en total equiespaciados, desde el valor cero hasta alcanzar un flujo asociado, modificando el parámetro *dilatancy_angle*.

Tabla 4.3: Variables de diseño utilizadas para evaluar su impacto sobre el factor de seguridad computado del experimento-A.

Variables de diseño							
Ángulo de dilatación	0°	1°	<i>lx</i>	3,75E-02	6,25E-02	<i>geostep_use =sí</i>	<i>srf_final =5</i>
<i>bc_der</i>	<i>rodillo</i>	<i>fijo</i>	<i>nlgeom</i>	<i>no</i>	<i>sí</i>	<i>bc_izq =rodillo</i>	(3) <i>time_step_s =1</i>
<i>elem_type</i>	CPE4R	CPE4	<i>step_srf</i>	3,75E-02	6,25E-02	<i>fieldcond_use =sí</i>	(3) <i>increment_initial_S =0,1</i>
<i>geom_type</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>wd</i>	1,5	2,5	<i>matprop_optimized =no</i>	(2) <i>increment_minimum_S =1E-5</i>
<i>hb</i>	0,75	1,25	<i>wi</i>	0,75	1,25	<i>matprop_decrease =tradicional</i>	(3) <i>increment_maximum_S =1</i>
<i>increment_minimum_{S3}</i>	7,50E-06	1,25E-05	<i>ly =0,05</i>			<i>srf_initial =0,5</i>	<i>max_displacement_geo =1E-5</i>

Tabla 4.4: Variables de diseño utilizadas para evaluar su impacto sobre el factor de seguridad computado del experimento-B.

Variables de diseño							
<i>bc_der</i>	<i>rodillo</i>	<i>fijo</i>	<i>ly</i>	2,50E-02	7,50E-02	<i>hb = 1</i>	<i>srf_final =5</i>
<i>bc_izq</i>	<i>rodillo</i>	<i>fijo</i>	<i>matprop_optimized</i>	<i>no</i>	<i>sí</i>	<i>nlgeom =no</i>	<i>matprop_decrease =tradicional</i>
<i>fieldcond_use</i>	<i>sí</i>	<i>no</i>	<i>time_step_{S3}</i>	0,75	1,25	<i>step_srf =0,05</i>	(3) <i>increment_initial_S =0,1</i>
<i>geostep_use</i>	<i>sí</i>	<i>no</i>	<i>geom_type =D1</i>	Ángulo de dilatación =0°		<i>wd =2</i>	(2) <i>increment_minimum_S =1E-5</i>
<i>increment_minimum_{S3}</i>	2,50E-06	1,75E-05	<i>elem_type = CPE4</i>			<i>wi =1</i>	(3) <i>increment_maximum_S =1</i>
<i>lx</i>	2,50E-02	7,50E-02	(2) <i>time_step_S =1</i>			<i>srf_initial =0,5</i>	<i>max_displacement_geo =1E-5</i>

4.2 Modelo-B

4.2.1 Obtención de secciones en 2D

Para obtener secciones en dos dimensiones a partir de la geometría del rajo, es necesario generar un procedimiento que considere los resultados obtenidos del software de planificación disponible Whittle, cuyas variables de salida corresponden a la secuencia bajo la cual, los bloques (del modelo de bloques) serán extraídos y agrupados en fases de explotación minera. De este modo para cada fase de explotación se tiene un conjunto de bloques que serán extraídos y modificarán la geometría del rajo en explotación.

La planificación obtenida por Whittle se expresa en diferentes archivos de salida, algunos corresponden a archivos de texto y otros a archivos binarios. El software para el diseño asistido por computadora Surpac posee compatibilidad con los resultados de Whittle, por lo que es posible desplegar en su ambiente gráfico la geometría del rajo durante las diferentes fases de explotación planificadas, y utilizando sus herramientas, obtener planos que corten esta geometría.

4.2.2 Automatización de la generación de secciones en 2D

Para automatizar la generación de secciones en dos dimensiones se utilizan las herramientas de Surpac que permiten grabar acciones realizadas dentro del software. De este modo se crea un archivo de ordenes basado en el lenguaje TCL. Este archivo es de tipo texto, por lo que puede ser modificado para incorporar las diferentes variables que comprende el procedimiento.

La secuencia de acciones en Surpac que permiten obtener una sección en dos dimensiones expresada en un archivo de texto con coordenadas, a partir del modelo de bloques planificado proveniente de Whittle son:

- i. Despliegue del modelo de bloques.
- ii. Despliegue de los bloques remanentes luego de cada fase de explotación y creación de un sólido (triangulaciones) como representación.
- iii. Creación de un plano, caracterizado por: un punto perteneciente al plano y el rumbo y manteo del plano. De ser necesario, este plano debe ser rotado para reducir la información a dos ejes cartesianos.

Siguiendo la misma numeración de la secuencia de acciones anterior, se identifican las siguientes variables:

- i. Una variable de entrada denominada *m_bloques*, correspondiente al modelo de bloques proveniente de planificación.
- ii. Una variable de diseño denominada *phase*, correspondiente a la fase de explotación analizada.
- iii. Dos variables de diseño, correspondientes al punto (*plane_point*) y rumbo del plano (*plane_dipdir*) generado. El manteo corresponde a un valor fijo de 90°.

Al considerar diferentes valores para las variables de diseño: *phase*, *plane_point* y *plane_dipdir* es posible caracterizar la geometría de la mina en toda su extensión y en diferentes etapas de la explotación. A modo de ejemplo, en la Figura 4.4, se esquematizan, diferentes fases de explotación separadas por color, en una vista en dos dimensiones.

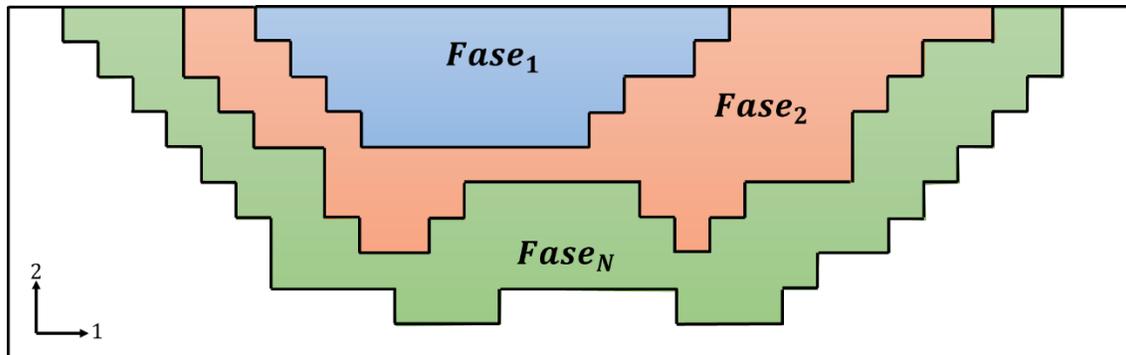


Figura 4.4: Vista en dos dimensiones de diferentes fases de explotación, basadas en un modelo de bloques.

Elaboración propia.

Es necesario destacar que, para caracterizar la geometría del rajo, los planos generados no pueden ser aleatorios. Estos deben capturar preferentemente las paredes de mayor altura, mayor pendiente y mayor probabilidad de falla. Debido a esto, se espera tener un proceso automatizado de búsqueda de mínimos locales en tres dimensiones, el cual permita identificar los sectores más profundos de la superficie, de donde nacen los taludes de mayor altura y cuya rotura implica un mayor riesgo. Una vez identificados los fondos de mina, se obtendrán secciones en cuatro direcciones: 0° , 45° , 90° y 135° respecto al norte.

4.2.3 Separación de paredes contenidas en la misma sección

El procedimiento anterior entrega como variable de salida un archivo de texto por cada sección generada. Cada sección posee al menos dos paredes, por lo que es necesario separar la información correspondiente a cada pared, como se esquematiza en la Figura 4.5, para la sección obtenida tras la segunda fase de explotación, mostrada en la Figura 4.4. Para esto se utilizará un archivo de órdenes de Python, que generará un nuevo archivo de texto por cada pared contenida en una sección. Esto permite realizar el análisis estabilidad de cada talud por separado. La cantidad de archivos generados es variable, pues se desconoce cuántas paredes contiene cada sección.

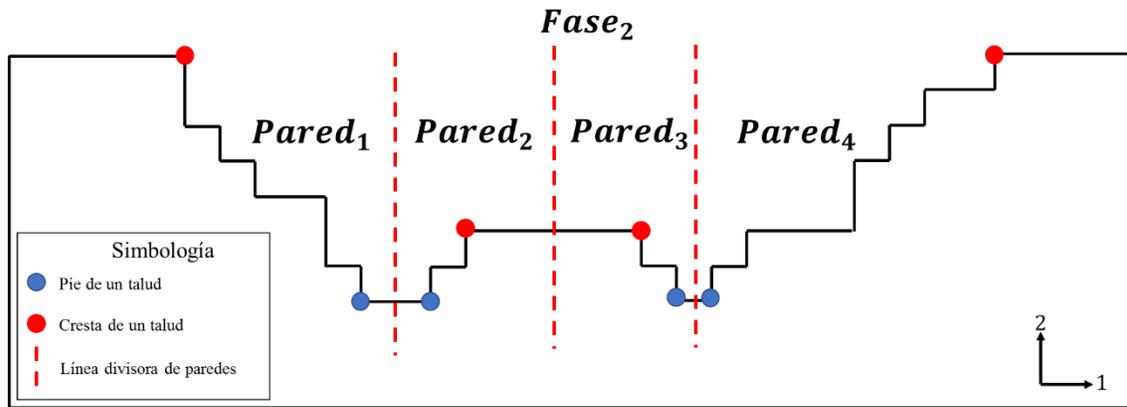


Figura 4.5: Separación de paredes de la segunda fase de explotación mostrada en la Figura 4.4. Elaboración propia.

4.2.4 Generación del modelo de elementos finitos

Para crear el modelo de elementos finitos se modifica la metodología adoptada en el Modelo-A. A diferencia del análisis de un talud de pared lisa, en el Modelo-B es necesario analizar un talud basado en bloques. A continuación, se detallan las modificaciones consideradas:

- i. La altura y ángulo de talud son obtenidas a partir de los puntos correspondientes al pie y cresta del talud, como se muestra en la Figura 4.5.
- ii. Se considera sólo una distribución de elementos finitos mostrada en la Figura 4.6.
- iii. El tamaño de los elementos es homogéneo, y corresponde a la unidad básica repetible: las dimensiones de cada bloque. Debe notarse el tamaño del bloque depende del nivel del parámetro *plane_dipdir* como se esquematiza en la Figura 4.7. Considerando lo anterior, los valores de l_x y l_y corresponden a una variable de respuesta del modelo, que se utiliza para controlar el tamaño de los elementos bajo ciertas condiciones. De exceder un valor de 0.25, a criterio del autor, un valor muy alto, el tamaño de los bloques es reducido.

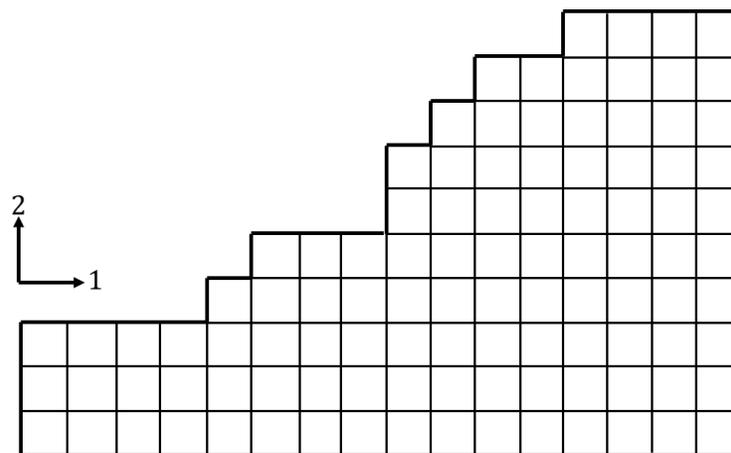


Figura 4.6: Distribución de elementos finitos sobre un talud minero. Elaboración propia.

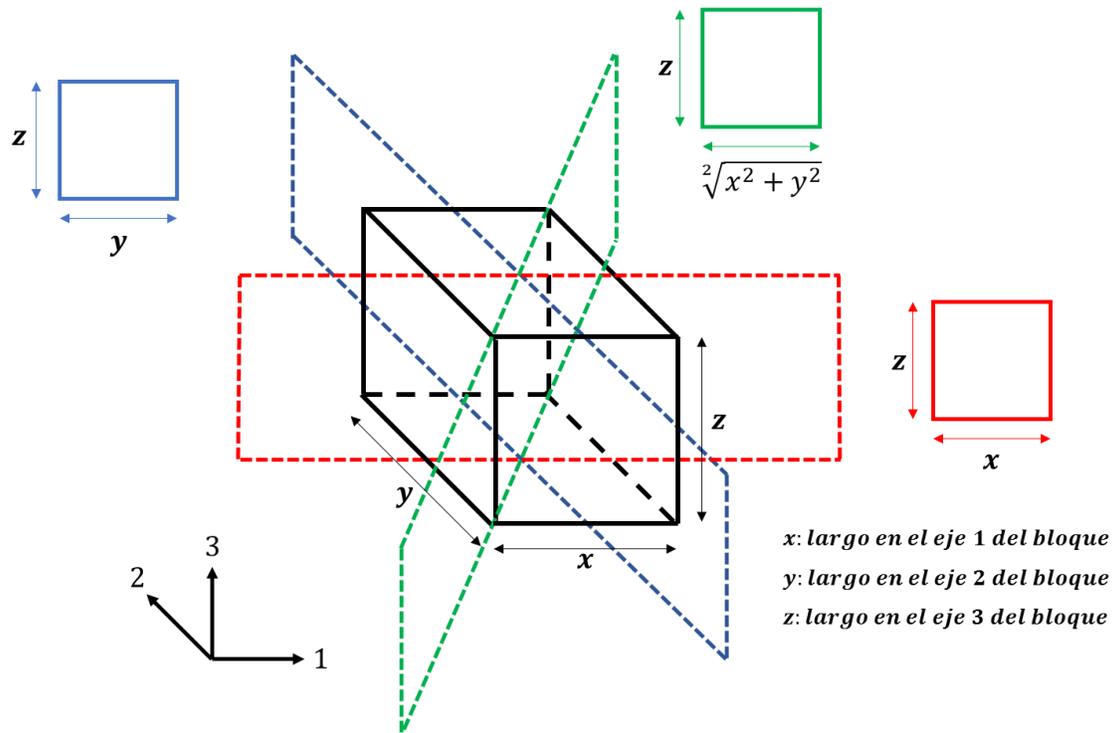


Figura 4.7: Tamaño de los bloques en dos dimensiones según el rumbo de la sección de análisis. Elaboración propia.

Considerando los cambios anteriores, este procedimiento entrega un archivo de texto de entrada al Abaqus, de manera análoga al Modelo-A.

Además, se agrega una nueva variable de respuesta, denominada $Bancos_{F;ML;D;P}$, que corresponde a la cantidad de escalones presentes en la pared, como se esquematiza en la Figura 4.8. Esto, debido a que dos taludes de igual altura y ángulo de talud, pueden poseer diferente cantidad de bancos.

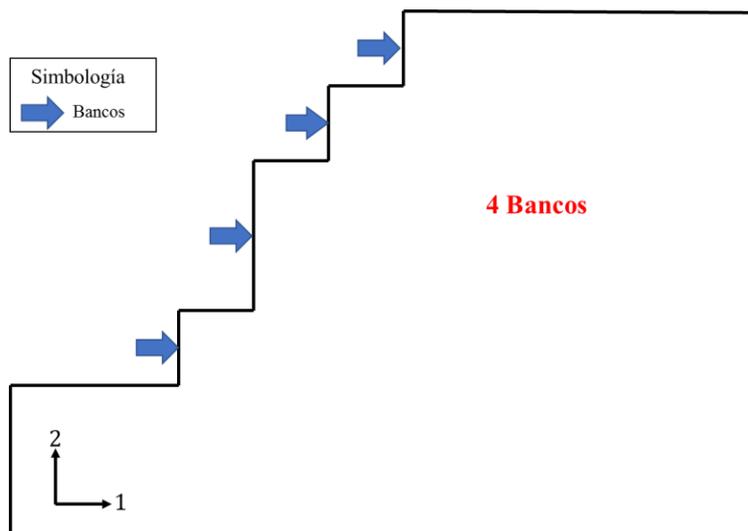


Figura 4.8: Esquema de los bancos de un talud. Elaboración propia.

4.2.5 Integración de los procedimientos

Utilizando las capacidades de Isight se espera generar una cadena de actividades que comprenda todos los procedimientos anteriores, relacionados por sus variables de entrada y de salida. Utilizando componentes Simcode, de Abaqus y de diseño de experimentos es posible partir de los resultados de planificación, generar una serie de secciones que caracterice la explotación, independizar las paredes y caracterizar cada talud mediante un factor de seguridad. Esto permite identificar zonas con mayor probabilidad de falla o con potencial aumento del ángulo de talud, lo que puede conllevar a menores costos en la operación.

La concatenación de procedimientos propuesta se muestra en la Figura 4.9 donde, con el objetivo de evitar la repetición de actividades, se utilizan tres componentes de diseños de experimentos (DE-1, DE-2 y DE-3) para iterar las variables del modelo, tal como se realizaría, si se considerarían como diferentes tratamientos. De esta forma, se puede iterar para las diferentes: fases, mínimos locales, direcciones y paredes identificadas con subíndices F , ML , D y P respectivamente. Al utilizar esta configuración se espera obtener el factor de seguridad para cada pared, contenida en cada sección obtenida, utilizando cada mínimo local detectado y dirección, para cada fase de explotación ($FS_{F;ML;D;P}$).

Al considerar los resultados de planificación como una variable de entrada del Modelo-B, se da el primer paso en la integración de estos dos procedimientos.

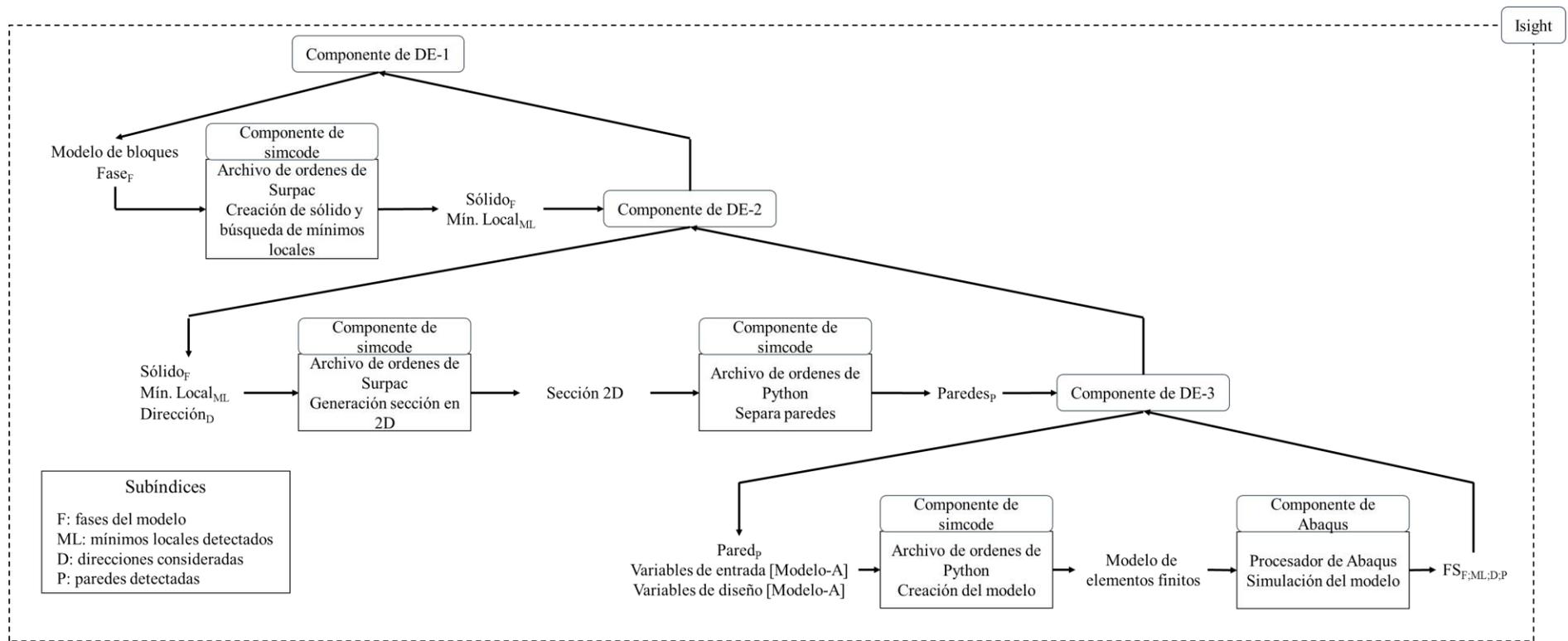


Figura 4.9: Integración propuesta para el Modelo-B. Elaboración propia.

4.2.6 Diseño de experimentos para el Modelo-B

El Modelo-B aún no posee un procedimiento de análisis de los resultados, con potencialidad de automatización. Por este motivo, a modo de ejemplificar el uso de esta nueva herramienta, se realizan dos experimentos cuyos resultados se trabajan de forma manual. Estos experimentos son:

- i. Variación en el modelo de bloques, proveniente de planificación. Se toman como variable de entradas cinco modelos de bloques, que han sido obtenidos solo modificando el ángulo de talud de planificación. Se remarca que, el modelo de bloques que ingresa a planificación es el mismo, pero al realizar cinco procedimientos de planificación diferentes, se obtienen cinco modelos de bloque planificados distintos.
- ii. Variación en las propiedades mecánicas de material. Para un mismo modelo de bloques planificado se modifican los parámetros de resistencia de Mohr-Coulomb en un rango de $\pm 15\%$

4.2.6.1 Variación en el modelo de bloque planificado

Se utiliza el Modelo-B para analizar cinco modelos de bloque planificados, cuya única diferencia, es el ángulo de planificación utilizado para obtener la geometría del rajo. Los ángulos utilizados fueron: 40° , 45° , 50° , 55° y 60° , por lo que se refiere a cada plan según el ángulo utilizado, por ejemplo, el primer caso corresponde al Plan-40. Todos los modelos fueron realizados permitiendo a las componentes DE-2 y DE-3 (ver Figura 4.9) trabajar en paralelo, con un máximo de 2 puntos evaluados simultáneamente. Los parámetros de material y variables de diseño son las mismas utilizadas para el modelo de roca (Carranza-Torres & Hormazabal, 2018) en experimentos previos, presentados en la Tabla 4.2. Las dimensiones de los bloques son: 15m, 15m y 10m, en las direcciones E-W, N-S y altura respectivamente.

4.2.6.2 Variación en las propiedades del material

Para la planificación obtenida con un ángulo de 45° se realizan dos nuevos tratamientos, al aumentar y disminuir simultáneamente, en un 15%, los parámetros de Mohr-Coulomb del material, cuyos planes son denominados Plan-45-Alto y Plan-45-Bajo, respectivamente. Se considera un criterio de aceptabilidad de 1.4 para el FS, valor típico en la industria minera, para calcular el efecto que tienen estos tratamientos sobre el porcentaje de taludes aceptables.

5 Implementación y resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al implementar los procedimientos descritos en la sección de Metodología, subdividida en dos modelos: Modelo-A y Modelo-B, con el objetivo final de obtener un procedimiento automatizado de análisis de estabilidad de taludes mineros.

5.1 Modelo-A

5.1.1 Automatización del modelo

En la Figura 5.1 se muestra Modelo-A automatizado, utilizando la plataforma de Isight. Las variables del modelo se controlan utilizando la componente de diseño de experimentos (DE) de Isight. Tomando en cuenta las variables de entrada y de diseño, la componente Simcode ejecuta un archivo de órdenes de Python, lo que permite generar el modelo de elementos finitos del talud, expresado en un archivo de texto. Por último, la componente Abaqus recibe el modelo, ejecuta el simulador y obtiene como resultado el factor de seguridad del talud, sumado a un archivo binario que contiene los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos calculados durante la simulación.

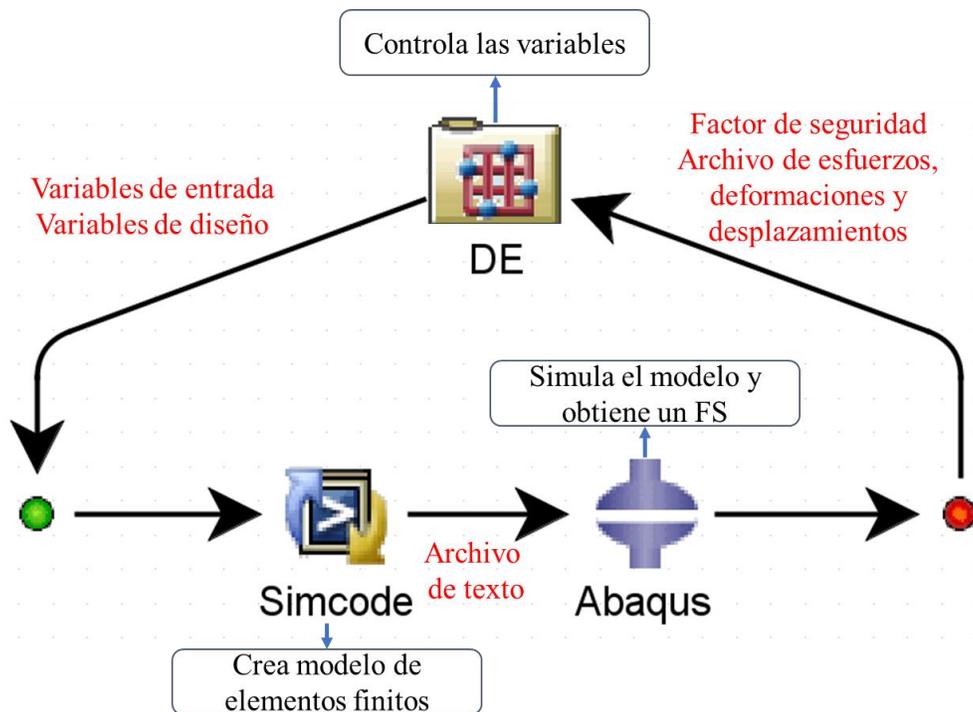


Figura 5.1: Modelo-A automatizado.

La totalidad de las variables: de entrada, de diseño y de respuesta, propuestas en la sección de Metodología, fueron consideradas e implementadas correctamente. Por lo tanto, el Modelo-A posee un total de: 8 variables de entrada, 30 de diseño y 4 de salida mostradas en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Resumen de variables del Modelo-A.

Variables de entrada	Variables de diseño			Variables de salida
Altura del talud	<i>wd</i>	<i>nlgeom</i>	<i>step_srf</i>	SRF
Ángulo del talud	<i>wi</i>	<i>bc_izq</i>	(3) <i>time_step_s</i>	
Módulo de Young	<i>hb</i>	<i>bc_der</i>	(3) <i>increment_initial_s</i>	Desplazamientos
Razón de Poisson	<i>geom_type</i>	<i>fieldcond_use</i>	(3) <i>increment_minimum_s</i>	
Peso específico	<i>lx</i>	<i>matprop_optimized</i>	(3) <i>increment_maximum_s</i>	Esfuerzos
Cohesión	<i>ly</i>	<i>matprop_decrease</i>		
Ángulo de fricción	<i>elem_type</i>	<i>srf_initial</i>	<i>max_displacement_geo</i>	Deformaciones
Ángulo de dilatación	<i>geostep_use</i>	<i>srf_final</i>		

Utilizando este modelo, es posible analizar la estabilidad de un talud de pared lisa, de altura y ángulo de talud aleatorios, y con propiedades de material típicas de suelo o roca. Además, es posible obtener el factor de seguridad del talud utilizando diferentes condiciones de proceso adoptadas por autores previos o propuestas en este trabajo. Al utilizar la componente de diseño de experimentos de Isight, es posible definir tratamientos de forma rápida, y estudiar el comportamiento del factor de seguridad considerando la incertidumbre de las variables de entrada y de los parámetros del proceso.

Los resultados del modelo A no se incluyen en esta sección ya que corresponden al proceso de testeo y calibración de las variables de entrada y salida del proyecto. Para efectos de este texto, se incluyen en la sección Anexos. Los resultados claves del Modelo A, serán discutidos en el siguiente capítulo.

5.2 Modelo-B

5.2.1 Automatización del modelo

En la Figura 5.2 se muestra Modelo-B automatizado, utilizando la plataforma de Isight. El esquema propuesto se logró implementar, casi en su totalidad, exceptuando el procedimiento de búsqueda de mínimos locales. Para remediar esto, los mínimos locales de cada fase fueron obtenidos manualmente, e ingresados como variables de entrada junto con la planificación. De este modo, luego de ingresar: el modelo de bloques planificado, la cantidad de fases de explotación, los mínimos locales de cada fase, las propiedades de material y los parámetros de diseño del método de elementos finitos, el modelo genera un sólido representativo de cada fase, genera secciones en dos dimensiones en torno a los mínimos locales, para diferentes direcciones, separa las paredes contenidas en cada sección, y crea y simula el modelo de elementos finitos de cada pared. Finalizado esto, es posible obtener el factor de seguridad de cada talud, contenido en cada sección, para cada dirección, para cada mínimo local y para cada fase de explotación, denotado como $FS_{F;ML;D;P}$.

Las variables de entrada del Modelo-B deben ser ingresadas en la primera componente de diseño de experimentos (DE-1), la cual transmite esta información a las demás componentes. Por simplificación del esquema del modelo, se muestra que parte de estas variables son ingresadas en las componentes DE-2 y DE-3. La configuración, compuesta por tres componentes de diseño de experimentos, permite iterar las actividades concatenadas bajo dichas componentes, de esta forma, es posible iterar las actividades asociadas a diferentes

fases, mínimos locales, direcciones y paredes, evitando la repetición de tareas y el aumento del tiempo de trabajo. En el caso de las direcciones de análisis se consideran como un parámetro fijo de 4 niveles: 0°, 45°, 90° y 135° respecto al norte.

El mecanismo de búsqueda de mínimos locales, no implementado en el Modelo-B, tenía por objetivo identificar de manera preferencial los taludes con mayor potencialidad de falla, sin embargo, cualquier algoritmo que permita obtener una gran cantidad de puntos correspondientes a cada fase, permitiría capturar dichos taludes, pero aumentando el costo computacional de su uso.

El Modelo-B automatizado es apto para caracterizar la estabilidad de taludes de una mina de rajo, considerando la espacialidad y temporalidad de la explotación. Al integrarlo con el modelo de bloques planificado permite añadir, al proceso de planificación, un nuevo filtro o indicador clave, que indique cuán estables serán las paredes del rajo, en diferentes zonas o momentos de la explotación. Se destaca que este modelo da el primer paso para resolver el problema de falta de integración, entre los procedimientos de planificación, diseño y análisis de estabilidad. Si bien el diseño se deja fuera de los alcances de este trabajo, se considera que los taludes mineros, basados en bloques, son una buena aproximación a la geometría de las paredes de la mina tras del procedimiento de diseño. No obstante lo anterior, se recomienda complementar el modelo-B con un procedimiento automatizado de diseño minero en dos dimensiones, que modifique la geometría de las paredes.

Al igual que el Modelo-A, en el Modelo-B es posible considerar la incertidumbre de las variables de entrada y analizar, simultáneamente, diferentes modelos de bloques y propiedades de material, tomando provecho de las componentes de diseño de experimentos.

En la sección de 9.5.1 se muestra una tabla de ejemplo de los resultados obtenidos utilizando el Modelo-B. En este ejemplo se utiliza un modelo de bloques con cinco fases planificadas, cada una de ellas caracterizada por dos mínimos locales. Se utilizan cuatro direcciones (0, 45, 90 y 135) respecto al norte. Nótese que las paredes con solo un banco no son analizadas. Esto es debido a que representan solo un bloque, lo cual en la práctica puede no representar un talud. Además, debido a su baja altura, poseen valores de FS muy altos que modifican de manera significativas las estadísticas sobre los resultados.

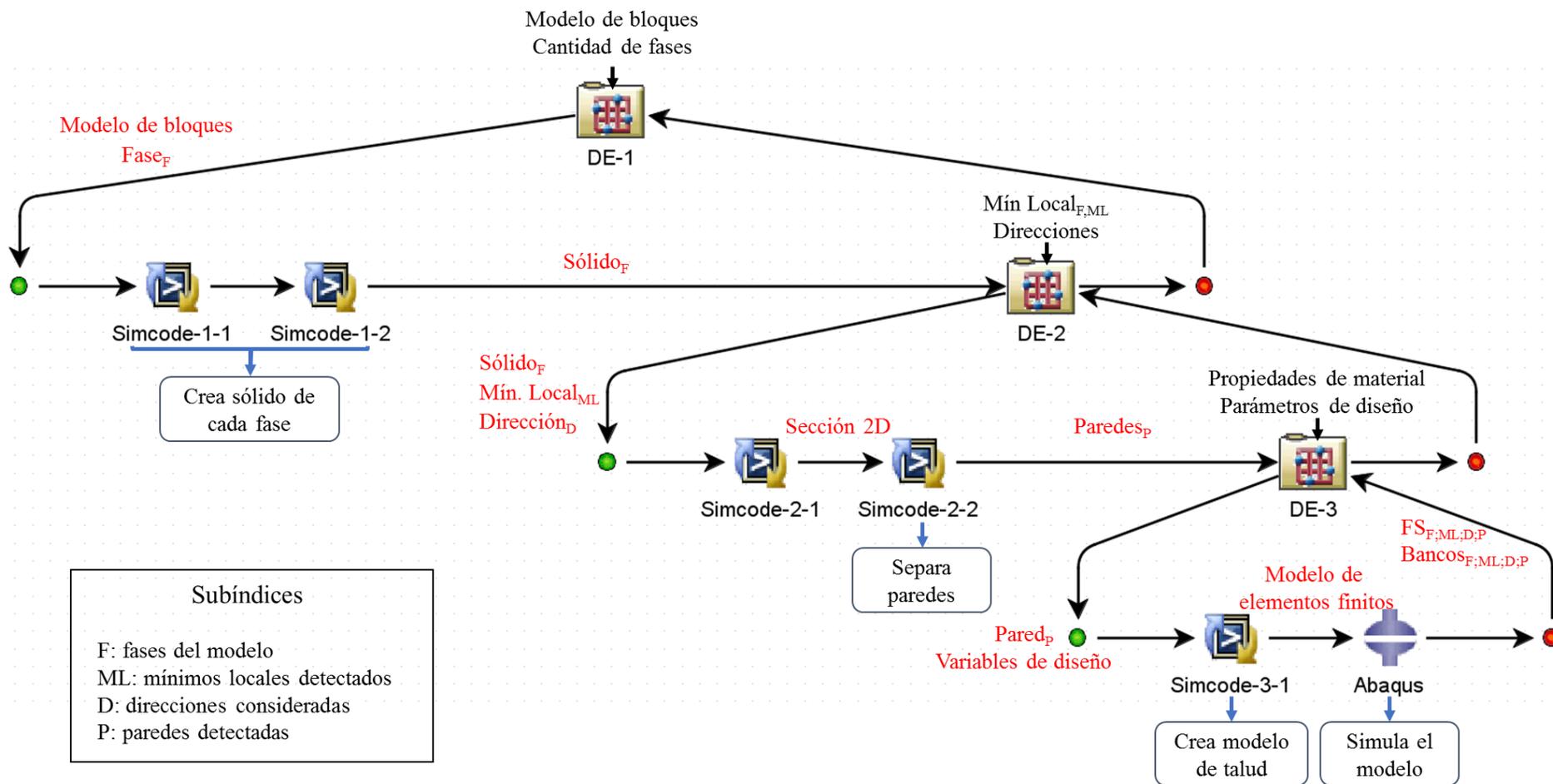


Figura 5.2: Modelo-B automatizado.

5.2.1.1 Variación en el modelo de bloque planificado

En la Tabla 5.2 se presentan las estadísticas básicas del factor de seguridad, ángulo de talud y cantidad de bancos obtenidos al analizar cada planificación descrita en la sección 4.2.6.1 y los tiempos de trabajo total y promedio por talud en la Tabla 5.3. Los resultados se complementan con gráficos de frecuencia e imágenes de los patrones de deformación observados representativos de los planes analizados, en los Gráfico 5.1 y Gráfico 5.2 y la Figura 5.3.

Tabla 5.2: Estadísticas básicas de las variables de respuesta del Modelo-B, al analizar diferentes modelos de planificación.

	Plan-40	Plan-45	Plan-50	Plan-55	Plan-60
Factor de seguridad					
Media	1,77	2,09	2,27	2,23	2,15
Mediana	1,82	1,63	1,52	1,42	1,32
Desviación estándar	0,16	1,59	1,76	1,52	1,76
Ángulo de talud					
Media	39,18	43,20	48,96	53,26	54,54
Mediana	39,94	43,87	48,54	53,13	55,30
Desviación estándar	1,81	4,96	5,63	5,95	6,51
Bancos					
Media	25,96	20,42	16,41	12,96	11,46
Mediana	26,00	20,00	17,50	14,00	12,00
Desviación estándar	4,45	7,39	7,76	7,13	5,82

Tabla 5.3: Tiempo de trabajo total y media por talud, asociado a cada modelo de planificación evaluado.

	Tiempo de trabajo [min]	Cuenta de paredes	Promedio [min]
Plan-40	21,4	48	0,4
Plan-45	27,4	90	0,3
Plan-50	27,5	100	0,3
Plan-55	29,1	135	0,2
Plan-60	27,4	135	0,2
Promedio=			0,3

Factor de seguridad

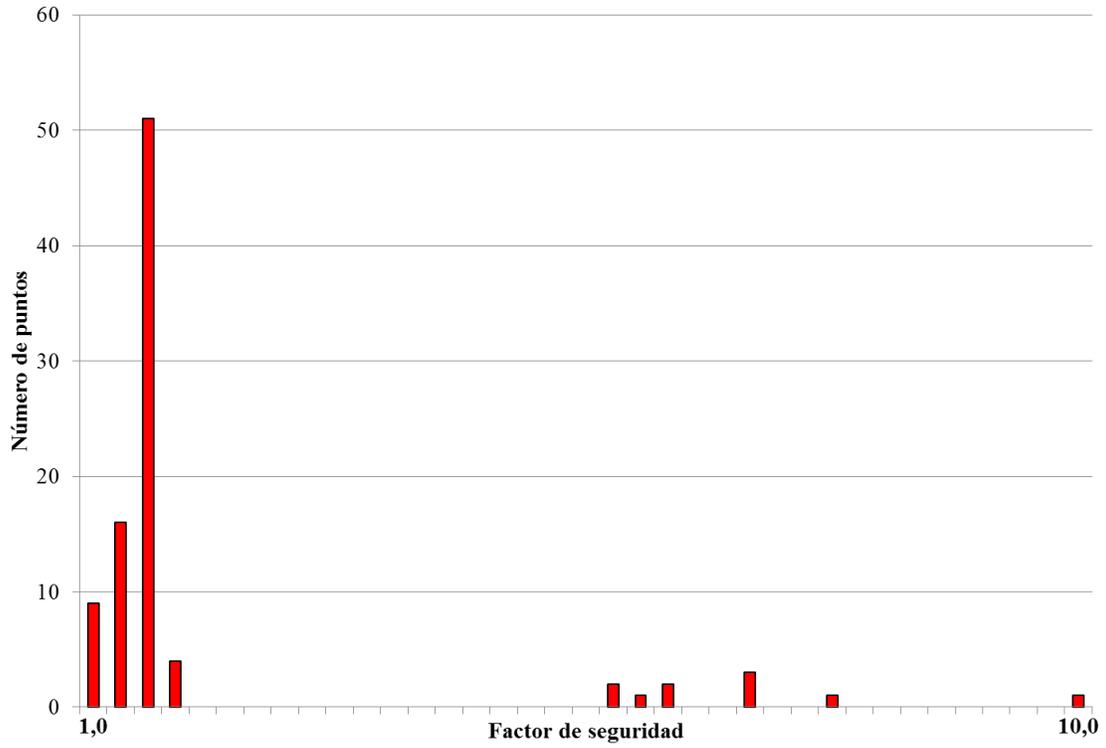


Gráfico 5.1: Frecuencia acumulada del FS, obtenida para el Plan-45.

Altura de talud

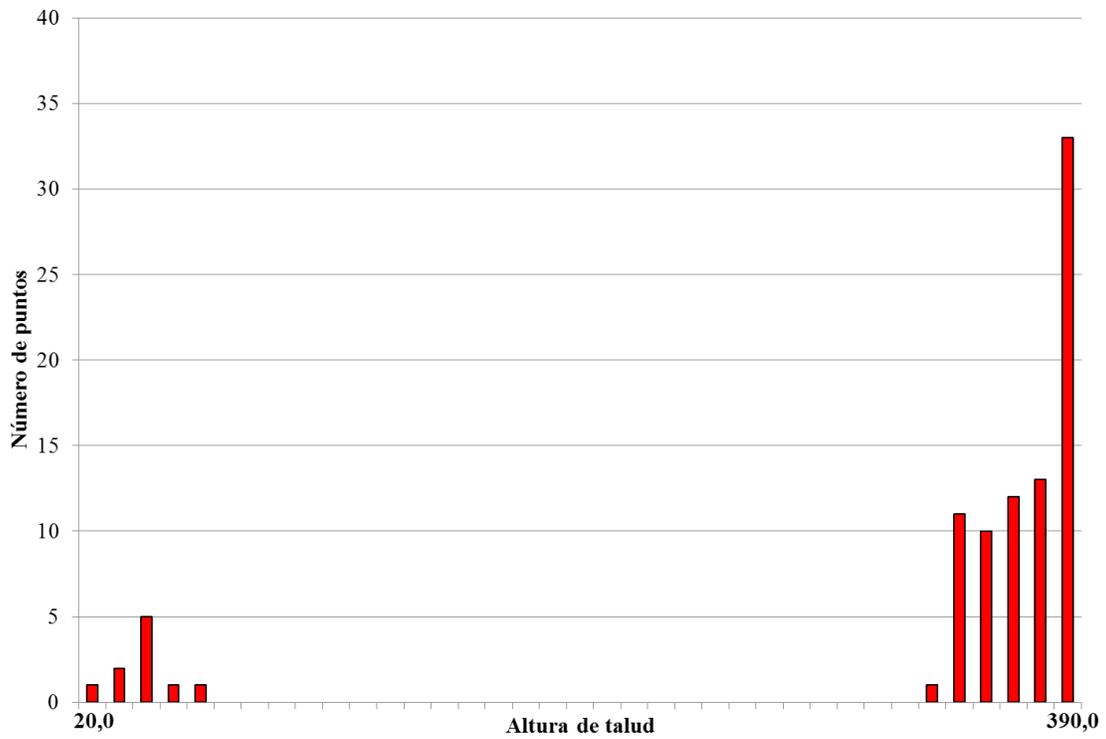


Gráfico 5.2: Frecuencia acumulada de la altura de taludes, obtenida para el Plan-45.

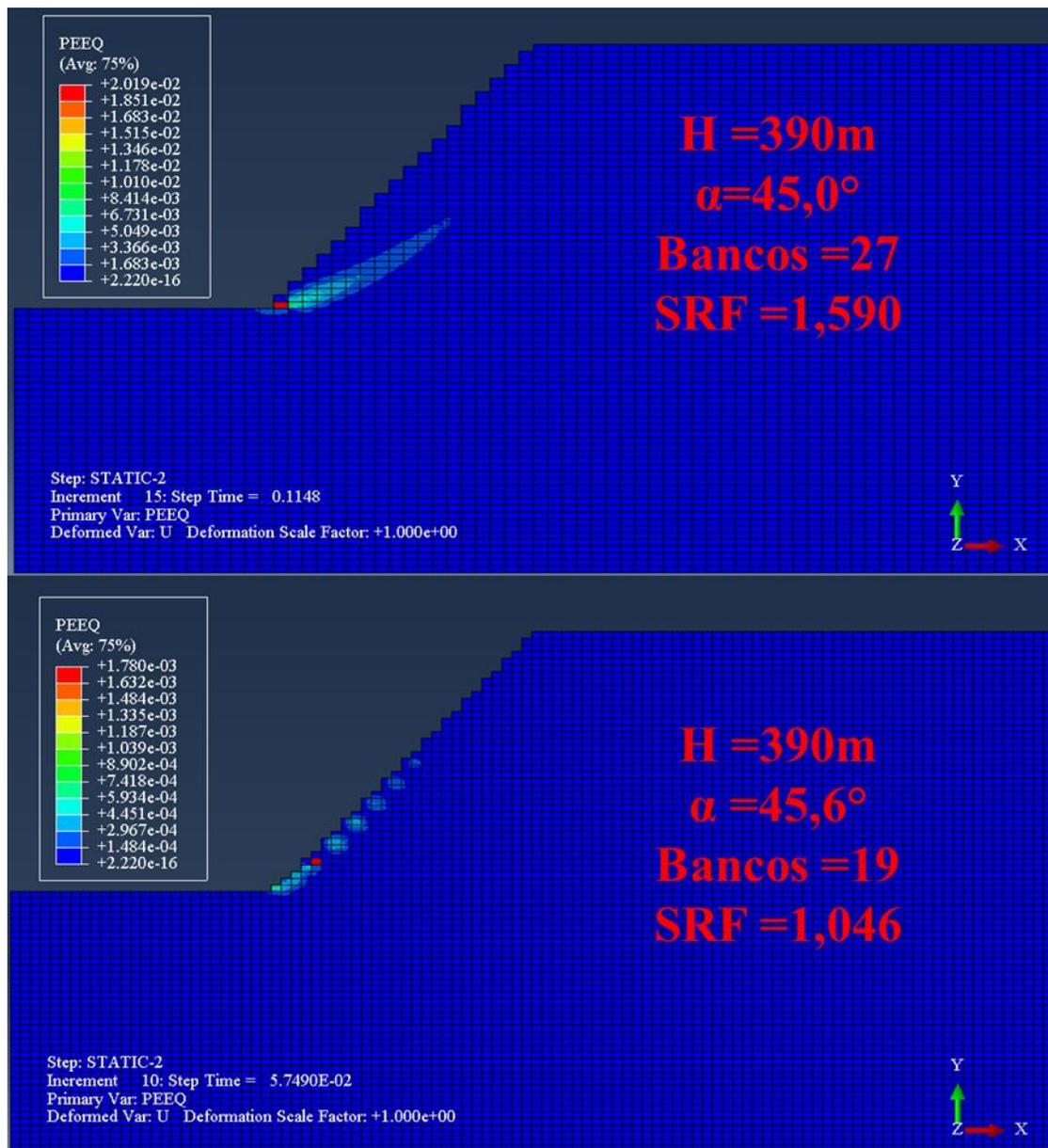


Figura 5.3: Patrones de deformación observados en la ejecución del Modelo-B.

5.2.1.2 Variación en las propiedades del material

En la Tabla 5.4 se presenta las variaciones porcentuales del FS computado y el porcentaje de taludes con un FS sobre el criterio de aceptabilidad, obtenidos al modificar los parámetros de resistencia del macizo rocoso descritos en la sección 4.2.6.2.

Tabla 5.4: Variación porcentual del FS y el porcentaje de paredes aceptables, ante una variación porcentual del 15% en los parámetros de MC.

	Caso Base- Plan-45	Plan-45-Bajo	Plan-45-Alto
	Factor de seguridad		
Media	2,09	1,77	2,45
Variación [%]	-	-0,15	0,17
Mediana	1,63	1,35	1,95
Variación [%]	-	-0,17	0,19
Paredes aceptables [%]	81,11	30,68	94,44

5.2.2 Resultados visuales

En la Figura 5.4 se presentan las variables de entrada y salida de cada actividad concatenada en el Modelo-B, con el fin de entender visualmente qué es lo que realiza el modelo internamente. Considerando la numeración de la figura, se muestra:

- i. Modelo de bloques proveniente de planificación
- ii. Bloques restantes, tras la explotación de una fase.
- iii. Sólido generado a partir del punto anterior.
- iv. Generación de una sección en dos dimensiones, considerando un mínimo local y una dirección respecto al norte.
- v. Separación de las paredes contenidas en la sección.
- vi. Creación de modelo de elementos finitos para cada talud.
- vii. Simulación y resultados del método de reducción de la resistencia.

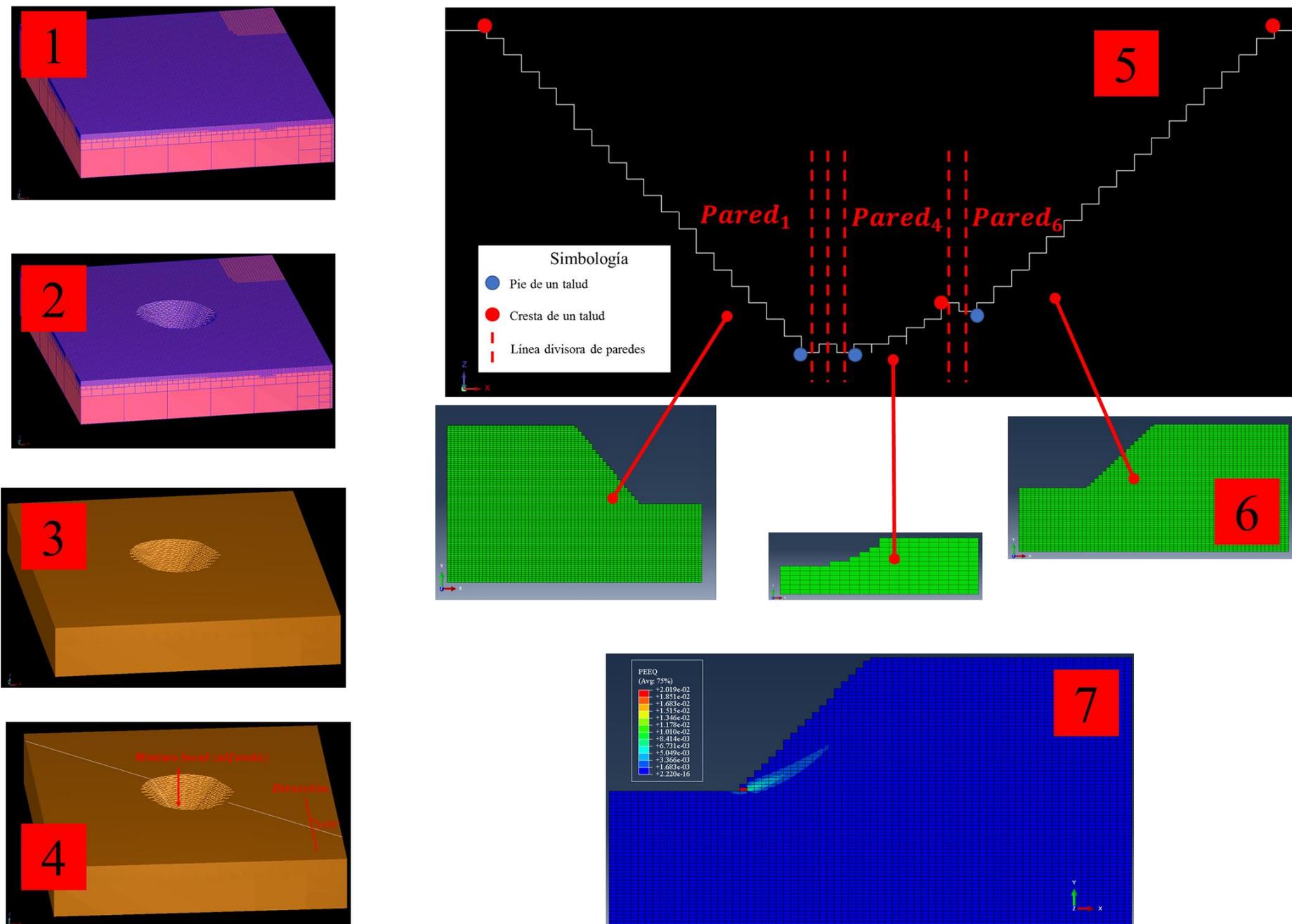


Figura 5.4: Funcionamiento del Modelo-B mostrado de forma gráfica.

6 Análisis de resultados

En esta sección se analizan los resultados presentados en la sección 4.2.6. El análisis se subdivide en los resultados asociados a la automatización de los modelos, considerados en la sección de Metodología, y en los resultados asociados a su uso, en diferentes casos de estudio.

La discusión en torno a los resultados del Modelo A se centrarán en los elementos claves del trabajo. En tanto, el detalle se discutirá en la sección Anexos.

6.1 Modelo-A

6.1.1 Automatización del modelo

La automatización del Modelo-A se realiza según lo previsto, se integran las diferentes actividades y variables, identificadas en la sección de Metodología, en su totalidad.

Las ventajas de la automatización del Modelo-A, están asociadas directamente al tiempo de trabajo requerido para generar un modelo, analizarlo y extraer sus resultados. El procedimiento manual de análisis de taludes de pared lisa, isótropos y homogéneos, que obedecen al criterio de falla de MC, ahora puede ser llevado a cabo solo ingresando los parámetros geométricos y las propiedades de material. Esto no solo reduce el tiempo de trabajo del procedimiento manual, sino que también elimina gran parte del error humano asociado al traspaso de las variables. Además, el Modelo-A automatizado, tiene la capacidad de ingresar múltiples escenarios al mismo tiempo, y así evaluar taludes distintos, de forma simultánea, o realizar análisis de sensibilidad de sus variables. Al incluir las variables de proceso, es posible evaluar su impacto sobre los resultados, y eventualmente, conocer cuáles son las condiciones adecuadas para analizar diferentes taludes, en los rangos tradicionales de altura y ángulo de talud, y de propiedades de material. Para alcanzar una solución cerrada al problema de estabilidad de taludes, se recomienda aumentar el repositorio de variables de diseño y sus niveles disponibles, y realizar análisis multivariados sobre un rango amplio de materiales geotécnicos.

Para ampliar el uso del Modelo-A en diferentes materiales geomecánicos, es necesario considerar una mayor cantidad de características y condiciones que modifican la calidad de un terreno, y que afecta el FS computado. Para esto se requiere modificar el modelo de elementos finitos y agregar condiciones como: presencia de agua, ocurrencia de fracturamiento interno, zonas de contacto u otras heterogeneidades que caracterizan los materiales geotécnicos. Esto permitiría tener un modelo más completo y que represente de manera más exacta la realidad.

6.1.2 Diseño de experimentos

6.1.2.1 Incertidumbre en las variables de entrada

A partir de los resultados expuestos en la sección 9.4.1 se cumple que:

- i. Los tiempos de trabajo del Modelo-A son variables (Tabla 9.2 y Tabla 9.3), al considerar diferentes modelos de talud o diferentes tratamientos en las variables de entrada. No obstante, la media global de este experimento es menor a 1min de trabajo

por cada talud analizado. Este valor es auspicioso, ya que el modelo sería capaz de analizar una gran cantidad de escenarios en poco tiempo; por ejemplo, en 1 día, podría analizar sobre 1.000 escenarios distintos.

- ii. Los gráficos de Pareto de regresión lineal (Gráfico 9.1 y Gráfico 9.7) muestran que:
 - a. Todos los parámetros tienen un efecto sobre el factor de seguridad computado mayor al 10%, exceptuando el módulo de Young y, en el talud de roca, la razón de Poisson. Esto remarca el interés y la importancia de medir con exactitud las propiedades de los materiales, y de construir los taludes conforme al diseño ingenieril, respetando la altura y el ángulo del diseño planificado.
 - b. La magnitud de los efectos es distinta en los taludes de suelo y roca. En particular, se destaca que la razón de Poisson posee un efecto mayor al 20% y menor al 1% sobre el FS para los taludes de suelo y roca respectivamente. Este no es un resultado esperado, pues contradice los resultados presentados por Burman, Acharya, Sahay, & Maity (2015), por lo que se sugiere realizar nuevos experimentos sobre este factor. Se presume que pueden estar asociados a singularidades numéricas del método de elementos finitos. Sin embargo, de ser un resultado realista, la magnitud de este parámetro impactaría fuertemente la estabilidad de taludes de suelo.
 - c. Como media general, los dos factores que más impactan los resultados son: el ángulo de talud y al ángulo de fricción del material. Se destaca la igual importancia de los parámetros geométricos y las propiedades del material al momento de diseñar un talud.
 - d. El módulo de Young posee un efecto casi nulo sobre el FS. A pesar de este resultado, se recuerda que este parámetro tiene una relación directa con los desplazamientos experimentados por el talud, por lo tanto, deben utilizarse valores realistas si se desea tomar decisiones que consideren esta variable de respuesta.
 - e. Se comprueba el comportamiento esperado para estos parámetros, en función del signo de su efecto: aumento del FS al aumentar los parámetros de resistencia, y disminución del FS al aumentar la altura y ángulo del talud. Estos resultados sirven de primera validación del modelo.
- iii. De los gráficos de efectos principales (Gráfico 9.3 y Gráfico 9.9) se desprende que:
 - a. Para el talud de suelo la media del FS es 1,59, que concuerda con el resultado obtenido al utilizar el método tradicional de equilibrio límite de Bishop, pero se aleja considerablemente de los resultados obtenidos por Kai & Yin (2012). Este resultado es insigne, pues se comprueba que utilizar el mismo método de análisis (MRR), implementados por diferentes autores, puede concluir en resultados notoriamente distintos. Para el caso de roca, la media del FS es de 1,58, que sobreestima levemente, los resultados presentados por Carranza-Torres & Hormazabal (2018). En este caso, al utilizar dos métodos distintos, se obtienen resultados similares.
 - b. Una mala medición de los resultados, con desviaciones sobre el 25% en las propiedades del macizo rocoso, conllevaría a caracterizar el mismo talud, cuyo FS medio es 1,59, con valores menores a 1,2 o mayores a 1,8. Esto

- subraya la relevancia de incluir la incerteza en las propiedades de material o parámetros de diseño, particularmente alta en etapas de prefactibilidad, en los análisis de estabilidad de taludes y en los criterios de aceptación utilizados.
- iv. De los gráficos de Pareto de regresión cuadrática (Gráfico 9.2 y Gráfico 9.8) y gráficos de interacción (Gráfico 9.4, Gráfico 9.5, Gráfico 9.6, Gráfico 9.10 y Gráfico 9.11) se menciona que:
 - a. Las variaciones en el FS se deben principalmente a la acción individual de los factores estudiados.
 - b. Si bien existen interacción entre los factores, no se consideran significativas, pues las pendientes obtenidas en los gráficos de interacción no son notoriamente diferentes.

6.1.2.2 Incertidumbre en las variables de diseño

Los resultados obtenidos al realizar los experimento-A y experimento-B relacionados a la incertidumbre en las variables de diseño del Modelo-A se analizan en la sección 9.6.1. Del análisis realizado se resalta:

- i. La relevancia de considerar factores de incertidumbre en las propiedades de material y en los parámetros geométricos de un talud, al realizar un análisis de estabilidad y definir los criterios de aceptación, especialmente, en etapas de factibilidad.
- ii. El impacto de las decisiones tomadas por cada usuario al implementar el MRR. Un porcentaje elevado de las variables de diseño resulta tener incidencia, estadísticamente significativa, al computar el FS de un talud.
- iii. La necesidad de realizar nuevos experimentos sobre las condiciones de proceso de los MRR, con el fin último de definir un proceso único, apto para analizar la estabilidad de taludes de geometría variable y en un rango amplio de calidad del terreno.

El análisis de los resultados visuales y efectos del ángulo de dilatación se presentan en las secciones 9.6.2 y 9.6.3 respectivamente.

6.2 Modelo-B

6.2.1 Automatización del modelo

El modelo automatizado cumple con las expectativas y la metodología planeada para su realización. Permite evaluar la estabilidad de taludes de un modelo de bloques proveniente de planificación, considerando la espacialidad y temporalidad de la explotación de un rajo. La única diferencia respecto a lo planificado es que el modelo implementado no posee aún un algoritmo automatizado de búsqueda de mínimos locales. Se recomienda fuertemente su elaboración e integración futura, o de un código similar, pues su identificación manual aumenta considerablemente el tiempo de trabajo, al aumentar la cantidad de fases de explotación y la complejidad de la geometría del rajo. Además, se sugiere implementar métodos automáticos de diseño minero en dos dimensiones, para analizar geometrías más cercanas a la realidad operativa de una mina a rajo.

El modelo actual, ya permite integrar un procedimiento de análisis de estabilidad de taludes al procedimiento de planificación minera, pero carece de una metodología de análisis. Se sugiere como primer indicador clave, calcular el porcentaje de paredes cuyo FS se encuentra por sobre el criterio de aceptación. A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos en casos de ejemplo, con el objetivo de dar directrices para un método de análisis de los resultados.

6.2.2 Diseño de experimentos

6.2.2.1 Variación en el modelo de bloque planificado

De los resultados obtenidos al analizar diferentes modelos de bloques, sólo modificando el ángulo de planificación, presentados en la sección 6.2.2.1, se observa que:

- i. El factor de seguridad tiene una media de comportamiento variable y una desviación estándar considerable. Esto se explica con los gráficos de frecuencia para el FS y la altura de taludes, donde se observa que la presencia de taludes de menor altura está asociada a altos valores del FS. Esto genera un aumento en la media de los resultados.
- ii. Al observar la media, se confirma el patrón esperado: existe una disminución progresiva de los FS computados debido al aumento en el ángulo de talud.
- iii. Al observar las medias del ángulo de talud de las paredes analizadas, su valor se encuentra siempre por debajo del ángulo de planificación utilizado. Esto se encuentra asociado a la limitante geométrica del procedimiento de planificación, que no permite obtener ángulos exactos. Este resultado es positivo en dos aspectos: el primero, es que el software respeta, en promedio, el ángulo de planificación, sin sobrepasarlo, lo que corresponde a una respuesta conservadora a las limitantes geométricas, y segundo, es que entrega la posibilidad cierta, de aumentar el ángulo de talud durante la etapa de diseño minero.
- iv. Considerando la cantidad de trabajos en paralelos permitidos, con un máximo de 2 puntos evaluados simultáneamente por las componentes de DE-2 y DE-3 se obtiene un promedio de tiempo de trabajo, para cada pared, de 0,3 min. Este es costo computacional muy bajo y remarca las ventajas de la automatización de procesos.
- v. Respecto a los patrones de deformación, se revela la importancia de la geometría de la pared del talud. Para dos taludes de misma altura y ángulo de talud, pero diferente cantidad de bancos, se obtienen factores de seguridad considerablemente distintos. Se sugiere nuevamente la implementación de un proceso automatizado de diseño en dos dimensiones. Esto permitiría aumentar el FS computado de las paredes, al modificar la forma basada en bloques e incluir formas más estables.

6.2.2.2 Variación en las propiedades del material

Respecto a la variación de las propiedades de material en un rango de $\pm 15\%$, cuyos resultados se presentan en la sección 6.2.2.2, se cumple que:

- i. Las variaciones porcentuales del FS computado son de igual o de mayor magnitud que la variación porcentual de parámetros. Esto se encuentra en concordancia con los resultados obtenidos en experimentos anteriores, donde se destaca el impacto de los parámetros de resistencia sobre factor de seguridad.
- ii. Existe una variación significativa en el porcentaje de taludes cuyo FS es mayor al criterio de aceptabilidad. En particular, se observa una caída dramática del 81% al

31% en un caso pesimista y un aumento sobre el 90% para un caso optimista. Esto remarca, nuevamente, el impacto de la incertidumbre de las propiedades de los materiales analizados. Se sugiere estudiar la librería de propiedades de material disponibles en Abaqus, para identificar la posibilidad de mejorar la descripción del comportamiento de materiales geomecánicos durante el MRR.

6.2.3 Resultados visuales

El esquema gráfico mostrado en la Figura 5.4, en conjunto con el ejemplo de resultados mostrado en la Tabla 9.16, permiten entender en detalle el procedimiento interno realizado por el Modelo-B y cómo se logra caracterizar numéricamente la estabilidad de la explotación a través de una tabla de resultados. Esto invita a nuevos investigadores a mejorar el procedimiento realizado y extender su uso, por ejemplo, al análisis de estabilidad de los taludes de botaderos, considerando su espacialidad y temporalidad. Por último, con estos resultados, se comprueba que la automatización del análisis de taludes mineros ha sido ejecutada de forma exitosa.

7 Conclusiones

La realización de este proyecto nace de la necesidad de integrar las etapas de planificación minera, diseño minero y análisis de estabilidad de taludes que, a pesar de estar íntimamente relacionadas, hasta el día de hoy se siguen realizando por profesionales de diferente área y sin poseer indicadores claves en común. El nuevo procedimiento desarrollado en este trabajo, detallado en este informe, permite dar un primer paso para la futura integración completa del macroproceso que los relaciona.

El objetivo principal propuesto se cumple, considerando los alcances de este proyecto. Se logra generar un procedimiento de estabilidad de taludes mineros automatizado (acá denominado Modelo-B), el cual recibe como variable de entrada, los resultados de planificación. Esto abre la puerta a nuevas oportunidades en la planificación de minas a cielo abierto, ya que ahora es posible caracterizar la estabilidad de las paredes del rajo planeado, considerando la espacialidad y temporalidad de la explotación. Se destaca que el procedimiento desarrollado considera actualmente solo materiales homogéneos e isotrópos, lo que es una restricción fuerte respecto a su uso en la industria.

El procedimiento automatizado utiliza herramientas de diferentes softwares utilizados en el mercado actual. La metodología propuesta inicia incluyendo el modelo de bloques, obtenido de la etapa de planificación minera, caracteriza la geometría de la explotación con secciones en dos dimensiones a lo largo de toda la extensión espacial y temporal de la mina a cielo abierto, para posteriormente crear un modelo de elementos finitos de cada pared y caracterizar su estabilidad de forma numérica, a través de un factor de seguridad. Esto último, se realiza utilizando el método de reducción de la resistencia, de popularidad creciente en las últimas dos décadas. El modelo automatizado es apto para realizar análisis de sensibilidad, al modificar las variables de entrada.

Tras una serie de resultados obtenidos utilizando el Modelo-B se concluye lo siguiente:

- i. Es posible utilizar el procedimiento para caracterizar la estabilidad de diferentes modelos de bloques planificados, por ejemplo, modificando el ángulo de talud, en el proceso de planificación.
- ii. Es posible considerar incertidumbres en las propiedades de la roca. Para el caso de estudio se detecta una caída dramática del 81% al 31% de los taludes considerados estables, al reducir un 15% los parámetros de resistencia de la roca.
- iii. Al analizar resultados de planificación de Whittle, se observa que la media de los ángulos de talud de la mina planeada se encuentra por debajo del ángulo de talud de planificación, esto es auspicioso pues permitiría aumentar el ángulo de talud durante el proceso de diseño minero. Además, de existir taludes de menor altura que la media, estos se caracterizan por altos valores de factor de seguridad.
- iv. Existe un efecto importante en la geometría del talud. Al analizar dos paredes de la misma altura y ángulo de talud, pero diferente contorno, se detectan diferencias significativas en el factor de seguridad computado.

- v. La media del tiempo de trabajo requerido para analizar cada pared es menor a 0,2min. Esto representa un bajo costo computacional y permitiría analizar una gran cantidad de planes distintos, en corto tiempo.

Durante la elaboración de este procedimiento y siguiendo los objetivos metodológicos se genera un modelo automatizado inicial (acá denominado Modelo-A), para analizar taludes de pared lisa y propiedades homogéneas, utilizando el método de reducción de la resistencia, el cual recopila una serie de variables de entrada y variables de diseño identificadas durante la revisión bibliográfica. Tras realizar una serie de ensayos en el Modelo-A se concluye:

- i. El factor de seguridad computado varía considerablemente ante variaciones en las propiedades de material o parámetros geométricos del talud. Debido a esto, se destaca la necesidad de considerar las incertezas en estas variables, especialmente, en etapas de factibilidad de un proyecto minero.
- ii. Las variables de diseño tienen incidencia estadísticamente significativa sobre los resultados del método, por lo que las decisiones tomadas por cada usuario, al momento de implementar el método de reducción de la resistencia, afectan el factor de seguridad computado.
- iii. Debido a la gran cantidad de incertezas, donde se destaca el comportamiento errático del factor de seguridad ante variaciones en el ángulo de dilatación del terreno y las variaciones significativas al modificar la distribución, tipo y largo de los elementos finitos se recomienda fuertemente, realizar nuevos experimentos, y alimentar así, una gran base de datos que permite analizar el comportamiento del factor de seguridad, bajo diferentes condiciones de proceso.
- iv. Se presume una dependencia del efecto de las variables de diseño, con el valor de las variables de entrada del modelo. Se sugiere, al igual que el caso anterior, analizar el comportamiento de los parámetros del modelo, con mayor incidencia en los resultados, para una vasta cantidad de taludes, de diferentes dimensiones y calidades geotécnicas, con el fin de generar guías del correcto uso del método de reducción de la resistencia.
- v. El tiempo de trabajo también depende de las variables del proceso, como tendencia común, los resultados obtenidos sugieren un aumento en el tiempo de computo al disminuir la calidad geotécnica del terreno.

Las principales mejoras que deben considerarse en un futuro son:

- i. Incluir en el Modelo-B, un algoritmo de búsqueda de mínimos locales, el cual permita identificar preferencialmente las paredes de mayor altura y mayor riesgo de falla.
- ii. Integrar al procedimiento, un código que permita generar diseños mineros en dos dimensiones, y de esta forma, concretar la integración de los tres procedimientos: planificación, diseño y evaluación de estabilidad de taludes.
- iii. Considerar dentro de las propiedades de material, la presencia de heterogeneidades de la roca, las cuales no son consideradas en el modelo actual. Este punto es vital para la implementación de esta nueva metodología en la industria, pues en casos reales debe contemplarse la mayor cantidad de particularidades del macizo rocoso.

Finalmente, se destacan las ventajas de la automatización de procesos, que permiten computar el factor de seguridad de taludes mineros en menos de un minuto, y se invita a:

- i. Complementar y expandir el uso del procedimiento automatizado de análisis de taludes mineros.
- ii. Realizar nuevos experimentos que permitan generar una solución cerrada al análisis de estabilidad de taludes, utilizando el método de elementos finitos.

8 Bibliografía

- Abramson, L. W., S., L. T., Sunil, S., Boyce, & M., G. (2002). *Slope stability and stabilization methods. Segunda edición.* JHON WILEY & SONS, INC.
- Bishop, A. (1955). The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Géotechnique*, 7-17.
- Brady, B. H., & Brown, E. T. (2004). *Rock Mechanics for underground mining.* Dorrecht: Springer Science + Business Media, Inc.
- Burman, A., Acharya, S. P., Sahay, R., & Maity, D. (2015). A comparative study of slope stability analysis using traditional limit equilibrium. *Asian Journal of Civil Engineering*.
- C. Martinez, A. (1998). *Cálculo Estructural. Método de los Elementos Finitos.* Madrid: Publicaciones ETSI Aeronáuticos.
- Carranza-Torres, C., & Hormazabal, E. (2018). Computational tools for the determination of factor of safety and. *Slope Stability 2018.* Sevilla.
- Dassault Systèmes. (2008). *Getting Started with Abaqus. Interactive Edition. Version 6.8.* Estados Unidos: Dassault Systèmes.
- Dassault Systèmes. (2010). *Abaqus Analysis User's Manual. Version 6.10.* Estados Unidos: Dassault Systèmes.
- Dassault Systèmes. (2010). *Abaqus Keywords Reference Guide.* Estados Unidos: Dassault Systèmes.
- Dassault Systèmes. (2010). *Abaqus Theory Manual. Version 6.10.* Estados Unidos: Dassault Systèmes.
- Dassault Systèmes. (2018). *3D Experience Company.* Obtenido de <https://www.3ds.com/products-services/geovia/products/surpac/>
- Dassault Systèmes. (2018). *Isight User's Guide.* Dassault Systèmes.
- Davis, E. (1969). A discussion of theories of plasticity and limit analysis in relation to the failure of soil masses. *Journal of Terramechanics*.
- Duncan, J. (1996). State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 577-596.
- Dyson, A., & Tolooiyan, A. (2018). Optimisation of strength reduction finite element method codes. *Innovative Infrastructure Solutions*, 38-49.
- El-Ramly, H., Morgenstern, N., & Cruden, D. (2005). Probabilistic assessment of stability of a cut slope in residual soil. *Géotechnique*, 77-84.
- Gao, W., Wang, X., Dai, S., & Chen, D. (2016). Numerical Study on Stability of Rock Slope Based on. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-10.
- Geotechnik, D. G. (2014). *Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik - EANG.*
- Griffiths, D., & Lane, P. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, 387-403.
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos [3a ed.].* McGraw Hill.
- Hammah, R., Yacoub, T., & Corkum, B. (2005). The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown. *ARMA*.

- Ho, I.-H. (2014). Parametric studies of slope stability analyses using three-dimensional finite element technique: Geometric effect. *Journal of GeoEngineering*, 33-43.
- Itasca, C. G. (2012). *FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, V5.0*. Minneapolis: Itasca Consulting Group.
- Jana, A., Dey, A., & S, S. (2017). Stability Analysis of Rock Slope using Combined Continuum Inter face Element Method . *Indian Geotechnical Conference 2017 GeoNEst*. Guwahati.
- Jia, S.-p., Chen, W.-z., Yang, J.-p., & Chen, P.-s. (2010). An elastoplastic constitutive model based on modified Mohr-Coulomb criterion and its numerical implementation. *Rock and Soil Mechanics*.
- Kai, S., & Yin, L. (2012). Discussion of SRFEM with Mohr-Coulomb Plasticity Model in Slope Stability Analysis. *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. Shangai.
- Kolymbas, D., Fellin, W., Schneider-Muntau, B., Medicus, G., & Schranz, F. (2016). Zur Rolle der Materialmodelle beim Standsicherheitsnachweis. *geotechnik*, 89-97.
- Lin, H., & Cao, P. (2012). Influence of material dilation angle on stability of homogeneous slope with surcharge load. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* .
- Ministerio de minería. (2012). *Reglamento Cierre Faenas e Instalaciones Mineras*.
- Parra, A., Morales, N., Vallejos, J., & Nguyen, P. M. (2017). Open pit mine planning considering geomechanical fundamentals. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*, 1-18.
- Python. (2018). *Python TM*. Obtenido de <https://wiki.python.org/moin/BeginnersGuide/Overview>
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design*.
- Schneider-Muntau, B., Medicus, G., & Fellin, W. (2017). Strength reduction method in Barodesy. *Computers and Geotechnics*.
- SERNAGEOMIN, & PUCV, P. U. (2018). *Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes*.
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos volumen I. Análisis geotécnico*. Universidad Industrial de Santander.
- Tschuchnigg, F., Lyamin, A., Sloan, S., Schweiger, H., & Raissakis, I. (2015). Comparison of finite-element limit analysis and strength reduction. *Géotechnique*, 249-257.
- Tschuchnigg, F., Oberhollenzer, S., & Schweiger, H. (Junio de 2018). Slope stability analyses considering non-associated plasticity: Application to boundary value problem. *ce/papers*, 809-814.
- Tschuchnigg, F., Schweiger, H., & Sloan, S. (2015). Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part I: Numerical studies considering non-associated plasticity. *Computers and Geotechnics*.
- UPC, U. (24 de Noviembre de 2008). *UPCommons. Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC*. Recuperado el 22 de Diciembre de 2018, de UPCommons: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6529/05.pdf>
- Xiang, X., & Zi-Hang, D. (Marzo de 2017). Numerical implementation of a modified Mohr–Coulomb model and its application in slope stability analysis. *Springer-Verlag*, 25(1), 40-51.

- Yang, X., Yang, G., & Yu, T. Y. (2012). Comparison of Strength Reduction Method for Slope Stability Analysis. *Applied Mechanics and Materials* , 918-922.
- Yuan, S.-C., & Harrison, J. (2004). An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 679-686.
- Zienkiewicz, O., Humpheson, C., & Lewis, R. (1975). Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics. *Géotechnique*, 671-689.

9 Anexos

9.1 Características de Abaqus

9.1.1 Productos principales

9.1.1.1 Abaqus/Standard

Abaqus/Standard es un producto de simulación multi-propósito que puede resolver una amplia gama de problemas lineales y no-lineales incluyendo respuestas estáticas, dinámicas, termales y eléctricas de los componentes analizados. Este producto resuelve una serie de ecuaciones implícitas diferentes a las utilizadas en Abaqus/Explicit. En Abaqus/Estándar las fuerzas definidas en el modelo de análisis, son aplicadas sobre los componentes de manera incremental, es decir, el problema matemático se resuelve iterativamente considerando un porcentaje de las cargas hasta llegar a su valor total.

9.1.1.2 Abaqus/Explicit

Abaqus/Explicit es un producto pensado para propósitos específicos de análisis, los cuales pueden resolverse usando una formulación dinámica explícita de elementos finitos. Es adecuado para modelar eventos dinámicos breves, tales como problemas de impacto o estallidos y para modelar problemas fuertemente no-lineales, incluyendo cambios en las condiciones de contacto. A diferencia de Abaqus/Standard, no resuelve sistemas de ecuaciones considerando las cargas de forma incremental, si no que entrega una solución de avance en el tiempo (Dassault Systèmes, Getting Started with Abaqus. Interactive Edition. Version 6.8, 2008).

9.1.1.3 Abaqus/CAE

Abaqus/CAE (*Complete Abaqus Environment*) es un ambiente gráfico e interactivo para Abaqus. Permite crear modelos de forma simple y rápida; ya sea creando o importando la geometría de los componentes. Las propiedades de material pueden ser asignadas a cada geometría, en conjunto con cargas y condiciones de borde. Una vez un modelo se encuentra terminado, Abaqus/CAE puede entregar, monitorear y controlar el trabajo de análisis. El módulo de visualización puede ser utilizado para interpretar los resultados.

9.1.2 Etapas de un análisis en Abaqus

Un análisis completo en Abaqus usualmente consiste en tres etapas distintas: preprocesamiento, simulación y post-procesamiento. Estas tres etapas están relacionadas a través los archivos generados, como se muestra en la Figura 9.1.

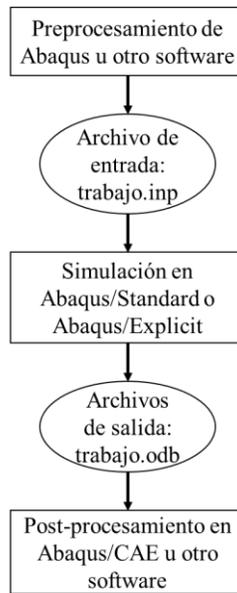


Figura 9.1: Etapas de un análisis típico en Abaqus. Tomada de la guía *Getting Started with Abaqus. Interactive Edition* (2008) elaborada por Dassault Systèmes.

Una breve reseña de estas etapas se presenta a continuación:

9.1.2.1 Preprocesamiento

Mediante el preprocesamiento se define un modelo de análisis, que representa el problema inicial, expresado en un archivo de entrada correspondiente a un archivo de texto cuya sintaxis se describe en la guía *Abaqus Keywords Reference Guide* (2010) elaborada por Dassault Systèmes. Este modelo es generalmente creado usando Abaqus/CAE, pero también puede ser generado utilizando otros softwares.

9.1.2.2 Simulación

Durante la simulación, Abaqus/Standard o Abaqus/Explicit resuelve numéricamente el modelo. Esta etapa ocurre generalmente como un proceso de fondo (en segundo plano) y entrega un archivo binario listo para ser post-procesado.

9.1.2.3 Post-procesamiento

El post-procesamiento corresponde a la evaluación de los resultados. Se realiza generalmente de forma interactiva utilizando el módulo de visualización de Abaqus/CAE. El módulo de visualización posee una variedad de opciones de despliegue de resultados.

9.1.3 Componentes de un modelo en Abaqus

En Abaqus un modelo está compuesto por una serie de componentes distintos, que juntos describen el problema físico a ser analizado y los resultados a ser obtenidos. Como mínimo un modelo contiene lo siguiente: geometría discretizada, tipo y propiedades de elementos, propiedades de material, cargas y condiciones de borde, tipo de análisis y requerimientos de

salida (Dassault Systèmes, Getting Started with Abaqus. Interactive Edition. Version 6.8, 2008). Una breve reseña de estos componentes se detalla a continuación:

9.1.3.1 Geometría discretizada

La geometría básica y discretizada de una estructura física, siendo modelada en Abaqus, se define en base a nodos y elementos finitos. Las coordenadas de los nodos y la conectividad de elementos (qué nodo corresponde a cada elemento) constituyen la geometría del modelo. La colección de nodos y elementos corresponde a la malla del modelo, la cual representa solo una aproximación de la geometría real a ser evaluada.

9.1.3.2 Tipo y propiedades de elementos

Abaqus posee una amplia gama de elementos, mucho de los cuales no se definen completamente solo con las coordenadas de sus nodos. Para algunos elementos es necesario definir información geométrica adicional descrita a continuación:

Cada elemento en Abaqus tiene un nombre único, por ejemplo: T2D2, S4R o C3D8I el cual queda definido por las cinco características de un elemento:

9.1.3.2.1 Familia

La Figura 9.2 muestra las familias de elementos más comunes utilizadas en análisis de esfuerzos. Una de las mayores diferencias entre las familias de elementos, es el tipo de geometría que cada familia asume.

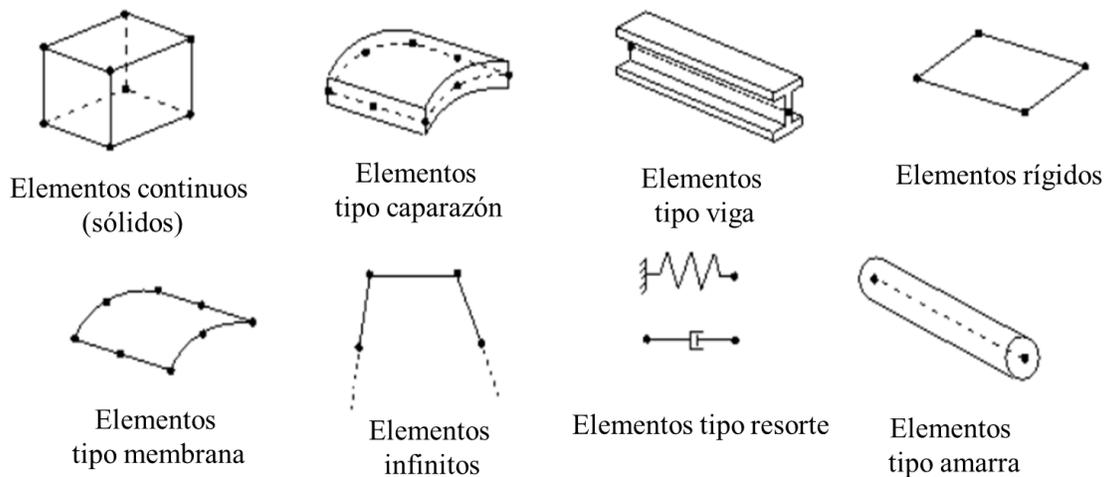


Figura 9.2: Familias de elementos de Abaqus.

9.1.3.2.2 Grados de libertad

Los grados de libertad son las variables fundamentales calculadas durante un análisis. Para una simulación de esfuerzos y deformación los grados de libertad son las traslaciones y rotaciones en cada nodo.

9.1.3.2.3 Número de nodos

Los nodos de un elemento corresponden al lugar en donde se calculan los grados de libertad. En cualquier otro punto de un elemento, los desplazamientos son obtenidos interpolando los desplazamientos nodales. Usualmente el orden de interpolación es determinado por el número de nodos de un elemento.

Elementos que tienen solo nodos en sus vértices, usan interpolación lineal en cada dirección y son comúnmente denominados como elementos lineales o de primer orden. Elementos que además poseen nodos intermedios usan una interpolación cuadrática y son denominados como elementos cuadráticos o de segundo orden.

9.1.3.2.4 Formulación

La formulación de un elemento hace referencia a la teoría matemática utilizada para definir el comportamiento de dicho elemento. Por lo general, dentro de Abaqus, todos los elementos están basados en una descripción de comportamiento de tipo Lagrangiano donde, el material asociado con un elemento permanece asociado a través del análisis y no puede fluir cruzando los bordes del elemento. En el caso alternativo, un enfoque de tipo Euleriano, los elementos se encuentran fijos en el espacio y el material fluye a través de ellos.

9.1.3.2.5 Integración

Abaqus usa técnicas numéricas para integrar varias cantidades sobre el volumen de cada elemento. Usando cuadratura Gaussiana por la mayoría de los elementos, Abaqus evalúa la respuesta del material sobre cada punto de integración, al integrar los términos polinomiales de la matriz de rigidez de cada elemento. Algunos elementos en Abaqus pueden usar integración completa o reducida, una elección que puede tener un efecto significativo sobre el resultado (Dassault Systèmes, Getting Started with Abaqus. Interactive Edition. Version 6.8, 2008).

Al utilizar integración completa, Abaqus usa dos o tres puntos de integración en cada dirección para elementos lineales o cuadráticos respectivamente. Al usar integración reducida, Abaqus utiliza un punto de integración menos respecto al caso de integración completa.

Los elementos lineales de integración reducida tienden a ser más flexibles porque sufren de un problema numérico conocido como “acinturado de avispa”¹ (Dassault Systèmes, Getting Started with Abaqus. Interactive Edition. Version 6.8, 2008).

9.1.3.3 Propiedades de material

Para todos los elementos del modelo es necesario definir propiedades de material. Si bien Abaqus presenta una amplia capacidad de información recibida, a menudo es difícil obtenerla en la realidad; debido a esto, la validez de los resultados es limitada por la calidad de los parámetros ingresados en esta sección.

¹ En inglés: *hourglassing*

9.1.3.4 Cargas y condiciones de borde

Al aplicar una carga sobre un material, se distorsiona su estructura física y, por lo tanto, se crean esfuerzos y deformaciones. Las condiciones de borde son utilizadas para restringir el desplazamiento en ciertas regiones del modelo o aplicar desplazamientos prescritos. En un análisis estático, es necesario definir condiciones de borde suficiente para evitar que el modelo se mueva como un cuerpo rígido, y generar una singularidad numérica en la matriz de rigidez. En modelos dinámicos, son las fuerzas de inercia las que detienen el modelo de moverse ilimitadamente.

9.1.3.5 Tipo/procedimiento de análisis

Abaqus puede llevar a cabo diferentes tipos de análisis, siendo las más comunes los análisis estáticos y dinámicos de esfuerzo. En análisis estáticos se obtiene la respuesta a largo plazo de una estructura sometida a esfuerzos, pero en otros casos la respuesta dinámica puede ser de interés, por ejemplo, el efecto de una carga aplicada repentinamente durante un impacto de componentes.

9.1.3.6 Requerimientos de salida

En Abaqus se puede requerir una amplia variedad de resultados de salida, según los requerimientos del usuario. Para evitar un uso excesivo de espacio en el disco, estos requerimientos suelen limitarse a las variables de interés, que permitan interpretar los resultados.

9.1.4 Otros conceptos asociados a Abaqus

9.1.4.1 Historial de la simulación/*Steps*

Un concepto básico en Abaqus es la división del historial del problema en *steps*. Un *step* es una fase conveniente del historial, donde ocurre un cambio en el problema, por ejemplo, la variación de la magnitud de una fuerza. Un *step* queda definido por un procedimiento/tipo de análisis, cargas y requerimiento de salida. El estado del modelo (esfuerzos, deformaciones, temperatura, etc.) es actualizado a través de todos los *steps*. Los efectos del historial previo son incluidos en la respuesta de cada nuevo *step*.

9.1.4.2 Incrementos

Un incremento es parte de un *step*. En análisis de tipo no lineal la carga total aplicada en un *step* es quebrada en pequeños incrementos de forma que la trayectoria no lineal pueda ser respetada.

En Abaqus/Standard el usuario debe sugerir el tamaño del primer incremento, y el software escoge el tamaño de los siguientes incrementos automáticamente. En Abaqus/Explicit el incremento por defecto es completamente automatizado y no requiere la intervención del usuario. Al final de cada incremento la estructura se encontrará en un estado (aproximado) de equilibrio.

Cuando se configura un *step*, deben definirse: periodo del *step* y la manera en que Abaqus dividirá este periodo en incrementos. El porcentaje de la carga aplicada en cada incremento

estará dado por la razón entre el valor de los incrementos acumulados y el periodo total del *step* como se describe en la Fórmula 9.1.

$$Carga\ aplicada_{incremento-i} = \frac{\sum_{j=1}^i incremento_j}{Periodo\ total\ del\ step}$$

Fórmula 9.1: Carga aplicada en cada *incremento* de un *step*.

Cuando se utiliza una incrementación automática, Abaqus empieza utilizando el valor ingresado por el usuario. El tamaño de los incrementos siguientes es ajustado en base a cuán rápido la solución es obtenida/converja (ver concepto de Iteración en 9.1.4.3).

Cuando se utiliza una incrementación fija, Abaqus usa el valor ingresado para el incremento inicial durante todo el *step*. Este tipo de incrementación puede prevenir la convergencia de la solución y no es recomendada (Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Manual. Version 6.10, 2010).

Al escoger una incrementación automática deben además definirse:

9.1.4.2.1 Máximo número de incrementos

Abaqus limita el número de incrementos en un *step*, considerando el valor ingresado por el usuario para este parámetro. Si el *step* excede este valor, el análisis se detiene. Por defecto Abaqus selecciona un valor máximo de cien incrementos.

9.1.4.2.2 Incremento inicial

Abaqus utiliza el valor del incremento inicial para el primer incremento del *step*.

9.1.4.2.3 Incremento mínimo

Si Abaqus necesita un incremento menor al ingresado en este parámetro, para alcanzar la convergencia de la solución, el análisis termina. El valor por defecto es de 10^{-5} veces el periodo del *step*.

9.1.4.2.4 Incremento máximo permitido

Abaqus no aumentará el tamaño de un incremento sobre este valor durante el análisis. Por defecto este valor corresponde al tiempo del *step*.

9.1.4.3 Iteración

Una iteración es un intento en encontrar la solución de equilibrio en cada incremento. Si el modelo no se encuentra en equilibrio al final de la iteración, Abaqus/Standard intenta con una nueva iteración acercándose progresivamente a una solución de equilibrio. Según sea el problema analizado, Abaqus requerirá una mayor o menor cantidad de iteraciones para resolver el problema numérico. Un incremento es completado una vez se obtiene el equilibrio.

9.1.4.4 Efecto de las no linealidades geométricas

Abaqus permite al usuario tomar en cuenta los efectos de no linealidad geométricas asociados a largos desplazamientos y deformaciones. Si los desplazamientos esperados/obtenidos son relativamente pequeños durante un *step*, estos efectos serían lo suficientemente pequeños para no ser considerados. Sin embargo, si los desplazamientos esperados/obtenidos son considerables, las no linealidades geométricas toman un rol importante en los resultados (Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Manual. Version 6.10, 2010).

Por defecto las *nlgeom* se encuentran activadas para Abaqus/Explicit y desactivadas para Abaqus/Standard. Una vez las no linealidades geométricas se activan en un *step*, se encontrarán activadas en todos los *steps* posteriores.

9.1.4.5 Convergencia

Existen numerosos parámetros de control asociados con la convergencia y los algoritmos de integración en Abaqus. Estos parámetros son asignados con valores por defecto que optimizan la exactitud y eficiencia de la solución (Dassault Systèmes, Abaqus Analysis User's Manual. Version 6.10, 2010) pero pueden ser modificados por el usuario.

La serie de parámetros asociada a la convergencia no será abordada en este informe, sin embargo, es necesario mencionar que existen, y que podrían afectar eventualmente el resultado obtenido por el método de reducción de la resistencia. Algunos de estos parámetros son conocidos dentro de Abaqus como: control residual, control de corrección de la solución, número de iteraciones de equilibrio, etc.

Los parámetros de incrementación descritos en la sección 9.1.4.2 sí serán considerados en el proceso de automatización, como parámetros que podrían afectar la convergencia de los resultados.

9.2 Terminología y herramientas de análisis de resultados asociadas a Isight

9.2.1 Experimento

Un experimento es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se realiza con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del resultado del sistema. Asimismo, el experimento permite aumentar el conocimiento acerca del sistema estudiado.

9.2.2 Factores estudiados

Son las variables que se investigan en el experimento, respecto de cómo influyen o afectan a las variables de respuesta. Los factores estudiados pueden ser controlables o no controlables.

9.2.3 Niveles y tratamientos

Los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño experimental se llaman niveles. La combinación de niveles de todos los factores estudiados se llama tratamiento o punto de diseño.

9.2.4 Error aleatorio

Siempre que se realiza un estudio experimental, parte de la variabilidad observada en la respuesta no se podrá explicar por los factores estudiados. Esto es, siempre habrá un remanente de variabilidad que se debe a causas comunes o aleatorias, que generan la variabilidad natural del proceso. Esta variabilidad constituye el llamado error aleatorio.

9.2.5 Diseño completamente al azar

Es el más simple de todos los diseños que se utilizan para comparar dos o más tratamientos, dado que solo se consideran dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio. Este diseño se llama completamente al azar (DCA) porque todas las corridas experimentales se realizan en orden aleatorio completo.

9.2.6 Análisis de varianza

El análisis de varianza (ANOVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento. En el caso del DCA, se separa la variabilidad debida a los tratamientos y la debida al error. Cuando la primera predomina sobre la segunda, es cuando se concluye que los tratamientos tienen efecto.

9.2.7 Diseño factorial

El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Por ejemplo, uno de los objetivos particulares que frecuentemente tiene un diseño factorial es determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor.

Los factores pueden ser de tipo cualitativo (máquinas, tipos de material, operador, la presencia o ausencia de una operación previa), o de tipo cuantitativo (temperatura, humedad, velocidad, presión, la cantidad de un cierto material, etc.). Para estudiar la manera en la que cada factor influye sobre la variable de respuesta, es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Con el diseño factorial completo se corren aleatoriamente todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles de los factores a investigar.

9.2.8 Matriz de diseño

La matriz de diseño o arreglo factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores.

9.2.9 Efecto de un factor

Es el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel en el factor. Se divide por efectos principales y efectos de interacción descritos a continuación.

9.2.9.1 Efecto principal

Los efectos principales son los cambios en la media de la variable de respuesta, debidos a la acción individual de cada factor. Es igual a la respuesta promedio observada en el nivel alto de un factor, menos la respuesta promedio en el nivel bajo.

9.2.9.2 Efecto de interacción

Dos factores interactúan entre sí o tienen un efecto de interacción sobre la variable de respuesta, cuando el efecto de un factor depende del nivel en el que se encuentra el otro. En un gráfico de interacción, cuando existe interacción entre factores, las líneas obtenidas tienen una pendiente muy diferente, y si no hay interacción las líneas tienen pendientes similares o son aproximadamente paralelas.

9.2.10 Tabla de ANOVA

Una tabla de ANOVA muestra los resultados de un análisis estadístico de varianza, calculado para las variables de respuesta del experimento. Cuando la técnica utilizada produce un diseño factorial completo la varianza total es dividida en la contribución de cada factor/interacción estudiada utilizando la técnica estándar de ANOVA. Si la varianza debido a un factor no es estadísticamente significativa (menor a la varianza debido al error), es agregada a la varianza del error. En la Tabla 9.1 se muestra el ejemplo de una tabla de ANOVA, obtenida en Isight, donde: DF, SS, V, F, SS', P y eAgrupado corresponden a los: grados de libertad, suma de cuadrados, varianza, estadístico-F, suma de cuadrados corregida, contribución porcentual y el error agrupado, respectivamente. Las letras A, B, C, D, E, F, G, H e I corresponden a los factores estudiados y A-B, C-D y C-E corresponden a la interacción entre dichos factores.

Tabla 9.1: Ejemplo de tabla de ANOVA de Isight.

	DF	SS	V	F	SS'	P(%)
A	1	1,21E-02	1,21E-02	6,05	0,01	0,06
B	1	3,82E-03	3,82E-03		AGRUPADO	
C	1	2,22E-01	2,22E-01	110,91	0,22	1,31
D	1	1,91E+00	1,91E+00	955,77	1,91	11,34
A-B	1	1,01E-02	1,01E-02	5,03	0,01	0,05
C-D	1	1,17E-06	1,17E-06		AGRUPADO	
E	1	4,42E-03	4,42E-03		AGRUPADO	
F	1	5,69E-05	5,69E-05		AGRUPADO	
G	1	1,88E-04	1,88E-04		AGRUPADO	
H	1	1,06E+01	1,06E+01	5271,19	10,56	62,61
C-E	1	5,58E-02	5,58E-02	27,85	0,05	0,32
I	2,036	4,08E+00	2,00E-03			
eAgrupado	5	8,49E-03				
eTotal	2,041	4,09E+00	2,00E-03			24,32
Total	2,047	1,69E+01	8,24E-03			100,00

9.2.11 Gráfico de efectos principales

Un gráfico de efectos principales muestra el efecto de un factor o set de factores en la respuesta del proceso al graficar su relación, determinada por un análisis de regresión. El usuario puede escoger un ajuste tipo continuo o por-intervalos. Un ajuste tipo continuo genera una curva suavizada al evaluar el polinomio del ajuste en numerosos puntos a lo largo

el rango del factor. Un ajuste por-intervalos muestra la unión de segmentos solo evaluado en los niveles exactos del factor.

9.2.12 Gráfico de Pareto

Un gráfico de Pareto muestra el efecto relativo de los factores en la variable de respuesta determinados mediante un análisis de regresión. En general los factores son listados basados el valor de su efecto, de forma decreciente. De esta forma, este gráfico puede ser utilizado para identificar qué factores/interacciones tienen un mayor impacto en la variable de respuesta.

El ranking de efectos presentado en un gráfico de Pareto es determinado ordenando los coeficientes escalados y normalizados de un ajuste polinomial de segundo orden de mínimos cuadrados estándar. Si existen al menos $(N+1) * (N+2) / 2$ tratamientos, donde N es el número de factores y cada factor tiene al menos tres niveles, un modelo polinomial de segundo orden completo es realizado, incluyendo todas las interacciones dobles. La cantidad mínima de tratamientos requerida es $(N+1)$, resultando en un ajuste polinomial lineal. Si el número de tratamientos se encuentra entre $(N+1)$ y $(N+1) * (N+2) / 2$, se realiza un ajuste polinomial de segundo orden parcial y los términos de interacción son agregados hasta que no queden grados de libertad disponibles.

Antes de ajustar el modelo polinomial, los factores son escalados a un rango entre -1 y 1 y el ajuste de mínimos cuadrados es realizado sobre estos factores. El escalamiento permite que las contribuciones puedan ser comparadas más equitativamente. Los coeficientes son normalizados al dividirlos por la suma de todos los coeficientes.

9.3 Detección de variables del procedimiento manual del Modelo-A

9.3.1 Geometría discretizada del talud

La geometría de cualquier talud queda descrita a partir de dos variables de entrada: altura del talud (H) y ángulo de talud (α), y por tres variables de diseño: w_d , w_i y h_b . Las variables de entrada dependen del talud analizado, y no son controladas. Las variables de diseño toman valores reales positivos.

Para discretizar la geometría se consideran dos tipos de distribución de los elementos finitos sobre el talud: $D1$ y $D2$ mostradas en la Figura 9.3. Para esto se define el factor del proceso denominado *geom_type* el cual posee dos niveles.

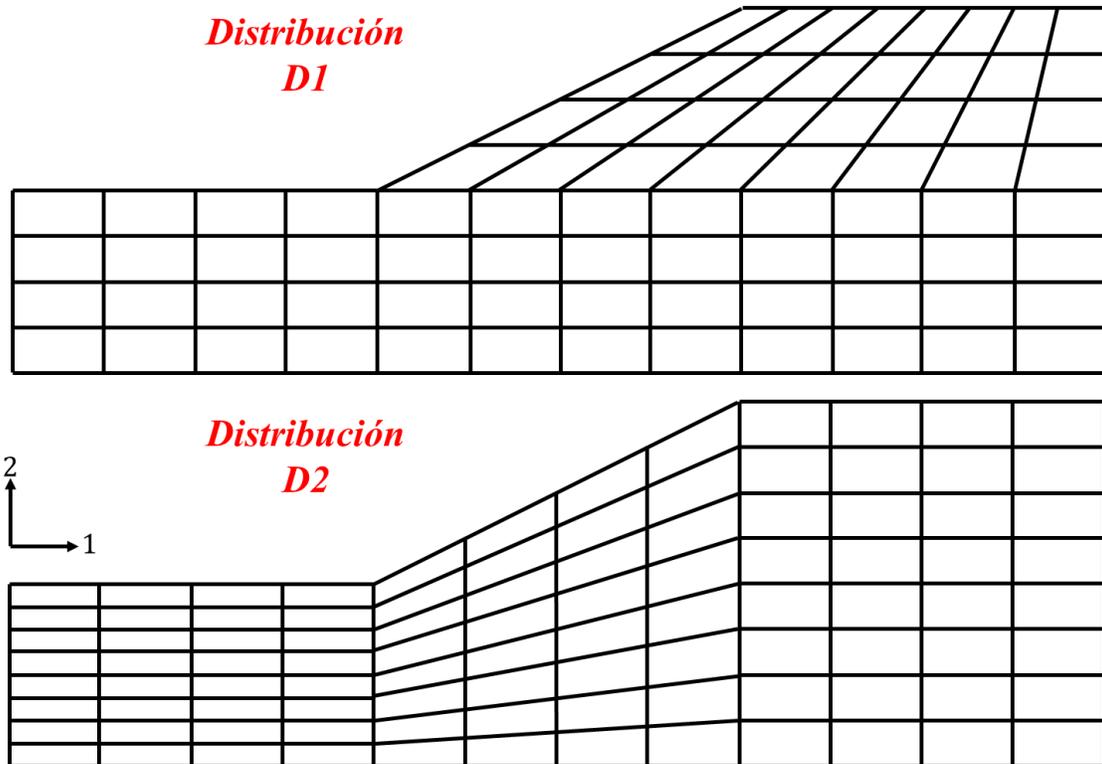


Figura 9.3: Tipos de distribución de los elementos considerados, para discretizar la geometría de talud analizada. Elaboración propia.

El tamaño máximo de los elementos en cada eje se considera proporcional a la altura del talud (H). Como se observa en la Figura 9.3, el largo de los elementos de la malla no es un valor único, por lo tanto, se controla el tamaño máximo que un elemento puede tomar en cualquier distribución. Este valor está dado para cada eje según la Fórmula 9.2, que considera dos condiciones de proceso: lx y ly , variables en el rango $(0,1)$. Esta relación se ejemplifica en la Figura 9.4.

$$\text{Tamaño máximo}_{\text{eje } 1} \leq lx * H$$

$$\text{Tamaño máximo}_{\text{eje } 2} \leq ly * H$$

Fórmula 9.2: Parámetros lx y ly controlan el tamaño máximo de los elementos.

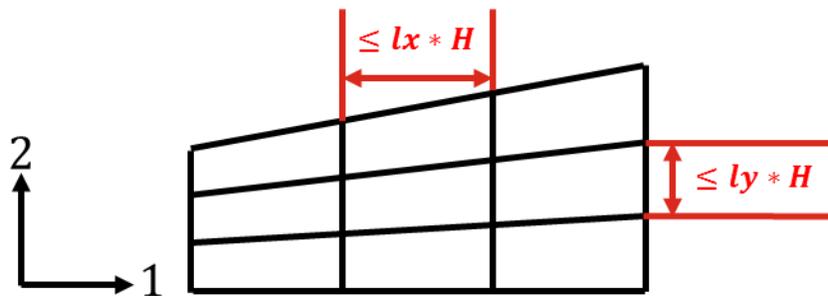


Figura 9.4: Variables de diseño lx y ly asociadas al tamaño máximo de los elementos en los ejes 1 y 2 respectivamente. Elaboración propia.

9.3.2 Tipo y propiedades de los elementos

Para este trabajo se consideran dos tipos de elementos: CPE4 y CPE4R mostrados en la Figura 9.5, controlados por el parámetro de diseño *elem_type* con dos niveles. La nomenclatura de estos elementos es la siguiente:

- C: elemento continuo.
- PE: familia de deformación plana.
- 4: poseen 4 nodos, en los vértices de un elemento de 4 lados. Corresponde a interpolación de primer orden.
- R: integración reducida, en su ausencia corresponde a integración completa.

Ambos niveles poseen dos grados de libertad, correspondientes a las traslaciones en cada eje.

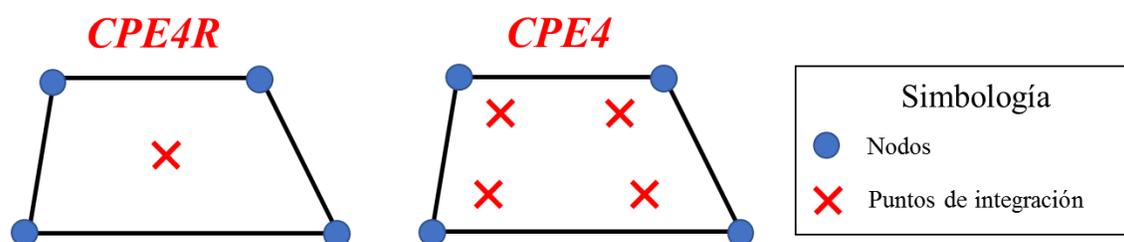


Figura 9.5: Tipos de elementos considerados expresados en la variable de diseño *elem_type* con dos niveles.

Basada en la guía *Isight User's Guide* (2018) elaborada por Dassault Systèmes.

9.3.3 Propiedades del material

En este proyecto se consideran terrenos: homogéneos, isotrópicos y drenados, que obedecen el criterio de falla de Mohr-Coulomb, caracterizados por su peso específico (γ) y sus propiedades elásticas: E , ν y plásticas c_0 , ϕ_0 , ψ_0 . Estas propiedades son variables de entrada no controlables, pues son características del material analizado y no parámetros del procedimiento adoptado.

En casos donde el ángulo de dilatación sea desconocido, su valor dependerá de la condición de proceso *dilatancy_angle*. Este parámetro toma valores en el rango (0,1) y permite obtener un ángulo de dilatación inicial según la Fórmula 9.3.

$$\psi_0 = dilatancy_angle * \phi_0$$

Fórmula 9.3: Parámetro de control del ángulo de dilatación, en casos de ser desconocido o no reportado.

9.3.4 Historial de simulación

El historial de simulación considerará el uso de al menos 2 *steps*: un *step* para alcanzar el equilibrio de la condición original del talud y un *step* para realizar la reducción de los parámetros de resistencia y obtener su factor de seguridad.

9.3.5 Procedimientos de análisis

Los dos *steps* antes mencionados serán considerados como procedimientos del tipo estático pues se busca conocer la respuesta a largo plazo del talud.

Se considerará el uso de un tercer *step*, al inicio de la simulación, como una variable de diseño, denominada *geostep_use*. Este parámetro es de tipo cualitativo, con dos niveles asociados al uso o ausencia de un *step* de tipo geoestático como punto de partida de la simulación. En la Figura 9.6 se muestra un esquema del historial de la simulación en base al tipo de análisis llevado a cabo en cada *step*.

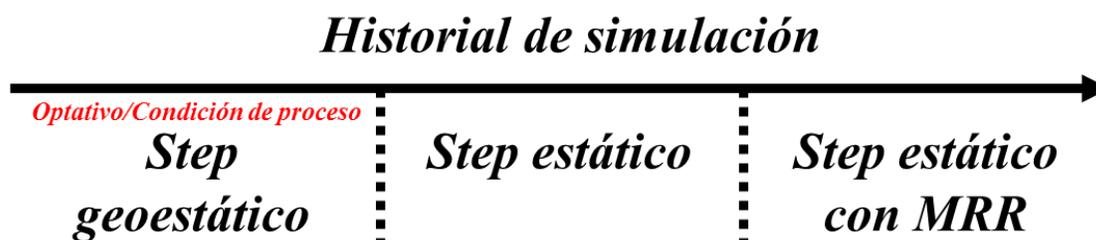


Figura 9.6: Historial de simulación y procedimientos de análisis. Elaboración propia.

9.3.5.1 Uso de no linealidades geométricas

Se considera el uso de no linealidades geométricas como un factor dentro del modelo. Este factor recibe el nombre de *nlgeom* y posee dos niveles asociados al uso o no-uso de esta herramienta. Esta decisión afecta el historial de simulación en su totalidad.

9.3.5.2 Fuerzas aplicadas y condiciones de borde

El modelo tradicional para el análisis de taludes considera sólo la fuerza gravitacional. Por lo tanto, esta fuerza es definida para todo el historial de simulación.

Respecto a las condiciones de borde, en la literatura existe consenso en el uso de las mismas restricciones de desplazamiento para el borde del modelo. Sin embargo, en este trabajado se consideran dos variables de diseño cualitativas: *bc_izq* y *bc_der* con dos niveles cada una: *tipo fijo* o *tipo rodillo*, asociados al borde izquierdo y derecho del modelo mostrados en la Figura 9.7, lo que permite analizar la importancia de utilizar condiciones de borde adecuadas en los modelos de taludes.

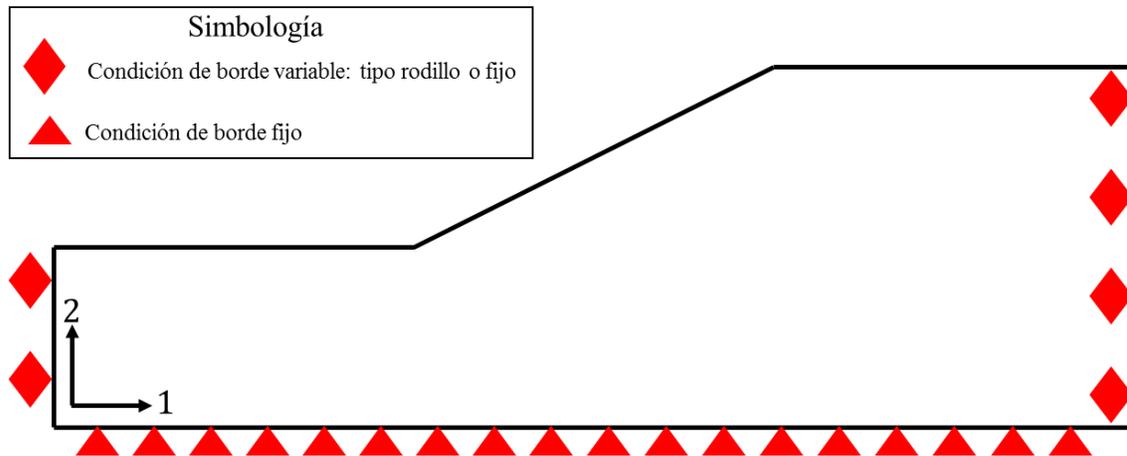


Figura 9.7: Condición de borde variable para los límites laterales del modelo. Elaboración propia.

9.3.5.3 Campo de esfuerzos in-situ inicial

El uso de un campo de esfuerzos inicial constituye la variable de diseño cualitativa denominada *fieldcond_use*, la cual posee dos niveles asociadas a su utilización o no-utilización.

9.3.5.4 Requerimientos de salida

Los requerimientos de salida son para todo evento los mismos: la magnitud de la deformación plástica equivalente y el valor de la variable de estado asociada al factor de reducción de la resistencia de prueba. En particular sus valores se solicitan en el punto de no convergencia de la solución, donde alcanzan su magnitud máxima. Se agregan por defecto las variables tradicionales de respuesta, para análisis de tipo esfuerzo-deformación: desplazamientos, esfuerzos y deformaciones.

9.3.5.5 Implementación del MRR

La implementación del MRR es controlada por dos variables de diseño: una asociada al modo de reducción de los parámetros de Mohr-Coulomb y otra asociada al modo de reducción del ángulo de dilatancia.

La tasa de reducción de los parámetros de Mohr-Coulomb es controlada por el parámetro cualitativo *matprop_optimized* con dos niveles: *tasa tradicional*, como es utilizada en Tschuchnigg, Oberhollenzer, & Schweiger (2018) o *tasa optimizada*, propuesta en el trabajo de Dyson & Tolooiyan (2018), ambas presentadas en la sección de Antecedentes.

La tasa de reducción del ángulo de dilatancia es controlada por el parámetro cualitativo *matprop_decrease* de dos niveles: en el primero, el ángulo de dilatancia se reduce a la misma tasa que los demás parámetros, sin importar su valor; y en el segundo, se reduce según las fórmulas descritas por Tschuchnigg, Lyamin, Sloan, Schweiger, & Raissakis (2015), en las cuales el ángulo de dilatancia se reduce solo cuando el ángulo de fricción reducido alcanza su valor, pasado este punto, ambos parámetros se reducen de forma simultánea.

Generan también nuevos parámetros del modelo, los valores iniciales y finales de la magnitud del SRF denominados como *srf_initial* y *srf_final* respectivamente, además de la cantidad de datos ingresados al software, en base a los cuales Abaqus genera curvas del comportamiento de los parámetros de resistencia, para diferentes valores del factor de reducción de prueba. El número de datos ingresados es controlado por el factor *step_srf*, que corresponde al espaciamiento entre valores de SRF consecutivos y obtenido mediante la Fórmula 9.4.

$$cantidad_{datos} = \frac{SRF_{final} - SRF_{inicial}}{step_srf} + 1$$

Fórmula 9.4: Espaciamiento de los datos ingresados asociados a el MRR.

9.3.6 Criterios de convergencia de los resultados

Se consideran como parámetros asociados a la convergencia los resultados del Modelo-1, el periodo de cada *step* denominado *time_steps* y sus incrementos: inicial, mínimo y máximo, denominados como *increment_initials*, *increment_minimums* y *increment_maximums*, donde el valor de *S* representa el nombre de cada *step*. Además, si se utiliza un *step* de tipo geostático se añade el parámetro asociado al desplazamiento máximo permitido durante este procedimiento de análisis denominado *max_displacement_geo*.

9.4 Resultados del Modelo-A

En lo siguiente se entregan: gráficos de Pareto, gráficos de efectos principales, gráficos de interacción y tablas de ANOVA obtenidos en el estudio de incertidumbre de los parámetros de entrada y de los parámetros de diseño, en conjunto con los resultados visuales para el Modelo-A.

Se presentan dos gráficos de Pareto distintos: el primero se obtiene utilizando un análisis de regresión lineal para captar solo los efectos principales de los factores y el segundo muestra los resultados utilizando una regresión cuadrática.

Para el gráfico de efectos principales, de ser necesario por motivos de visualización, se presenta primero solo el comportamiento de los efectos más significativos o relevantes para el análisis (denominado gráfico de efectos principales-A), y posteriormente se presentan el resto de los efectos menos significativos en un segundo gráfico (denominado gráfico de efectos principales-B). Se entregan gráficos de interacción solo de ser pertinente, en el caso que existan efectos de interacción importantes.

9.4.1 Incertidumbre en las variables de entrada

9.4.1.1 Modelo de suelo

El experimento de incertidumbre de las variables de entrada para el modelo de suelo consta de 2.187 tratamientos, llevados a cabo en paralelo, con un máximo de 5 puntos de diseño evaluados simultáneamente por la componente de diseño de experimentos. En la Tabla 9.2 se presenta el tiempo de trabajo de cada componente del Modelo-A. El trabajo se completa en 8,6hr, de las cuales 8,4hr corresponden al trabajo realizado por la componente Abaqus. Los gráficos de Pareto, el gráfico de efectos principales y gráficos de interacción se muestran

en los Gráfico 9.1 y Gráfico 9.2, Gráfico 9.3 y Gráfico 9.4, Gráfico 9.5 y Gráfico 9.6 respectivamente.

Tabla 9.2: Tiempo de trabajo del Modelo-A para la evaluación de la incertidumbre en las variables de entrada, en el talud de suelo.

Componente	Cuenta	Mínimo	Máximo	Media	Tiempo total
DE	1	08:38:05	08:38:06	08:38:07	08:38:07
Simcode	2187	00:00:00	00:00:22	00:00:01	00:53:37
Abaqus	2187	00:00:20	00:14:00	00:01:09	1día 17:59:24

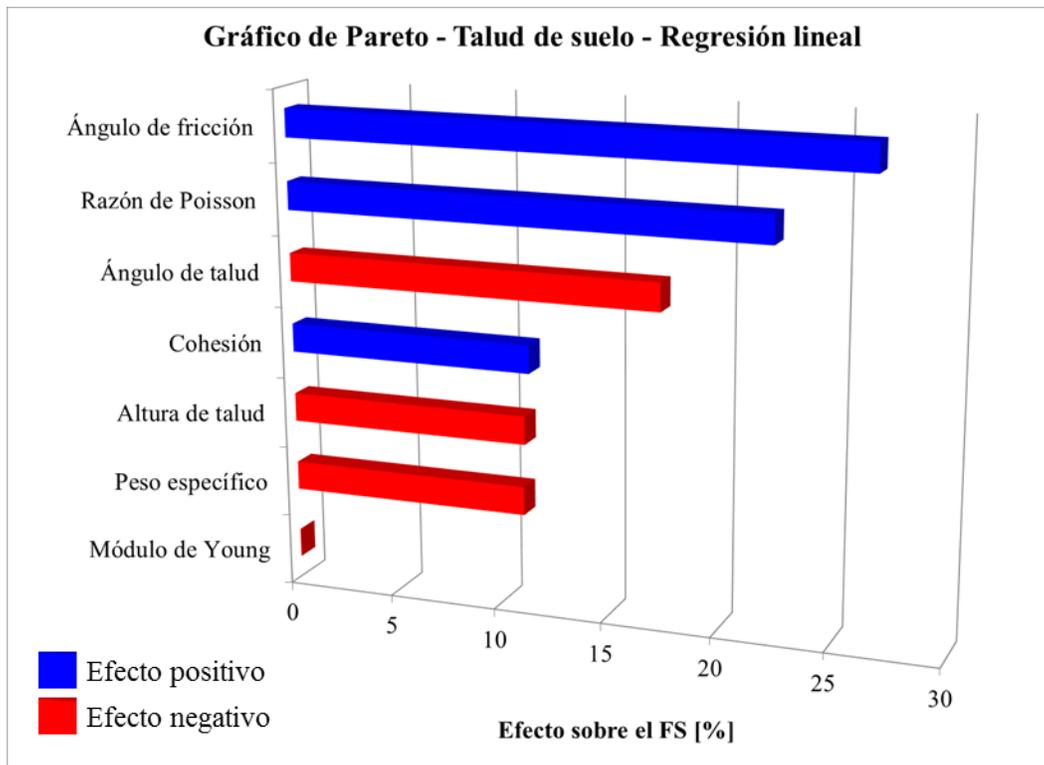


Gráfico 9.1: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.

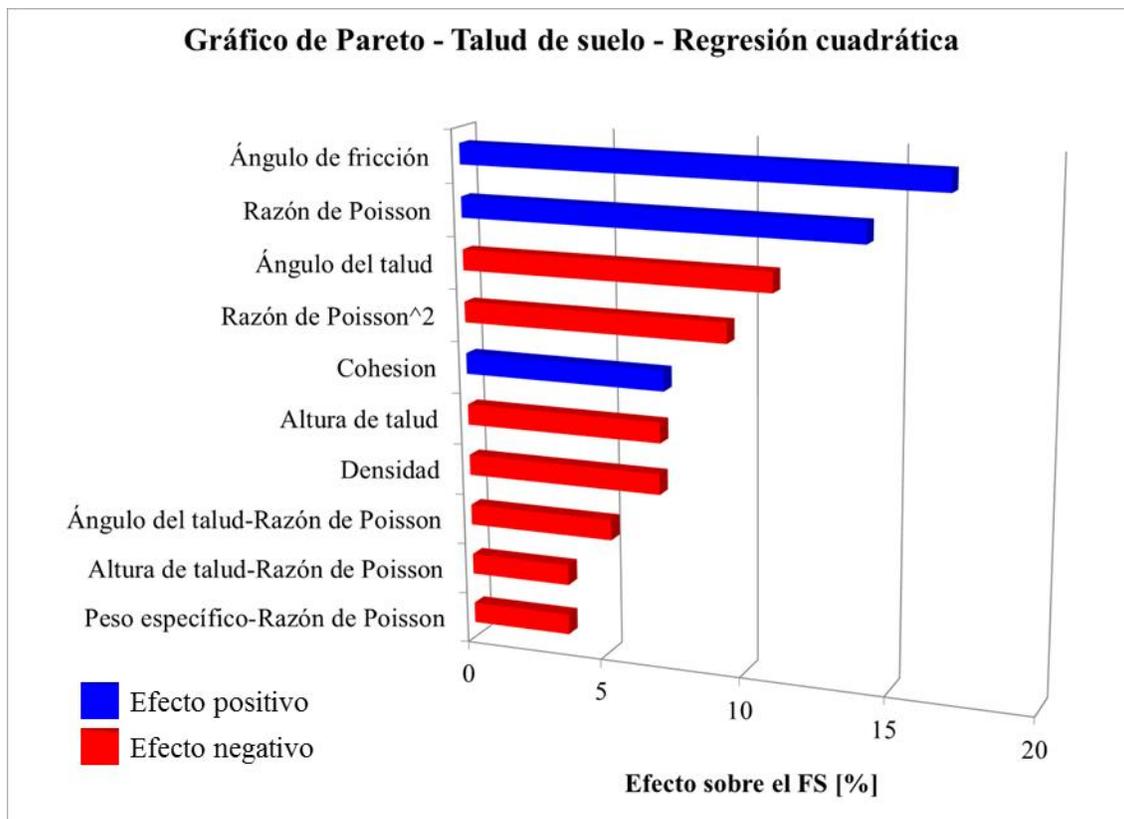


Gráfico 9.2: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática, para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.

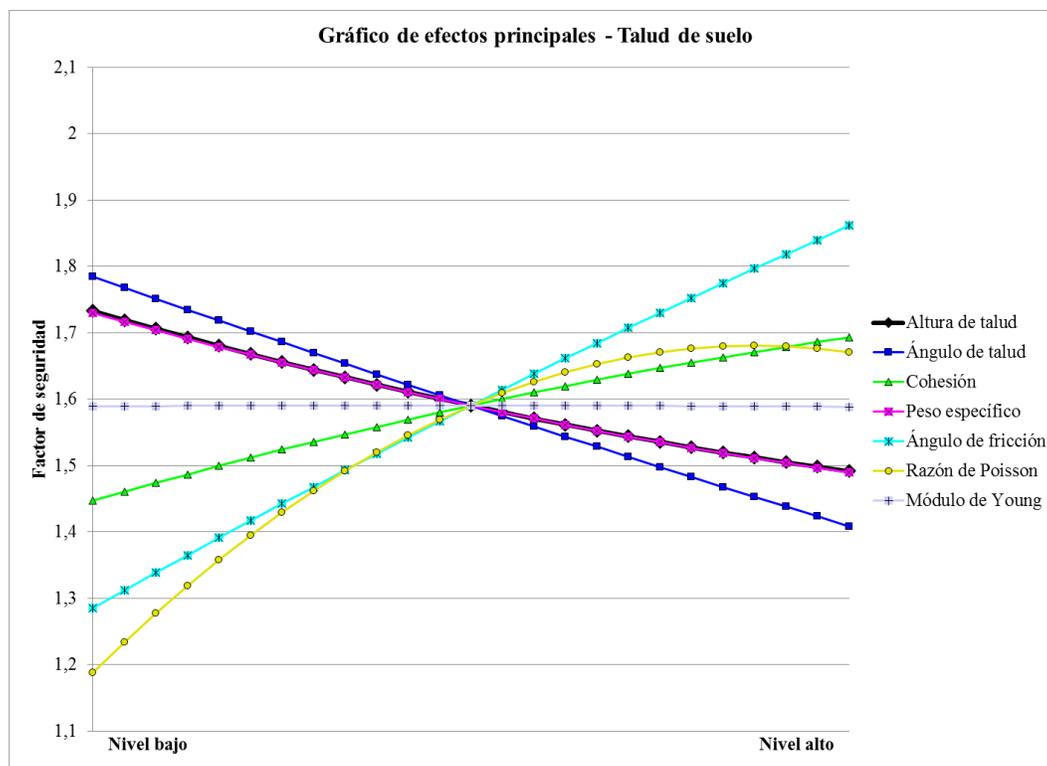


Gráfico 9.3: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.

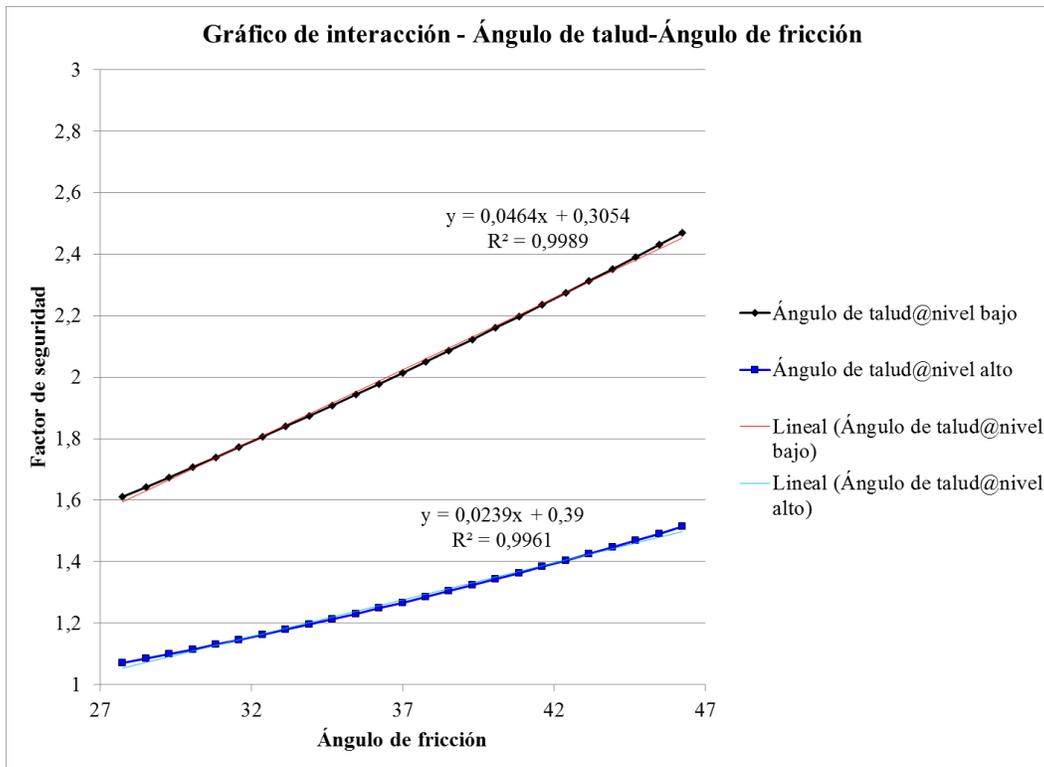


Gráfico 9.4: Gráfico de interacción ángulo de talud-ángulo de fricción, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.

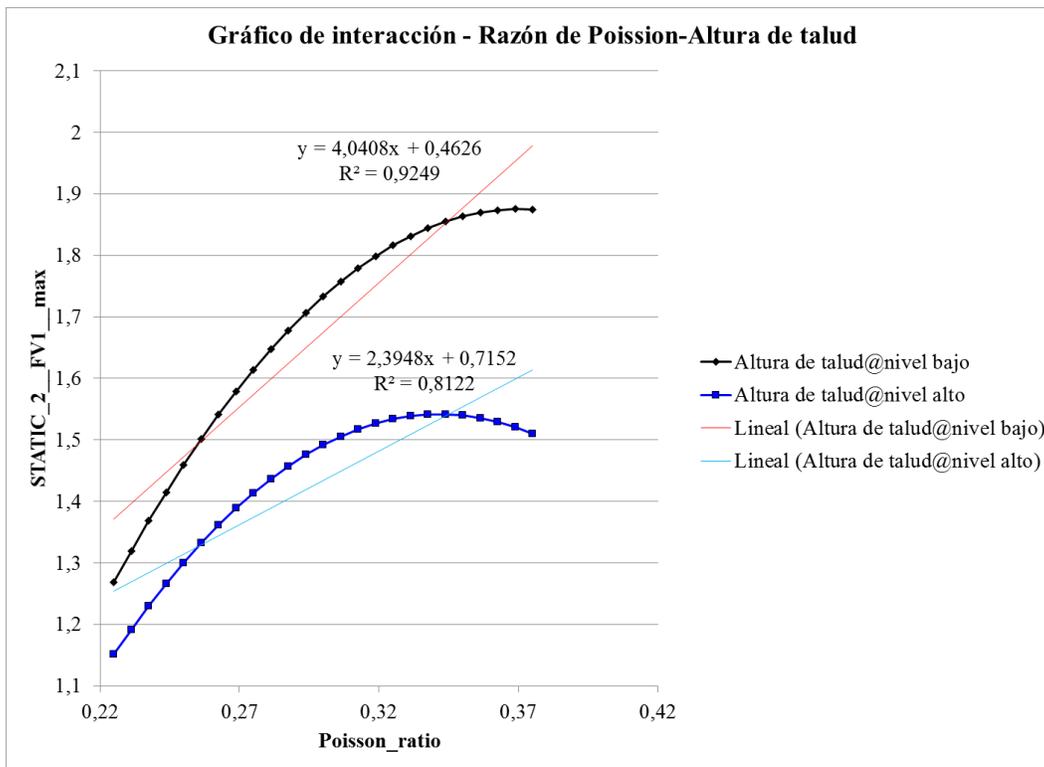


Gráfico 9.5: Gráfico de interacción razón de Poisson-altura de talud, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.

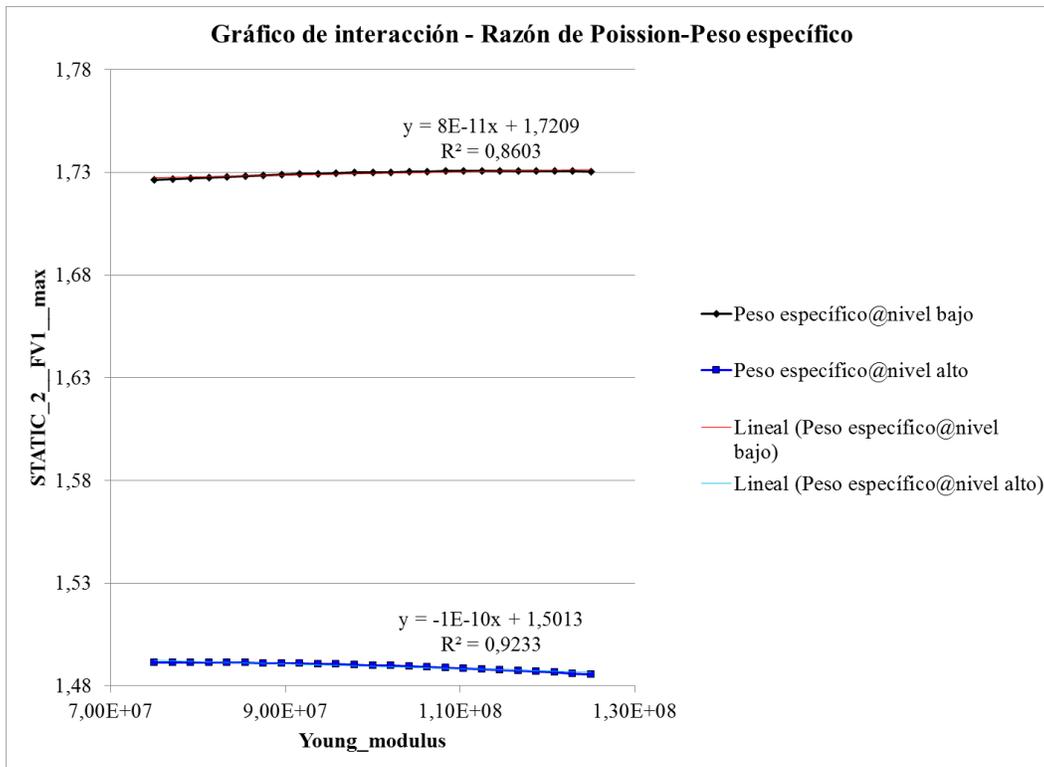


Gráfico 9.6: Gráfico de interacción razón de Poisson-peso específico, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de suelo.

9.4.1.2 Modelo de roca

El experimento de incertidumbre de las variables de entrada para el modelo de roca consta de 2.187 tratamientos, llevados a cabo en paralelo, con un máximo de 5 puntos de diseño evaluados simultáneamente por la componente de diseño de experimentos. En la Tabla 9.3 se presenta el tiempo de trabajo de cada componente del Modelo-A. El trabajo se completa en 3,4hr de las cuales 3,3hr corresponden al trabajo realizado por la componente Abaqus. Los gráficos de Pareto, el gráfico de efectos principales y gráficos de interacción se muestran en los Gráfico 9.7 y Gráfico 9.8, Gráfico 9.9 y Gráfico 9.10 y Gráfico 9.11 respectivamente.

Tabla 9.3: Tiempo de trabajo del Modelo-A para la evaluación de la incertidumbre en las variables de entrada, en el talud de roca.

Componente	Cuenta	Mínimo	Máximo	Media	Tiempo total
DE	1	03:26:09	03:26:10	03:26:11	03:26:12
Simcode	2187	00:00:00	00:00:10	00:00:00	00:53:37
Abaqus	2187	00:00:11	00:03:22	00:00:27	16:31:06

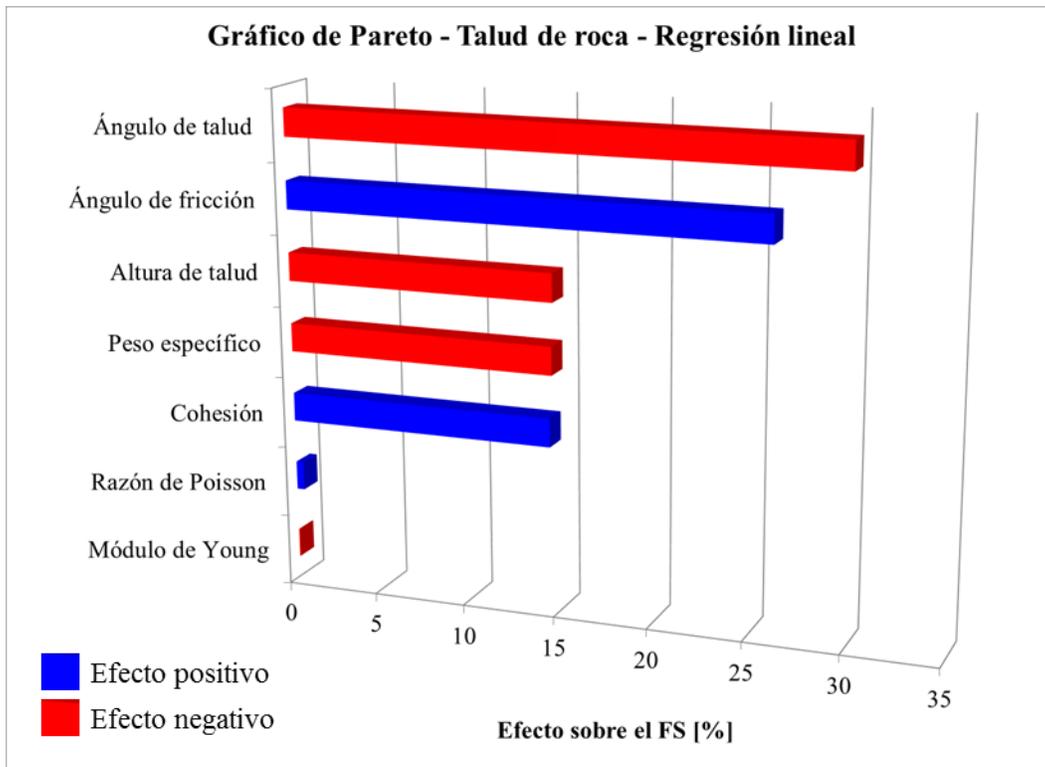


Gráfico 9.7: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de roca.

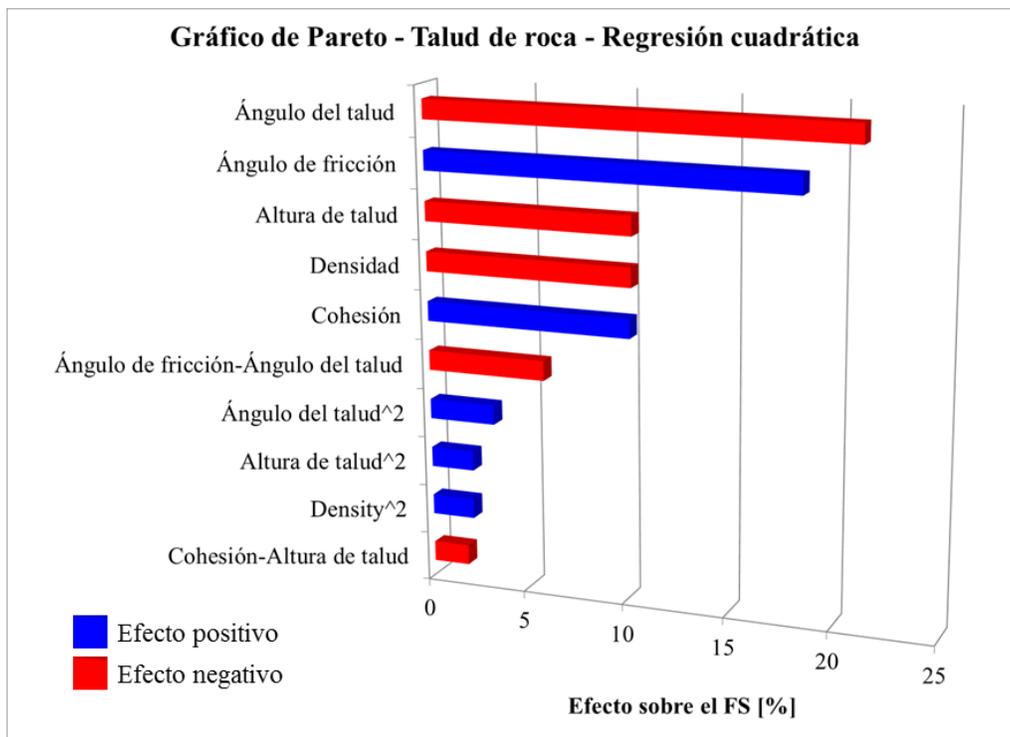


Gráfico 9.8: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática, para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de roca.

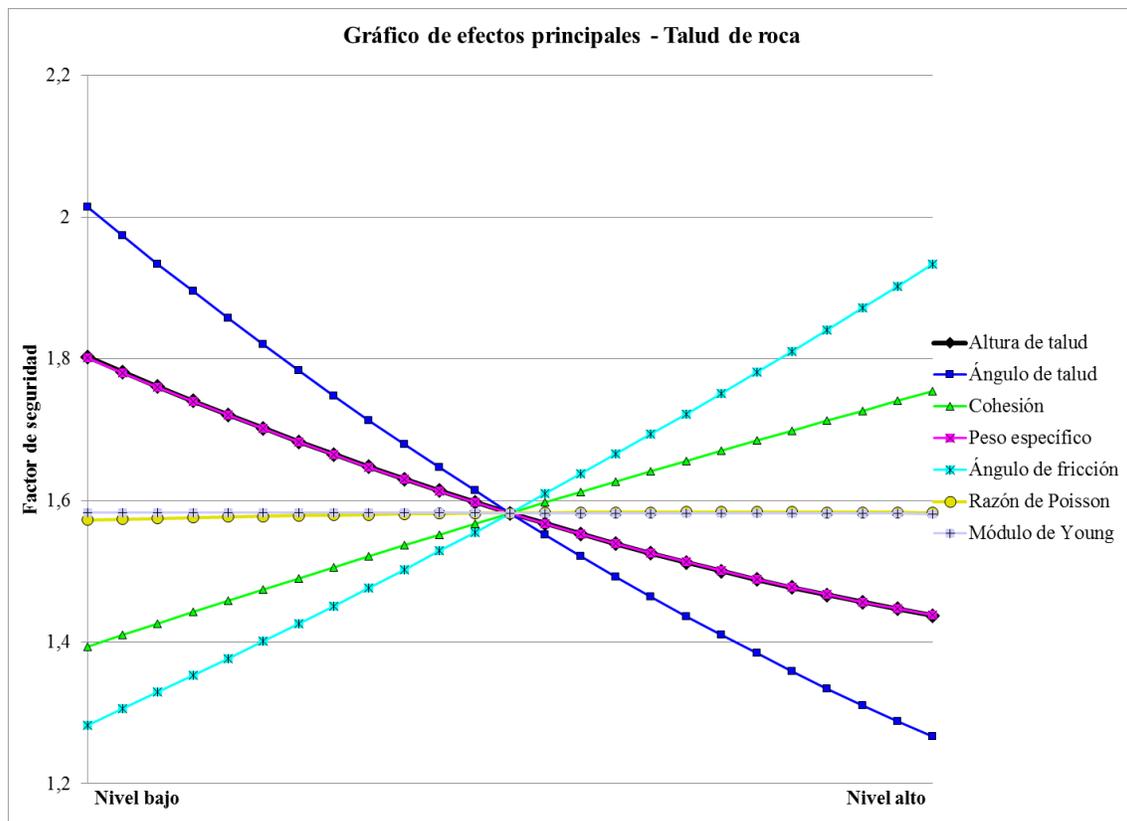


Gráfico 9.9: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de roca.

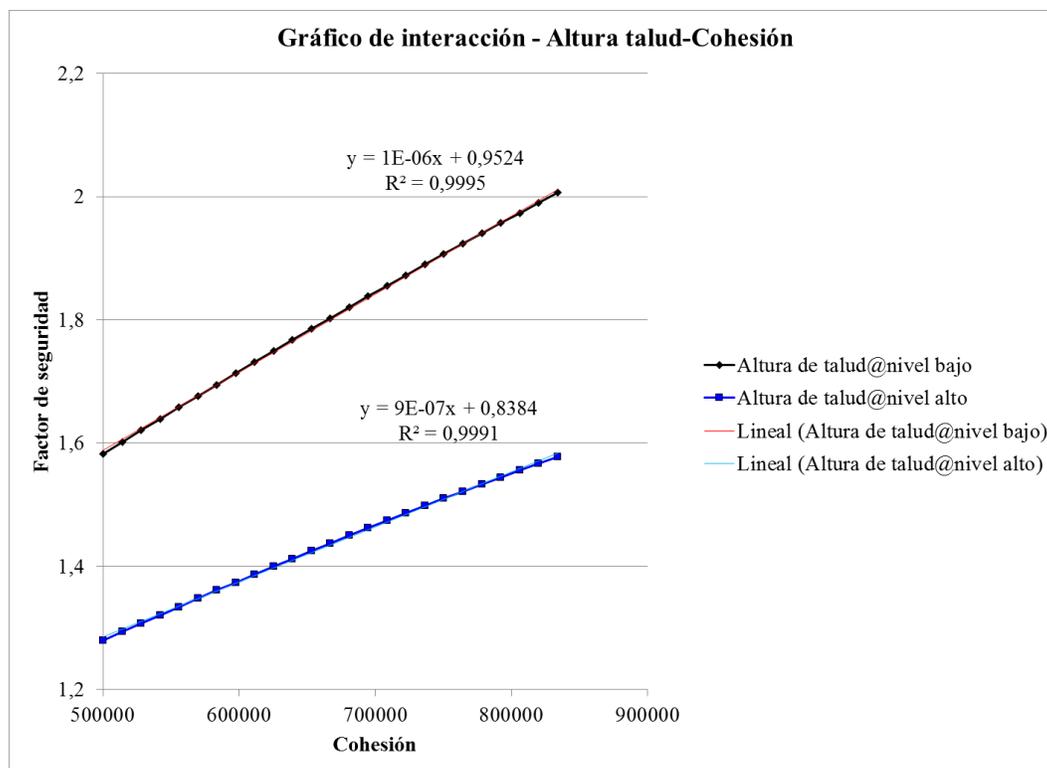


Gráfico 9.10: Gráfico de interacción altura de talud-cohesión, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de roca.

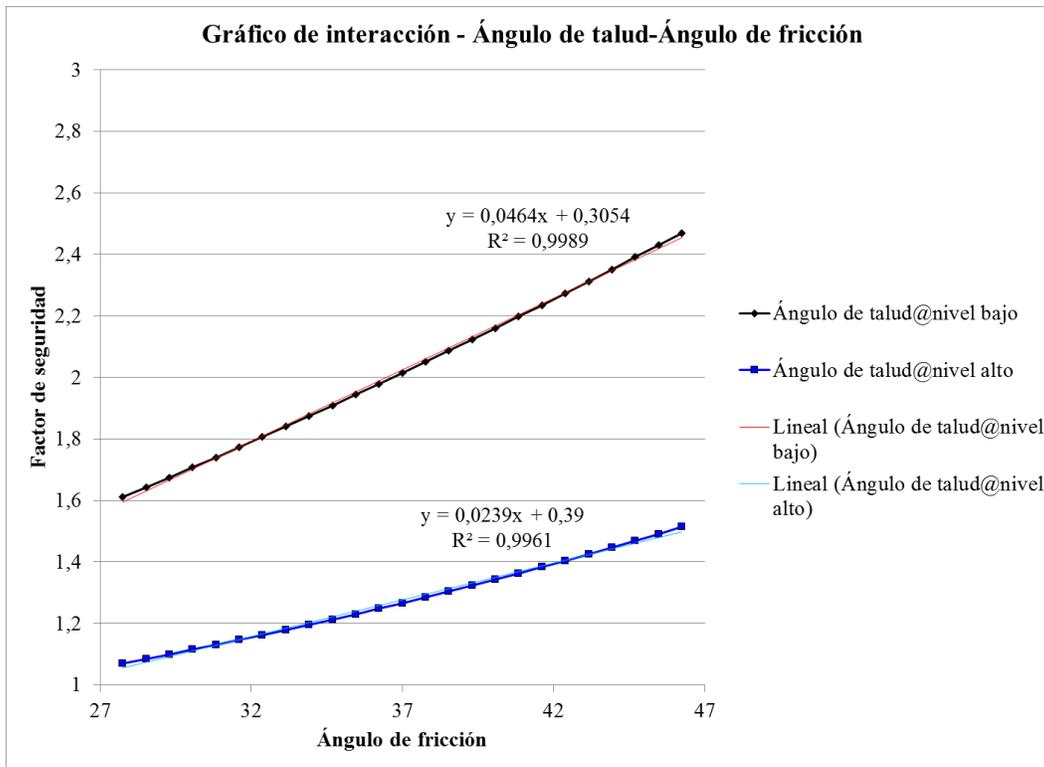


Gráfico 9.11: Gráfico de interacción ángulo de talud-ángulo de fricción, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de entrada del Modelo-A, en el talud de roca.

9.4.2 Incertidumbre en las variables de diseño

En esta sección, en los gráficos de efectos principales, las variables cualitativas tienen dos niveles: bajo y alto que corresponden a los niveles de la izquierda y derecha mostrados en las Tabla 4.3 y Tabla 4.4,

9.4.2.1 Experimento-A

El experimento-A, elaborado para evaluar la incertidumbre de 11 condiciones de diseño del Modelo-A consta de 2.048 tratamientos, llevados a cabo en paralelo, con un máximo de 4 puntos de diseño evaluados simultáneamente por la componente de diseño de experimentos. En este experimento las variables cuantitativas se varían $\pm 25\%$ respecto a valores típicos utilizados y todas las variables cualitativas poseen dos niveles.

9.4.2.1.1 Modelo de suelo

En la Tabla 9.4 se presenta el tiempo de trabajo de cada componente del Modelo-A. El trabajo se completa en 21,2hr, de las cuales 21hr corresponden al trabajo realizado por la componente Abaqus. Los gráficos de Pareto, los gráficos de efectos principales, gráficos de interacción y tabla de ANOVA se muestran en los Gráfico 9.12 y Gráfico 9.13, Gráfico 9.14 y Gráfico 9.15, Gráfico 9.16 y Gráfico 9.17 y Tabla 9.5 respectivamente.

Tabla 9.4: Tiempo de trabajo del Modelo-A para el experimento-A en el talud de suelo

Componente	Cuenta	Mínimo	Máximo	Media	Tiempo total
DE	1	21:11:36	21:11:37	21:11:38	21:11:39
Simcode	2048	00:00:00	00:00:04	00:00:01	00:53:37
Abaqus	2048	00:00:24	00:27:10	00:02:27	3días 11:54:33

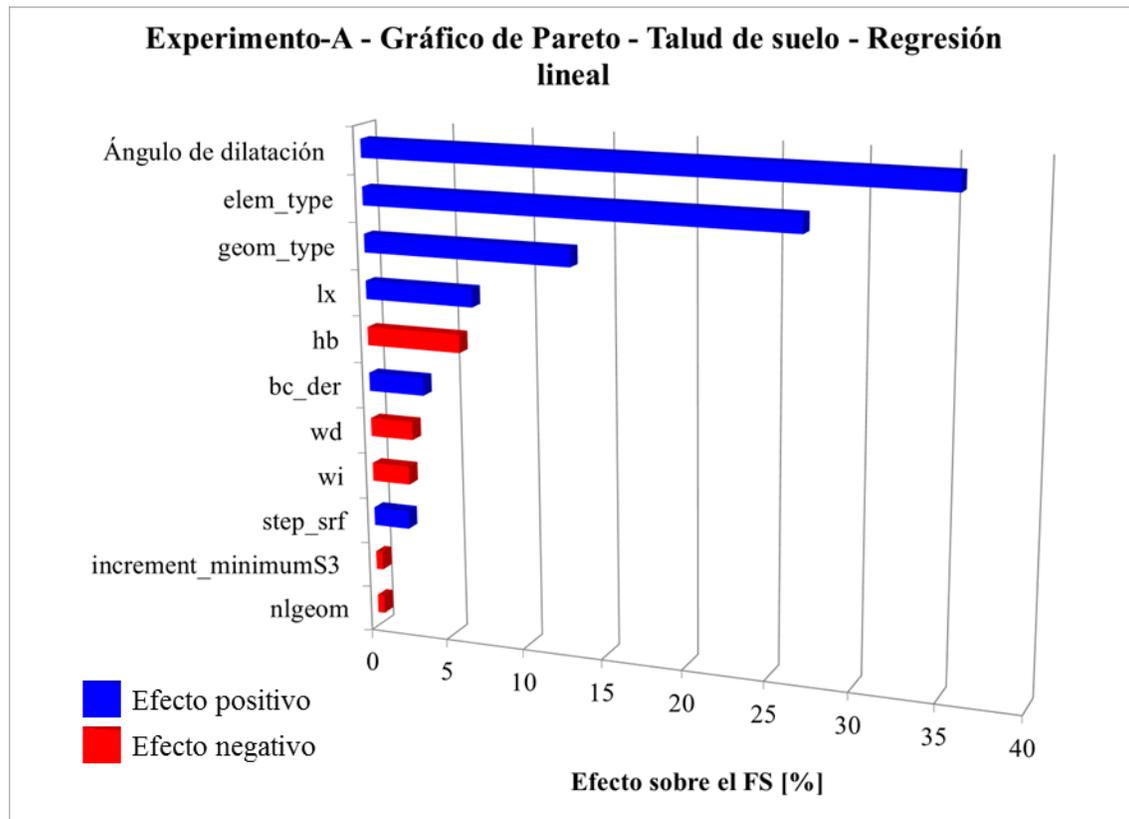


Gráfico 9.12: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.

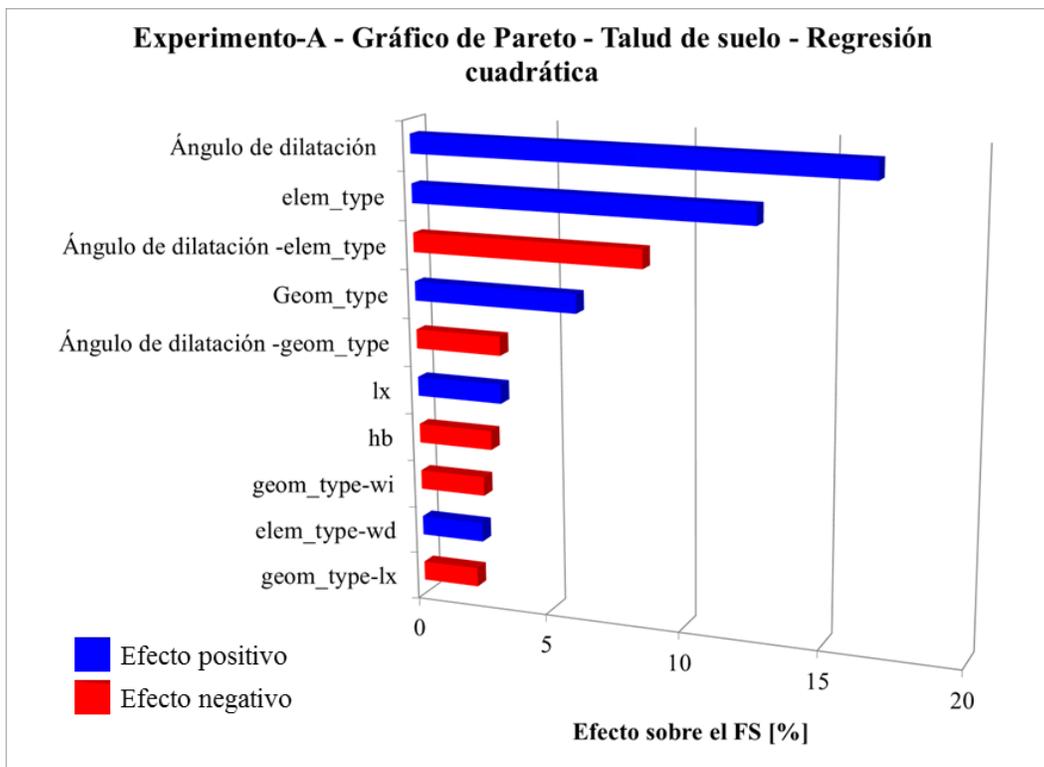


Gráfico 9.13: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.

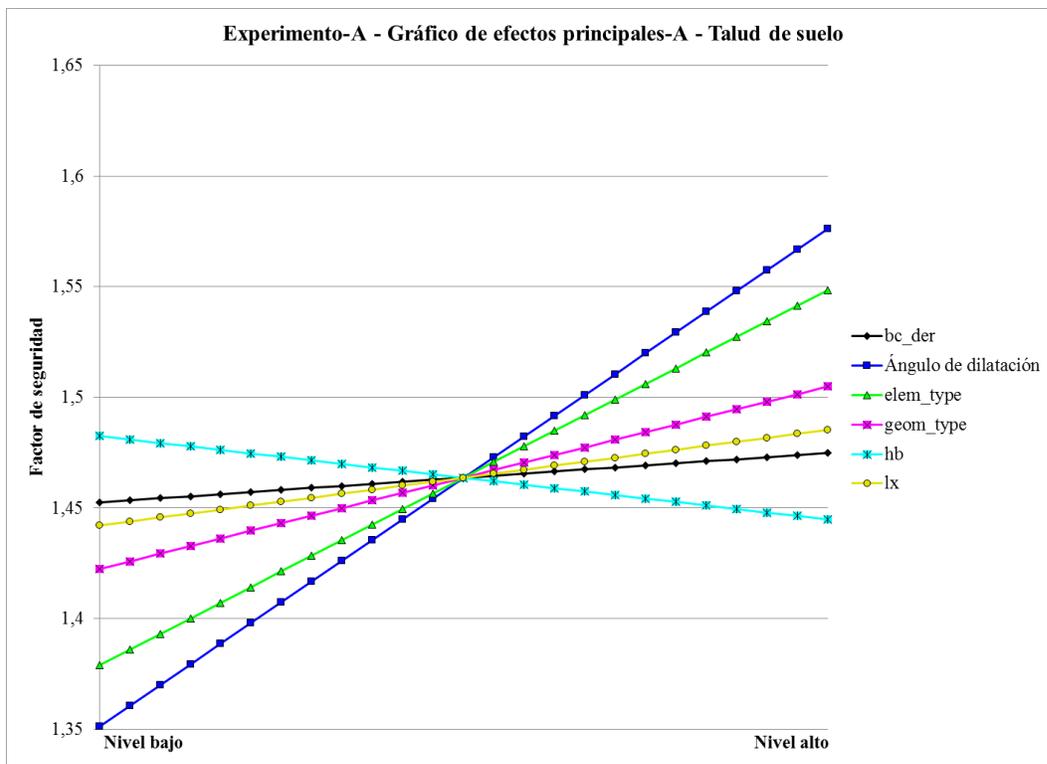


Gráfico 9.14: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.

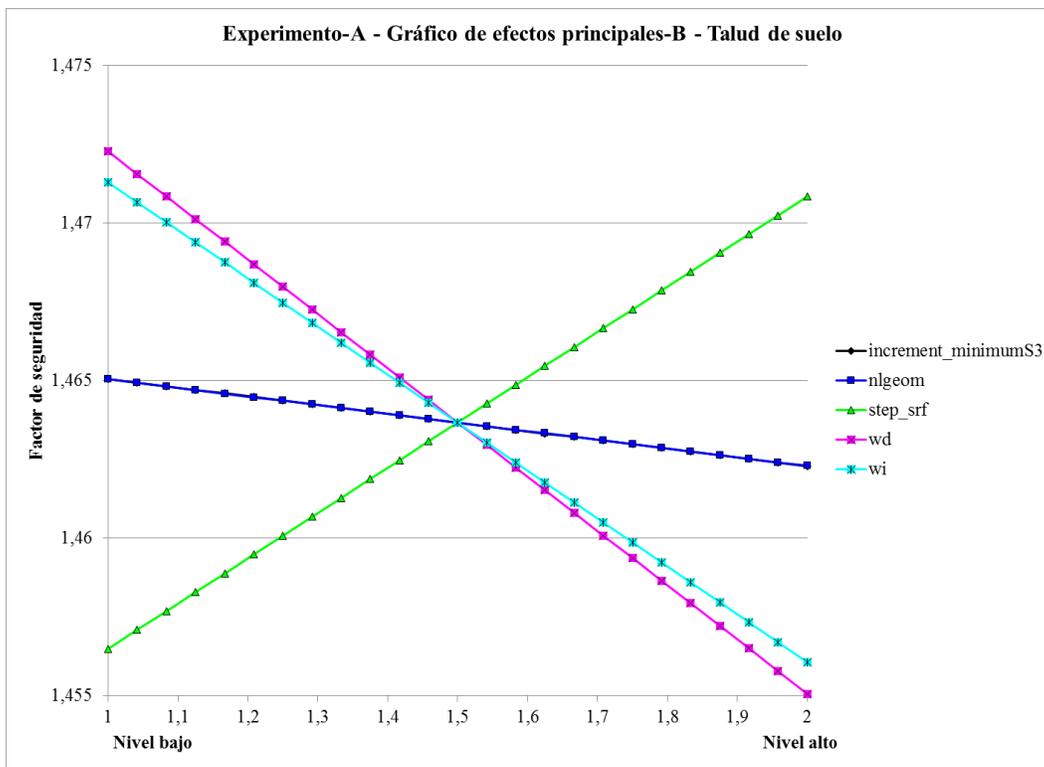


Gráfico 9.15: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo. Segunda parte.

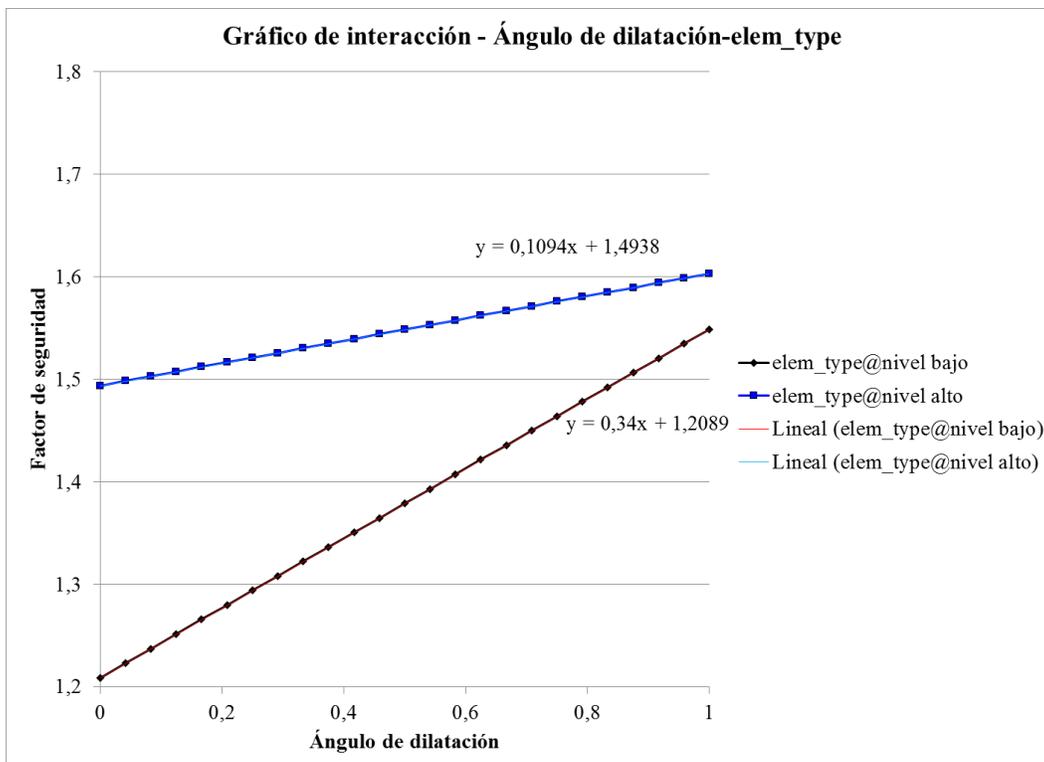


Gráfico 9.16: Gráfico de interacción ángulo de dilatación-*elem_type*, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.

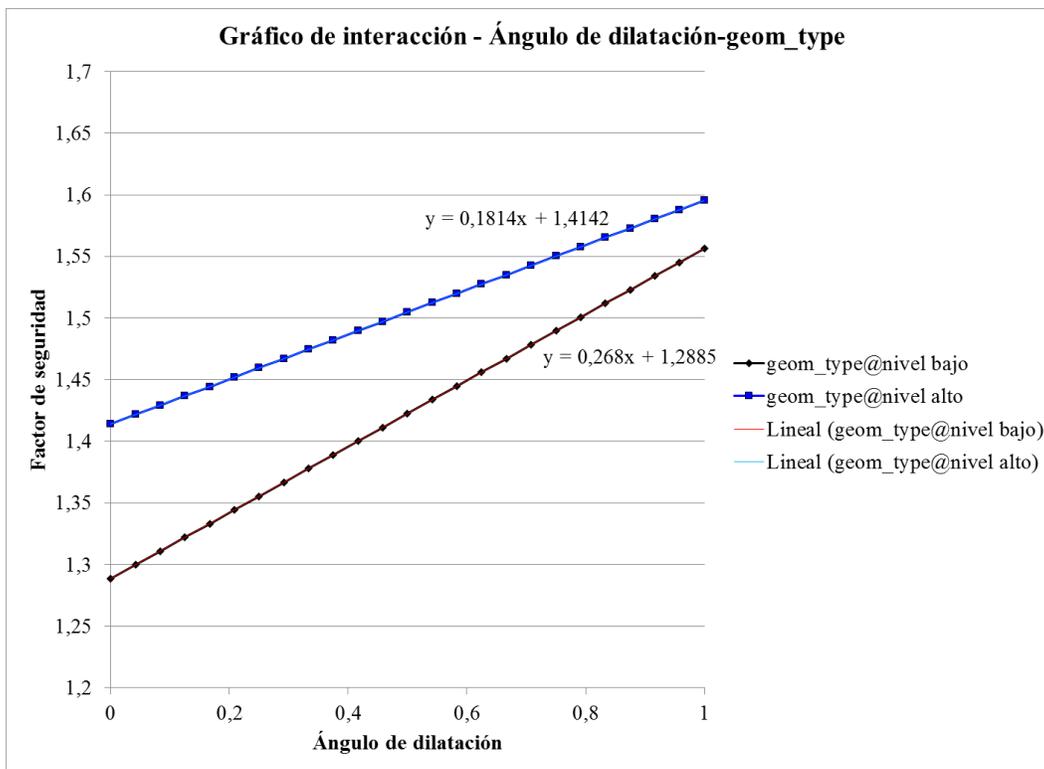


Gráfico 9.17: Gráfico de interacción ángulo de dilatación-geom_type, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.

Tabla 9.5: Tabla de ANOVA para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de suelo.

	DF	SS	V	F	SS'	P(%)
Total	2.047	9,13E+01	4,46E-02			100,00
eTotal	2.038	4,49E+01	2,20E-02			49,42
Ángulo de dilatación	1	2,59E+01	2,59E+01	1173,40	25,83	28,30
elem_type	1	1,47E+01	1,47E+01	668,27	14,70	16,11
elem_type	1	3,47E+00	3,47E+00	157,58	3,45	3,78
lx	1	9,56E-01	9,56E-01	43,40	0,93	1,02
hb	1	7,25E-01	7,25E-01	32,90	0,70	0,77
bc_der	1	2,54E-01	2,54E-01	11,53	0,23	0,25
wd	1	1,52E-01	1,52E-01	6,89	0,13	0,14
wi	1	1,19E-01	1,19E-01	5,39	0,10	0,11
step_srf	1	1,05E-01	1,05E-01	4,79	0,08	0,09
nlgeom	1	3,89E-03	3,89E-03		AGRUPADO	
increment_minimum _{S3}	1	3,92E-03	3,92E-03		AGRUPADO	
e1	2.036	4,49E+01	2,20E-02			
eAgrupado	2	7,81E-03				

9.4.2.1.2 Modelo de roca

En la Tabla 9.6 se presenta el tiempo de trabajo de cada componente del Modelo-A. El trabajo se completa en 3,9hr, de las cuales 3,8hr corresponden al trabajo realizado por la componente Abaqus. Los gráficos de Pareto, los gráficos de efectos principales, gráfico de interacción y tabla de ANOVA se muestran en los Gráfico 9.18 y Gráfico 9.19, Gráfico 9.20 y Gráfico 9.21, Gráfico 9.22 y Tabla 9.7 respectivamente.

Tabla 9.6: Tiempo de trabajo del Modelo-A para el experimento-A en el talud de roca.

Componente	Cuenta	Mínimo	Máximo	Media	Tiempo total
DE	1	03:52:20	03:52:21	03:52:22	03:52:20
Simcode	2048	00:00:00	00:00:06	00:00:01	00:22:00
Abaqus	2048	00:00:10	00:01:29	00:00:26	15:06:08

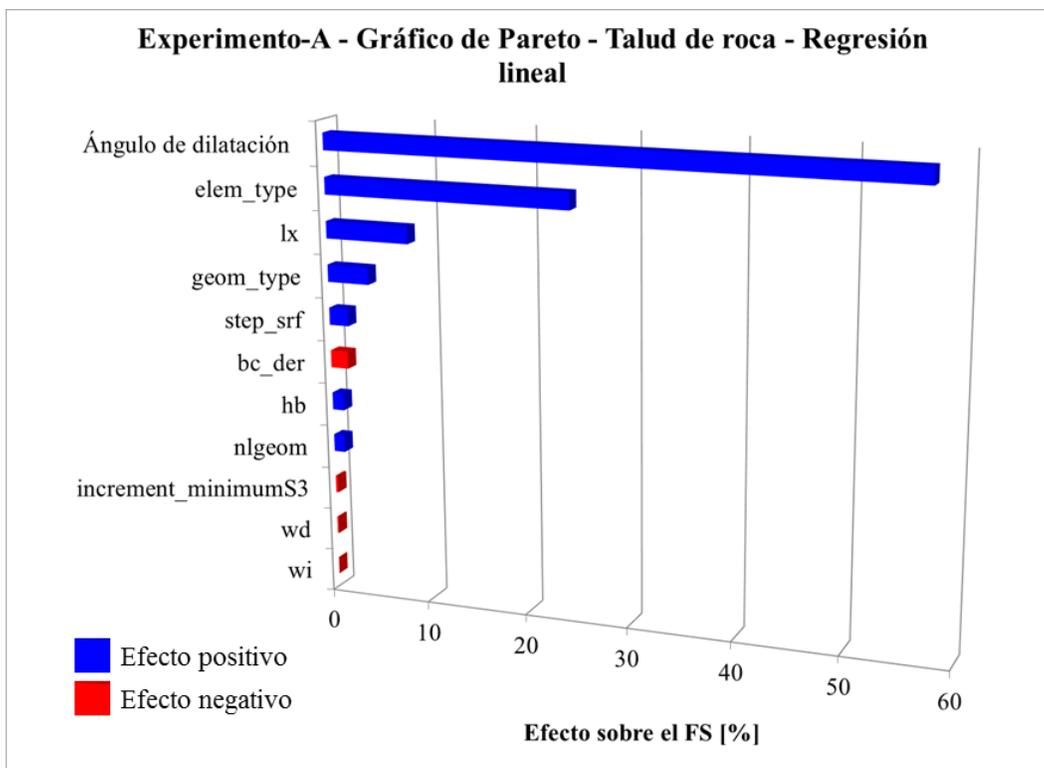


Gráfico 9.18: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca.

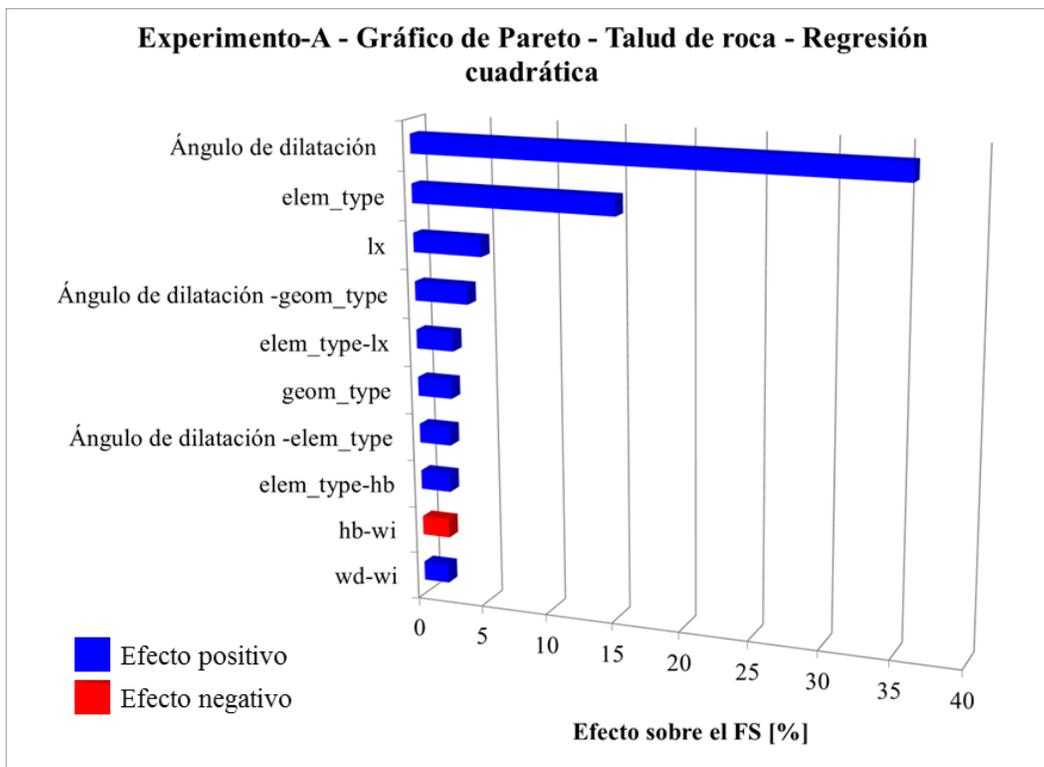


Gráfico 9.19: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca.

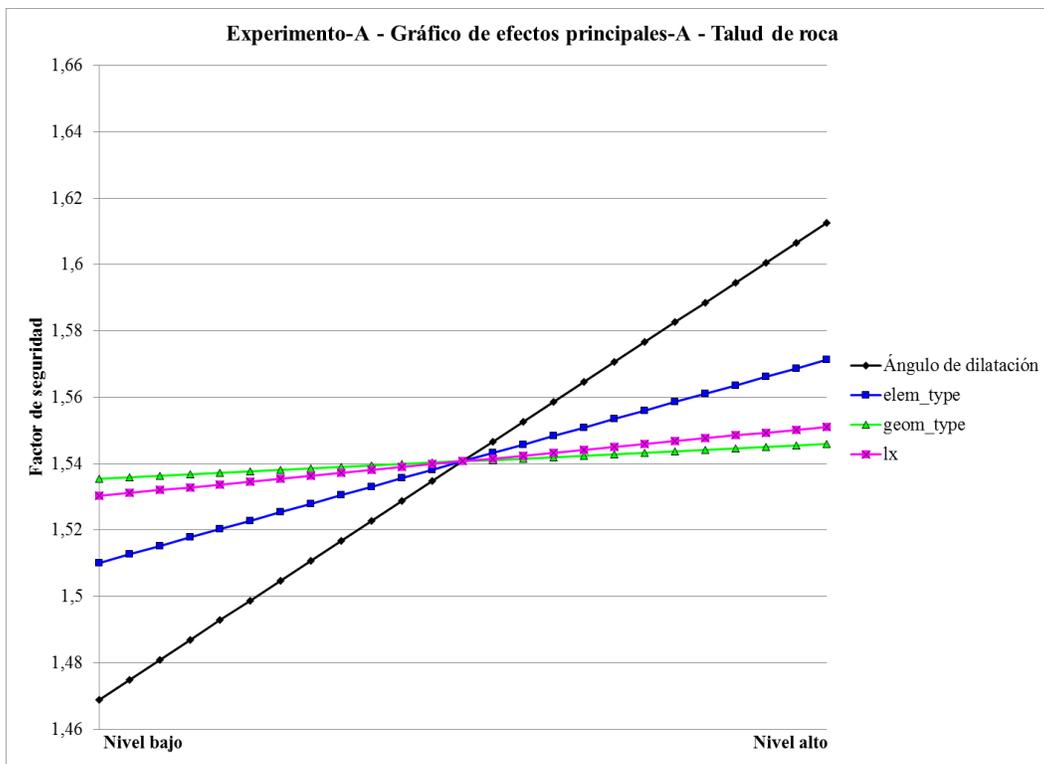


Gráfico 9.20: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca.

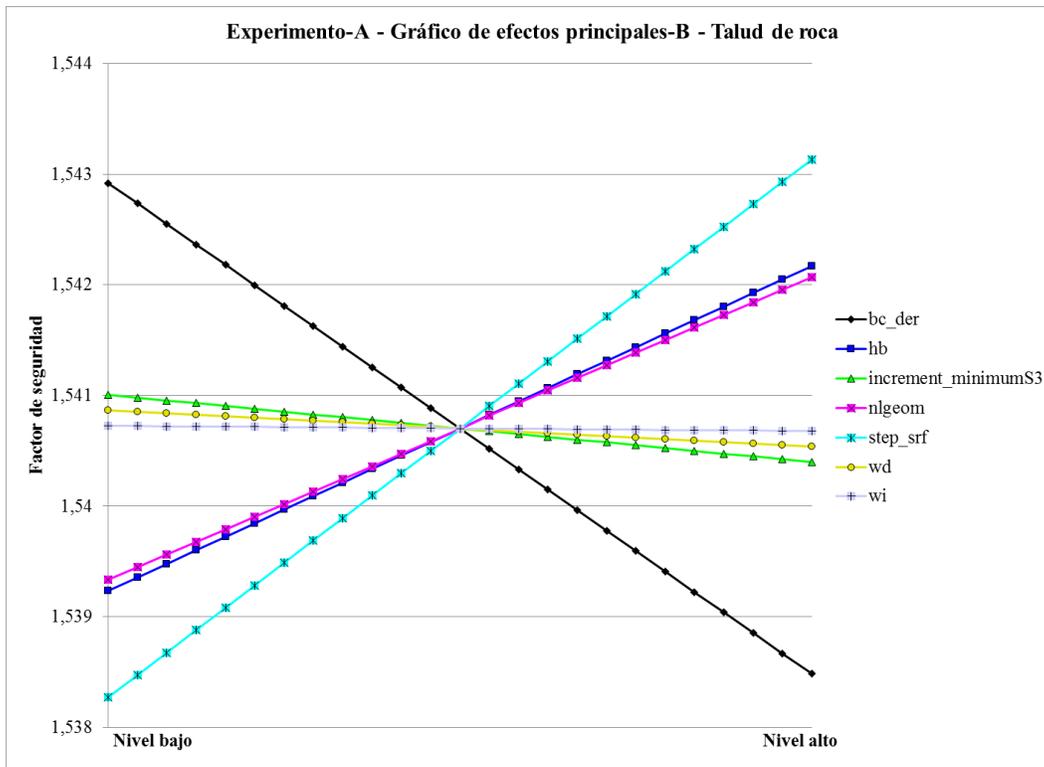


Gráfico 9.21: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca. Segunda parte.

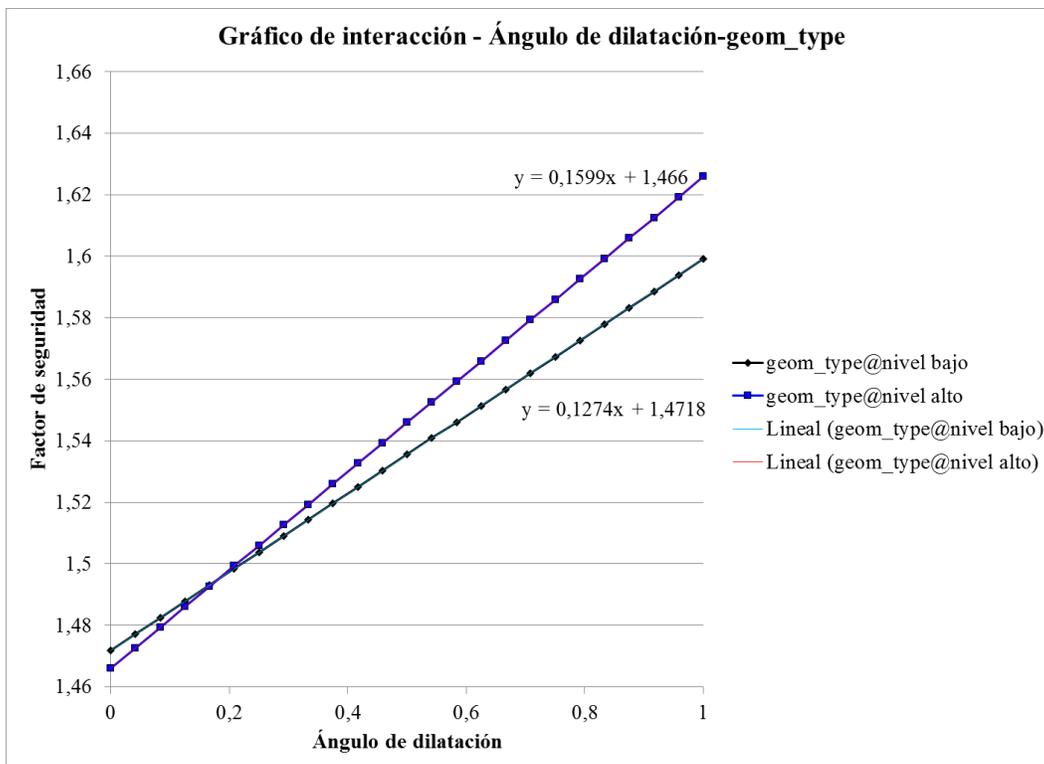


Gráfico 9.22: Gráfico de interacción ángulo de dilatación-geom_type, obtenido para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca.

Tabla 9.7: Tabla de ANOVA para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-A, en el talud de roca.

	DF	SS	V	F	SS'	P(%)
Total	2.047	1,69E+01	8,24E-03			100,00
Ángulo de dilatación	1	1,06E+01	1,06E+01	5271,19	10,56	62,61
eTotal	2.041	4,09E+00	2,00E-03			24,32
<i>elem_type</i>	1	1,91E+00	1,91E+00	955,77	1,91	11,34
<i>lx</i>	1	2,22E-01	2,22E-01	110,91	0,22	1,31
<i>geom_type</i>	1	5,58E-02	5,58E-02	27,85	0,05	0,32
<i>step_srf</i>	1	1,21E-02	1,21E-02	6,05	0,01	0,06
<i>bc_der</i>	1	1,01E-02	1,01E-02	5,03	0,01	0,05
<i>nlgeom</i>	1	3,82E-03	3,82E-03		AGRUPADO	
<i>wi</i>	1	1,17E-06	1,17E-06		AGRUPADO	
<i>hb</i>	1	4,42E-03	4,42E-03		AGRUPADO	
<i>wd</i>	1	5,69E-05	5,69E-05		AGRUPADO	
<i>increment_minimumS3</i>	1	1,88E-04	1,88E-04		AGRUPADO	
e1	2.036	4,08E+00	2,00E-03			
eAgrupado	5	8,49E-03				

Para facilitar el análisis de los resultados, en la Tabla 9.8 se presenta un resumen comparativo entre las magnitudes y signos de los efectos obtenidos a través de los gráficos de Pareto, ordenados en forma decreciente, según el promedio entre ambos taludes. Para permitir una comparación visual, se muestran en escala de colores el promedio y el promedio de la diferencia (Prom. Dif) de los efectos. En la Tabla 9.9 se comparan las magnitudes obtenidas de los gráficos de Pareto y las tablas de ANOVA.

Tabla 9.8: Tabla comparativa de los efectos obtenidos por los gráficos de Pareto del experimento-A, para ambos taludes.

	Suelo-Signo		Roca-Signo		Promedio [%]	Prom. Dif.[%]	Signo
Ángulo de dilatación	35,55	1	56,99	1	46,27	10,72	1
<i>elem_type</i>	26,83	1	24,27	1	25,55	1,28	1
<i>geom_type</i>	13,03	1	4,14	1	8,59	4,44	1
<i>lx</i>	6,84	1	8,27	1	7,55	0,71	1
<i>hb</i>	5,95	-1	1,17	1	3,56	2,39	-1
<i>bc_der</i>	3,52	1	1,76	-1	2,64	0,88	-1
<i>step_srf</i>	2,27	1	1,93	1	2,10	0,17	1
<i>wd</i>	2,72	-1	0,13	-1	1,43	1,30	1
<i>wi</i>	2,41	-1	0,02	-1	1,21	1,20	1
<i>nlgeom</i>	0,44	-1	1,08	1	0,76	0,32	-1
<i>increment_minimum_{S3}</i>	0,44	-1	0,24	-1	0,34	0,10	1

Tabla 9.9: Tabla comparativa de los efectos obtenidos por los gráficos de Pareto y tablas de ANOVA del experimento-A, para ambos taludes.

Suelo			Roca		
Parámetro	ANOVA [%]	Pareto [%]	Parámetro	ANOVA [%]	Pareto [%]
Ángulo de dilatación	28,30	35,55	Ángulo de dilatación	62,61	56,99
<i>elem_type</i>	16,11	26,83	<i>elem_type</i>	11,34	24,27
<i>geom_type</i>	3,78	13,03	<i>lx</i>	1,31	8,27
<i>lx</i>	1,02	6,84	<i>geom_type</i>	0,32	4,14
<i>hb</i>	0,77	5,95	<i>step_srf</i>	0,06	1,93
<i>bc_der</i>	0,25	3,52	<i>bc_der</i>	0,05	1,76
<i>wd</i>	0,14	2,72	<i>nlgeom</i>		1,17
<i>wi</i>	0,11	2,41	<i>wi</i>		1,08
<i>step_srf</i>	0,09	2,27	<i>hb</i>		0,24
<i>increment_minimum_{s3}</i>		0,44	<i>wd</i>		0,13
<i>nlgeom</i>		0,44	<i>increment_minimum_{s3}</i>		0,02

9.4.2.2 Experimento-B

El experimento-B, elaborado para evaluar la incertidumbre de 9 condiciones de diseño del Modelo-A consta de 2.048 tratamientos, llevados a cabo en paralelo, con un máximo de 3 o 4 puntos de diseño evaluados simultáneamente por la componente de diseño de experimentos, para los taludes de suelo y roca respectivamente.

En este experimento las variables cuantitativas se varían en un rango de 50% respecto a valores típicos utilizados, exceptuando *time_steps_{s3}* y todas las variables cualitativas poseen dos niveles.

9.4.2.2.1 Modelo de suelo

En la Tabla 9.10 se presenta el tiempo de trabajo de cada componente del Modelo-A. El trabajo se completa en 31,4hr, de las cuales 29,5hr corresponden al trabajo realizado por la componente Abaqus. Los gráficos de Pareto, los gráficos de efectos principales, tabla de ANOVA se muestran en los Gráfico 9.23 y Gráfico 9.24, Gráfico 9.25 y Gráfico 9.26 y Tabla 9.11 respectivamente.

Tabla 9.10: Tiempo de trabajo del Modelo-A para el experimento-B en el talud de suelo.

Componente	Cuenta	Mínimo	Máximo	Media	Tiempo total
DE	1	1día 07:26:23	1día 07:26:23	1día 07:26:23	1día 07:26:23
Simcode	512	00:00:00	00:00:13	00:00:01	00:10:59
Abaqus	512	00:00:33	04:22:50	00:10:22	3días 16:34:21

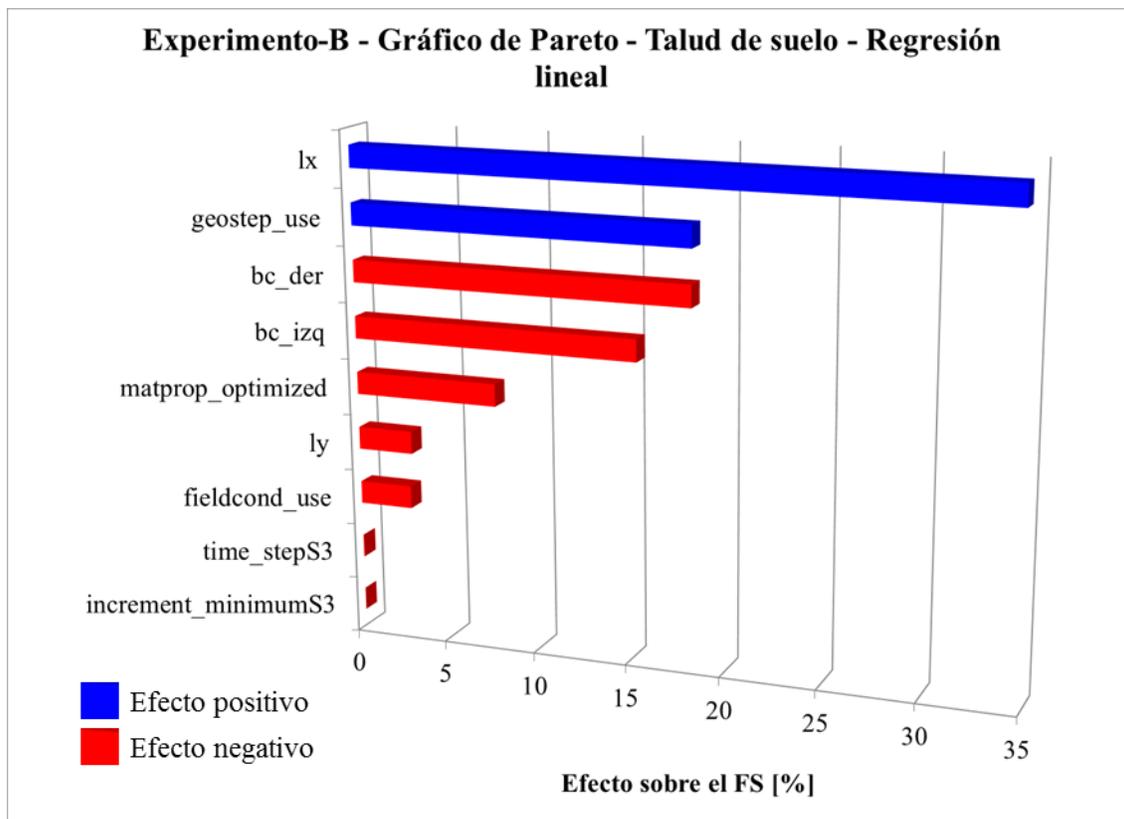


Gráfico 9.23: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de suelo.

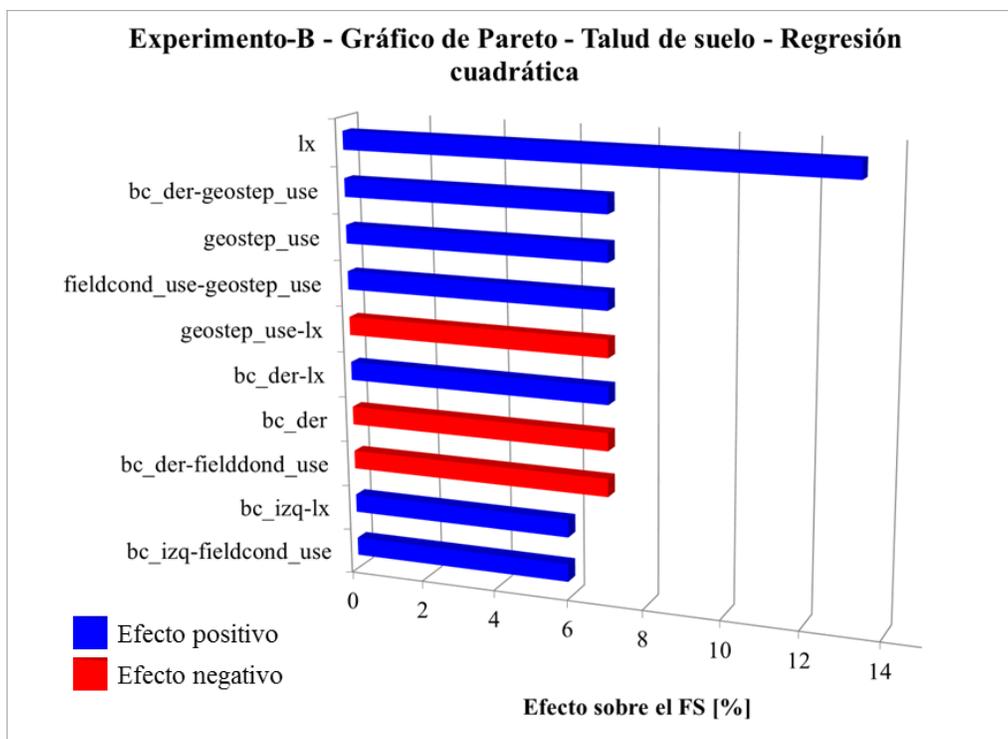


Gráfico 9.24: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de suelo.

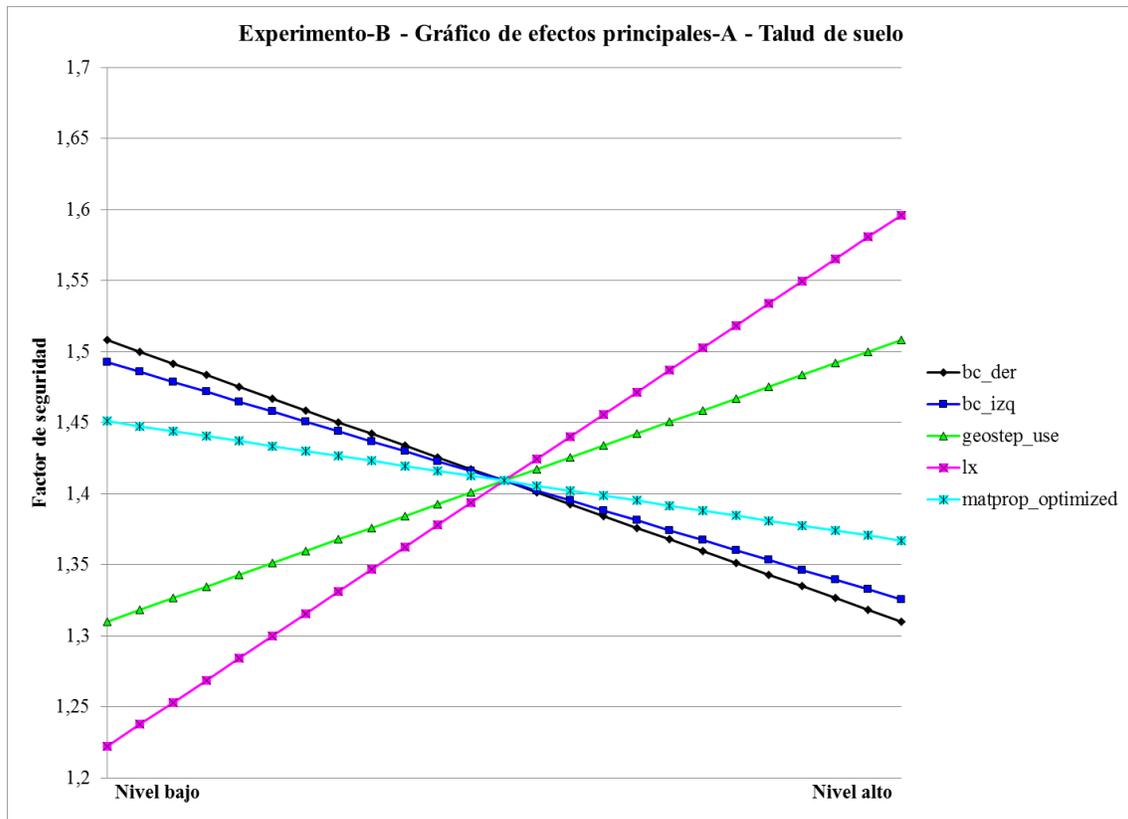


Gráfico 9.25: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de suelo.

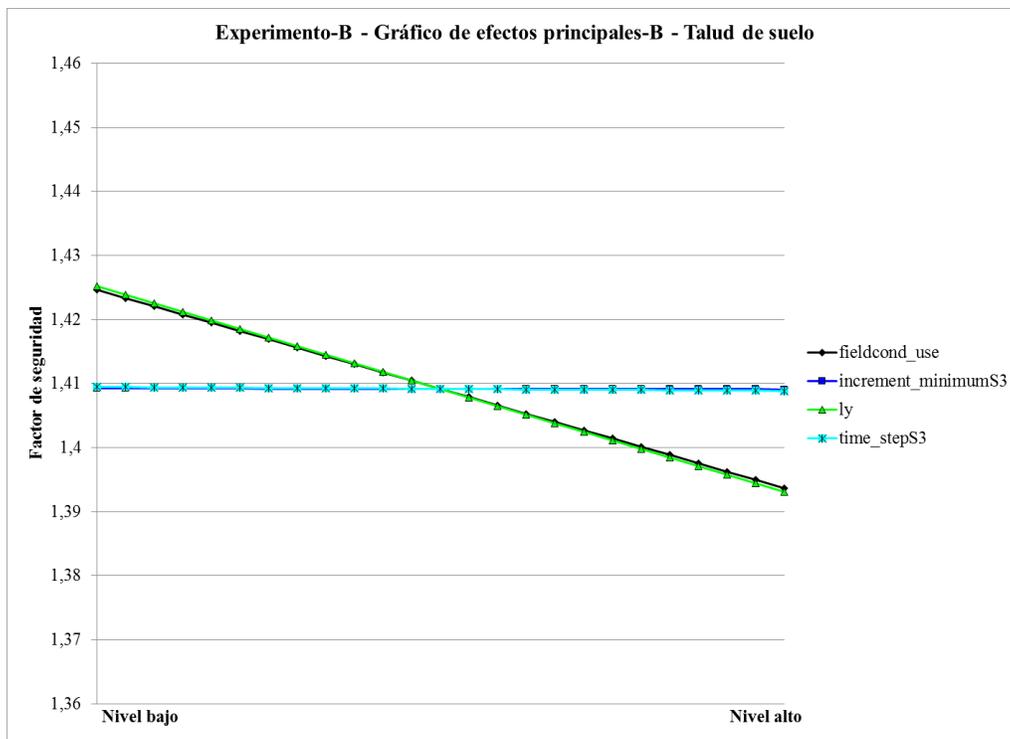


Gráfico 9.26: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de suelo. Segunda parte.

Tabla 9.11: Tabla de ANOVA para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de suelo.

	DF	SS	V	F	SS'	P(%)
Total	511	1,03E+02	2,01E-01			100,00
eTotal	506	7,05E+01	1,39E-01			69,12
<i>lx</i>	1	1,79E+01	1,79E+01	128,79	17,79	17,29
<i>geostep_use</i>	1	5,05E+00	5,05E+00	36,24	4,91	4,77
<i>bc_der</i>	1	5,03E+00	5,03E+00	36,12	4,89	4,75
<i>bc_izq</i>	1	3,57E+00	3,57E+00	25,66	3,43	3,34
<i>matprop_optimized</i>	1	9,03E-01	9,03E-01	6,48	0,76	0,74
<i>ly</i>	1	1,33E-01	1,33E-01		AGRUPADO	
<i>increment_minimum_{s3}</i>	1	2,68E-06	2,68E-06		AGRUPADO	
<i>time_step_{s3}</i>	1	4,55E-05	4,55E-05		AGRUPADO	
<i>fieldcond_use</i>	1	1,23E-01	1,23E-01		AGRUPADO	
e1	502	7,02E+01	1,40E-01			
eAgrupado	4	2,55E-01				

9.4.2.2.2 Modelo de roca

En la Tabla 9.12 se presenta el tiempo de trabajo de cada componente del Modelo-A. El trabajo se completa en 6,4hr, de las cuales 6hr corresponden al trabajo realizado por la componente Abaqus. Los gráficos de Pareto, los gráficos de efectos principales interacción y tabla de ANOVA se muestran en los Tabla 9.13 respectivamente.

Tabla 9.12: Tiempo de trabajo del Modelo-A para el experimento-B en el talud de roca.

Componente	Cuenta	Mínimo	Máximo	Media	Tiempo total
DE	1	06:23:27	06:23:28	06:23:29	06:23:30
Simcode	512	00:00:00	00:00:38	00:00:01	00:10:59
Abaqus	512	00:00:09	00:57:15	00:02:49	1día 00:10:04

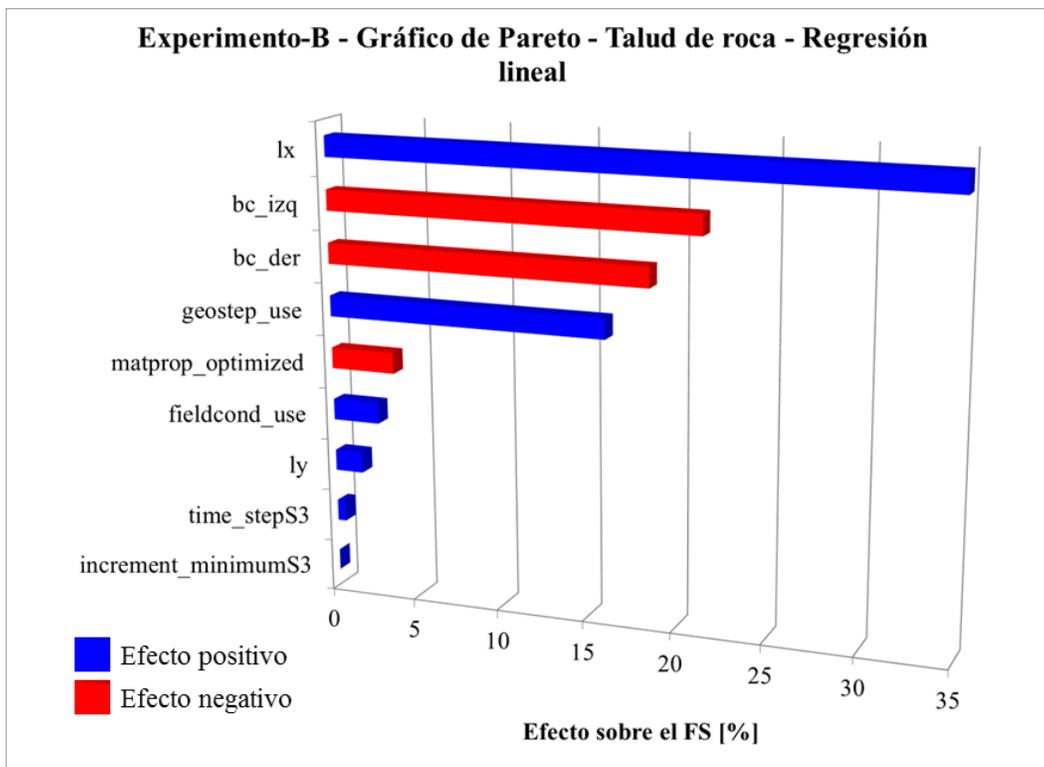


Gráfico 9.27: Gráfico de Pareto para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de roca.

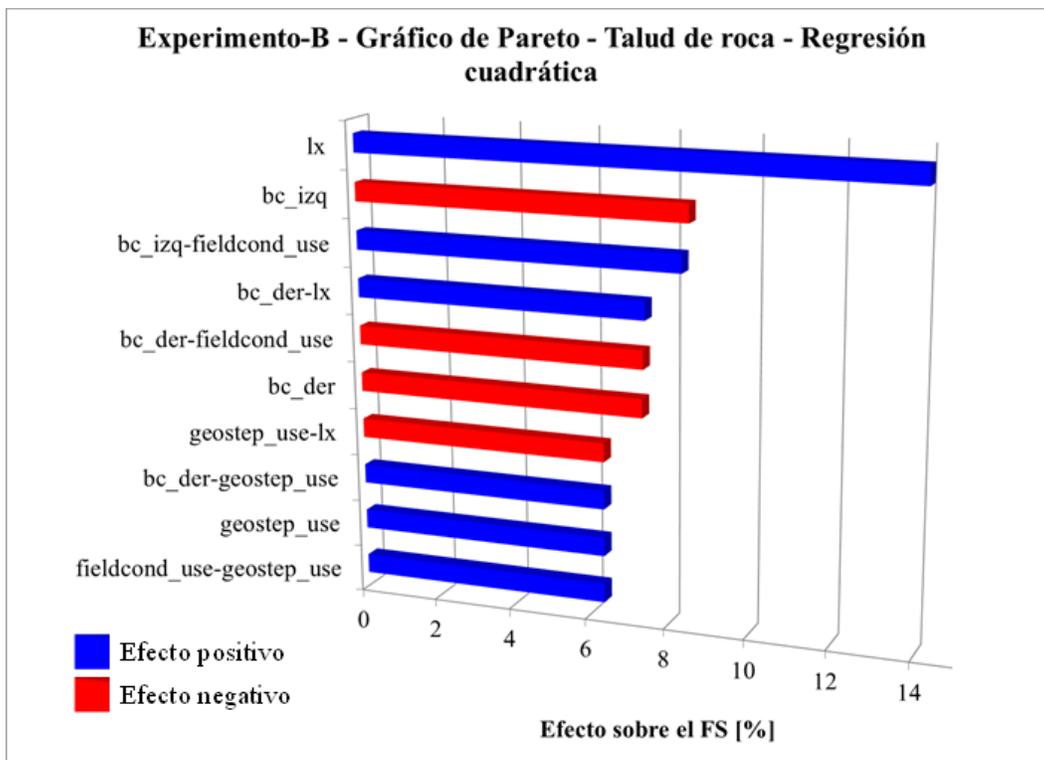


Gráfico 9.28: Gráfico de Pareto de regresión cuadrática para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de roca.

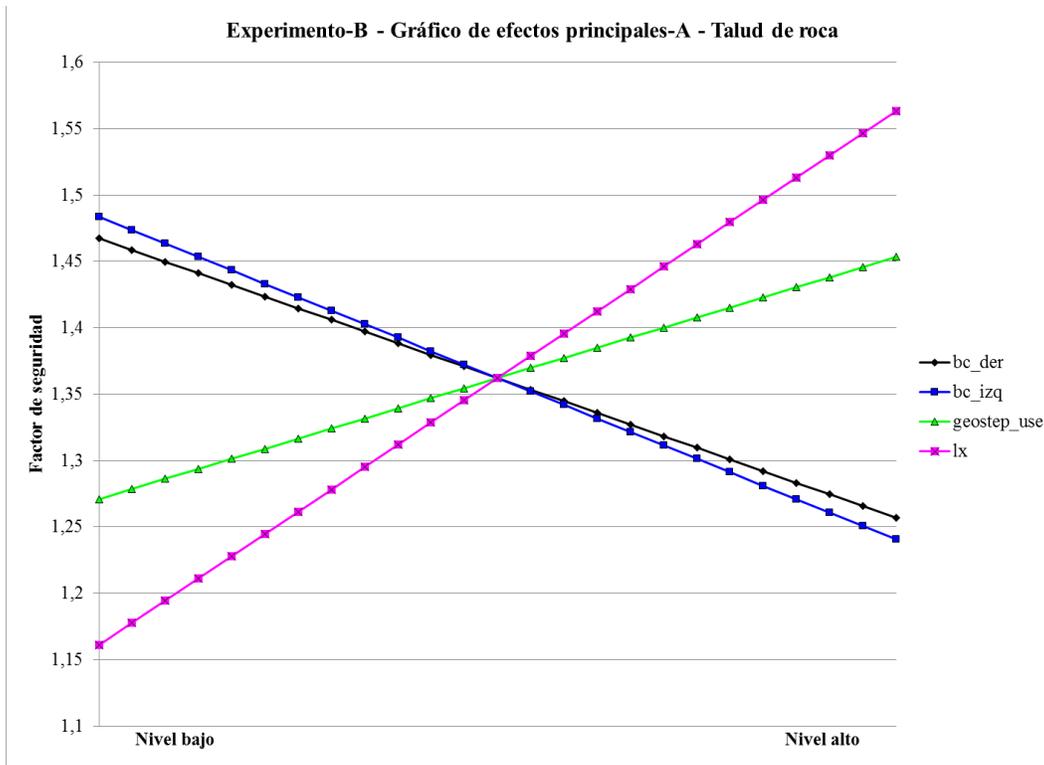


Gráfico 9.29: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de roca.

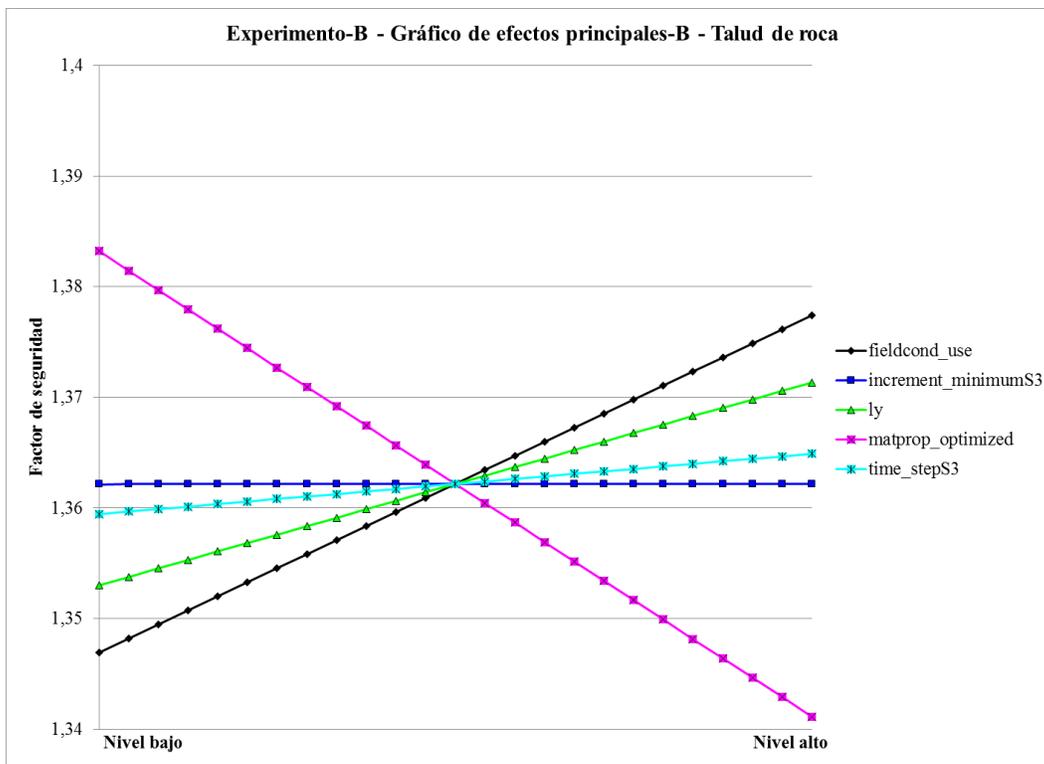


Gráfico 9.30: Gráfico de efectos principales para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de roca. Segunda parte.

Tabla 9.13: Tabla de ANOVA para evaluar las incertidumbres en las variables de diseño del experimento-B, en el talud de roca.

	DF	SS	V	F	SS'	P(%)
Total	511	1,04E+02	2,03E-01			100,00
eTotal	507	6,53E+01	1,29E-01			63,59
lx_max	1	2,07E+01	2,07E+01	160,92	20,61	19,90
BC_izq	1	7,57E+00	7,57E+00	58,73	7,44	7,18
BC_der	1	5,66E+00	5,66E+00	43,94	5,54	5,34
Geostep_use	1	4,26E+00	4,26E+00	33,02	4,13	3,98
ly_max	1	4,31E-02	4,31E-02		AGRUPADO	
increment_minimum_s2	1	2,37E-08	2,37E-08		AGRUPADO	
time_step_s2	1	3,81E-03	3,81E-03		AGRUPADO	
FieldCond_use	1	1,19E-01	1,19E-01		AGRUPADO	
MatProp_Optimized	1	2,26E-01	2,26E-01		AGRUPADO	
e1	502	6,50E+01	1,29E-01			
eAgrupado	5	3,92E-01				

Para facilitar el análisis de los resultados, en la Tabla 9.14 se presenta un resumen comparativo entre las magnitudes y signos de los efectos obtenidos a través de los gráficos de Pareto, ordenados en forma decreciente, según el promedio entre ambos taludes. Para permitir una comparación visual, se muestran en escala de colores el promedio y el promedio de la diferencia (Prom. Dif) de los efectos. En la Tabla 9.15 se comparan las magnitudes obtenidas de los gráficos de Pareto y las tablas de ANOVA.

Tabla 9.14: Tabla comparativa de los efectos obtenidos por los gráficos de Pareto del experimento-B, para ambos taludes.

	Suelo-Signo		Roca-Signo		Promedio [%]	Prom. Dif.[%]	Signo
<i>lx</i>	34,47	1	35,47	1	34,97	0,25	1
<i>bc_izq</i>	15,38	-1	21,43	-1	18,41	1,51	1
<i>bc_der</i>	18,25	-1	18,54	-1	18,39	0,07	1
<i>geostep_use</i>	18,28	1	16,07	1	17,18	0,55	1
<i>matprop_optimized</i>	7,73	-1	3,71	-1	5,72	1,01	1
<i>fieldcond_use</i>	2,85	-1	2,69	1	2,77	0,04	-1
<i>ly</i>	2,96	-1	1,62	1	2,29	0,34	-1
<i>time_step_s3</i>	0,05	-1	0,48	1	0,27	0,11	-1
<i>increment_minimum_s3</i>	0,01	-1	0,00	1	0,01	0,00	-1

Tabla 9.15: Tabla comparativa de los efectos obtenidos por los gráficos de Pareto y tablas de ANOVA del experimento-B, para ambos taludes.

Suelo			Roca		
Parámetro	ANOVA [%]	Pareto [%]	Parámetro	ANOVA [%]	Pareto [%]
<i>lx</i>	17,79	34,47	<i>lx</i>	19,90	35,47
<i>geostep_use</i>	4,91	18,28	<i>bc_izq</i>	7,18	21,43
<i>bc_der</i>	4,89	18,25	<i>bc_der</i>	5,34	18,54
<i>bc_izq</i>	3,43	15,38	<i>geostep_use</i>	3,98	16,07
<i>matprop_optimized</i>	0,76	7,73	<i>matprop_optimized</i>		3,71
<i>ly</i>		2,96	<i>fieldcond_use</i>		2,69
<i>fieldcond_use</i>		2,85	<i>ly</i>		1,62
<i>time_step_{s3}</i>		0,05	<i>time_step_{s3}</i>		0,48
<i>increment_minimum_{s3}</i>		0,01	<i>increment_minimum_{s3}</i>		0,00

9.4.3 Resultados visuales

Respecto a resultados visuales, en lo siguiente se entregan imágenes de referencia del progreso de la simulación, basados en la deformación plástica experimentada por el talud, hasta la ocurrencia de falla.

En la Figura 9.8 se muestra la progresión de la deformación plástica experimentada por el talud de roca al incrementar el valor de SRF, considerando las mismas variables de entrada y de diseño adoptadas en la sección 4.1.4.1. Se muestran 3 incrementos distintos del último *step* de simulación, obteniéndose un FS =1,57. En la Figura 9.10 se muestran las distribuciones de desplazamientos, esfuerzos y deformaciones para los mismos incrementos.

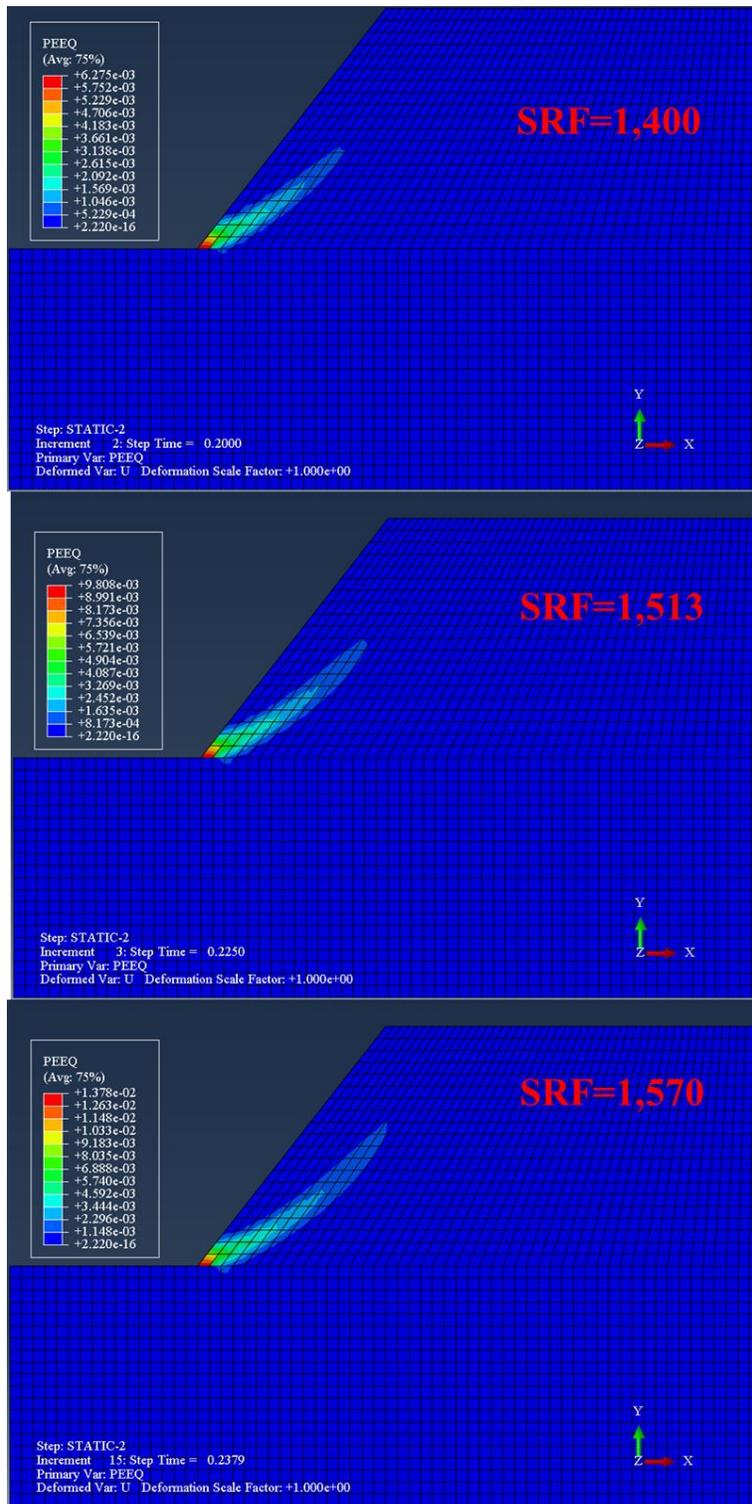


Figura 9.8: Progresión de la deformación plástica experimentada por el talud de roca al incrementar el valor de SRF.

Para el mismo talud, en la Figura 9.9, se muestra la superficie final de deformación plástica modificando los parámetros: *elem_type*, *wi*, *wd* y *hb*, y el FS obtenido para tal configuración.

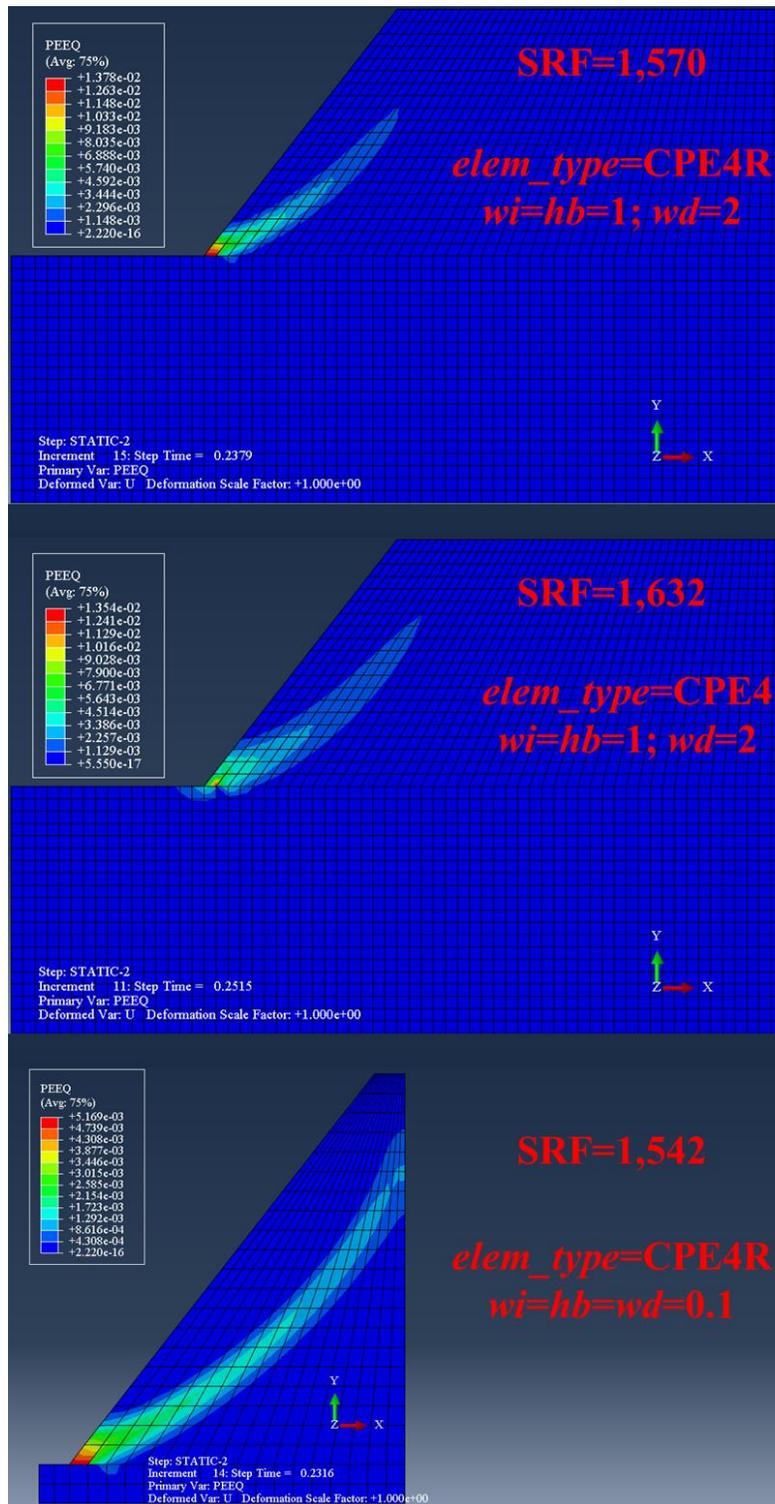


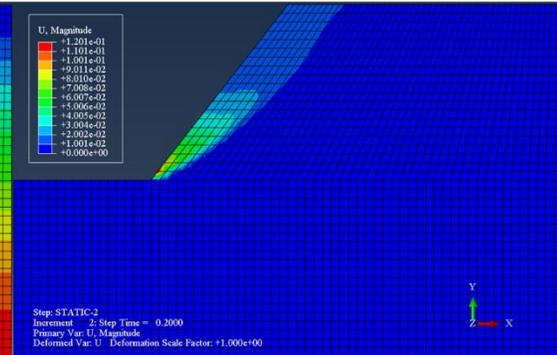
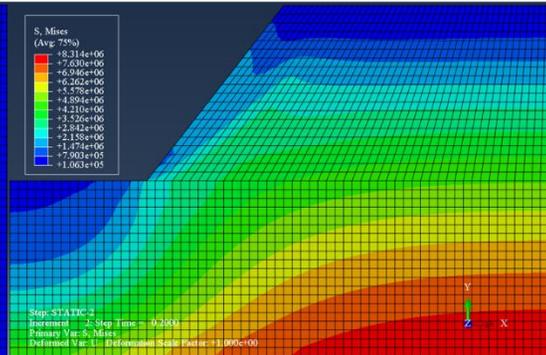
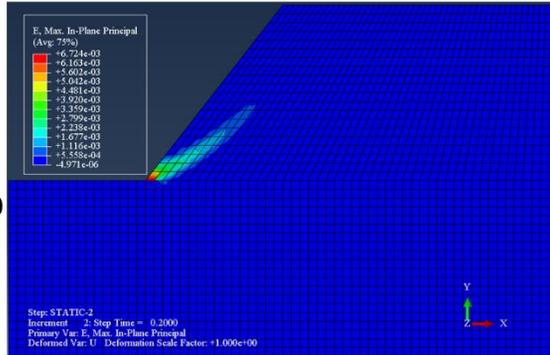
Figura 9.9: Superficie final de deformación plástica modificando los parámetros: *elem_type*, *wi*, *wd* y *hb* del talud de suelo, y el FS obtenido para tal configuración.

Deformación máximo en-plano

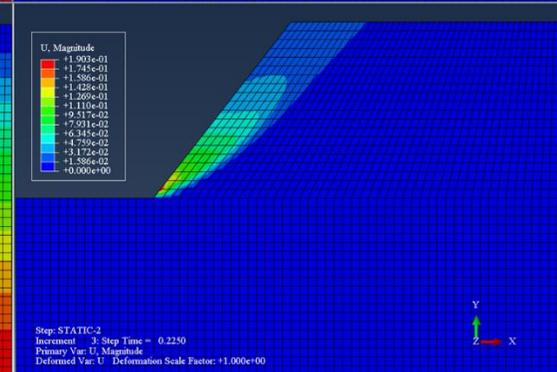
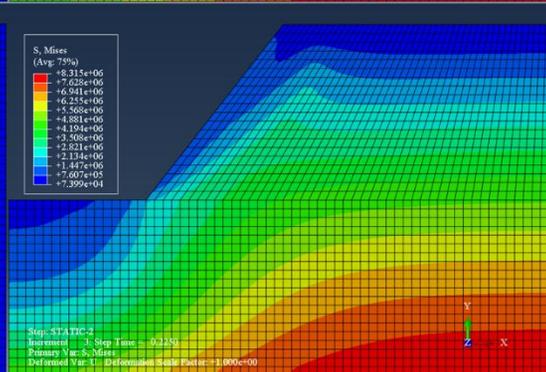
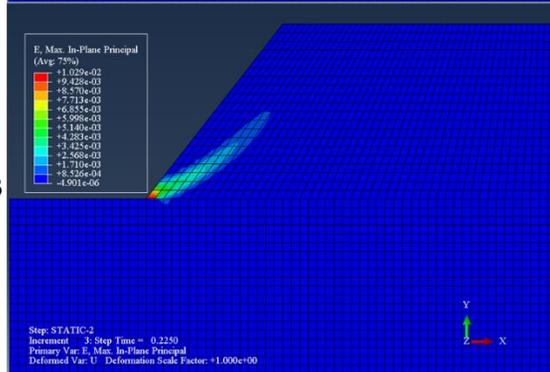
Esfuerzo de Von Mises

Magnitud del desplazamiento

SRF
1,400



SRF
1,513



SRF
1,570

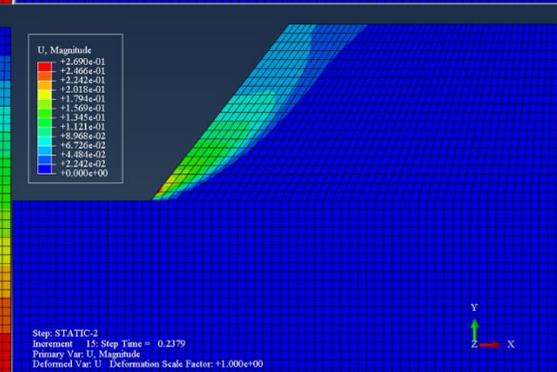
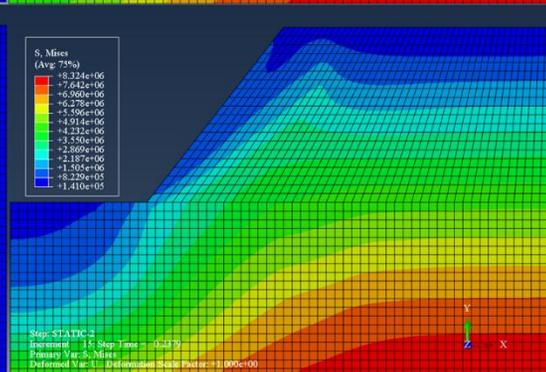
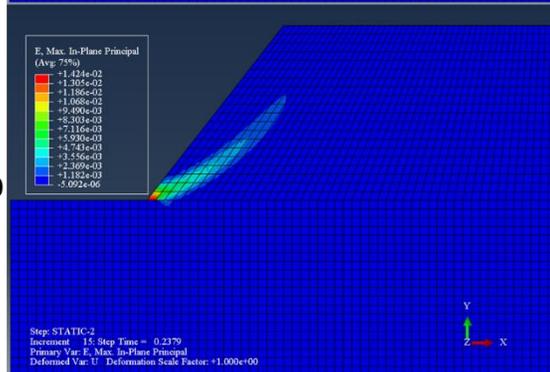


Figura 9.10: Ejemplo de deformaciones, esfuerzos y desplazamientos obtenidos utilizando el método de reducción de la resistencia. Se muestran tres incrementos distintos y el SRF asociado hasta el punto de falla.

9.4.4 Efecto del ángulo de dilatancia

Los resultados del comportamiento del FS respecto al ángulo de dilatancia se muestran en los Gráfico 9.31 y Gráfico 9.32 considerando la razón entre el ángulo de dilatancia y el ángulo de fricción del material definida por el parámetro *dilatancy_angle*. Se destaca además que dichos experimentos tienen un tiempo de trabajo promedio por tratamiento de 6,9min y 2,3min, para los taludes de suelo y roca respectivamente.

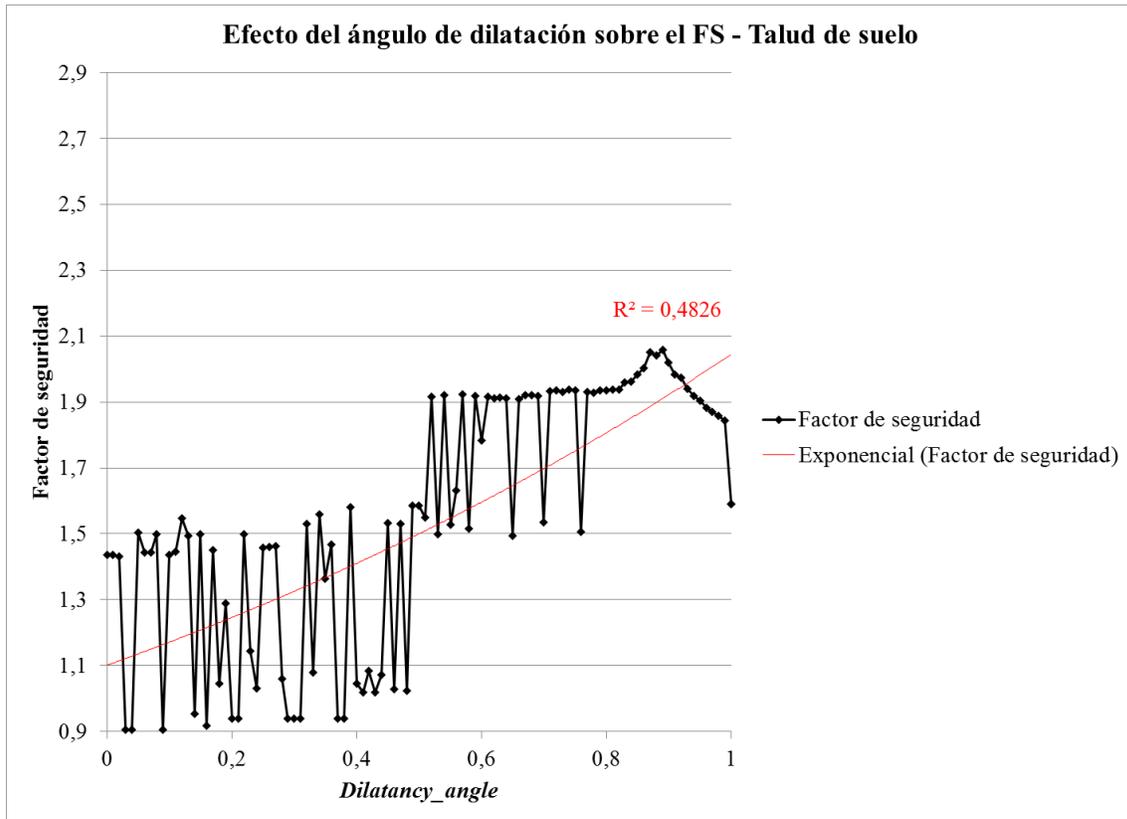


Gráfico 9.31: Efecto del ángulo de dilatancia sobre el FS computado para el talud de suelo.

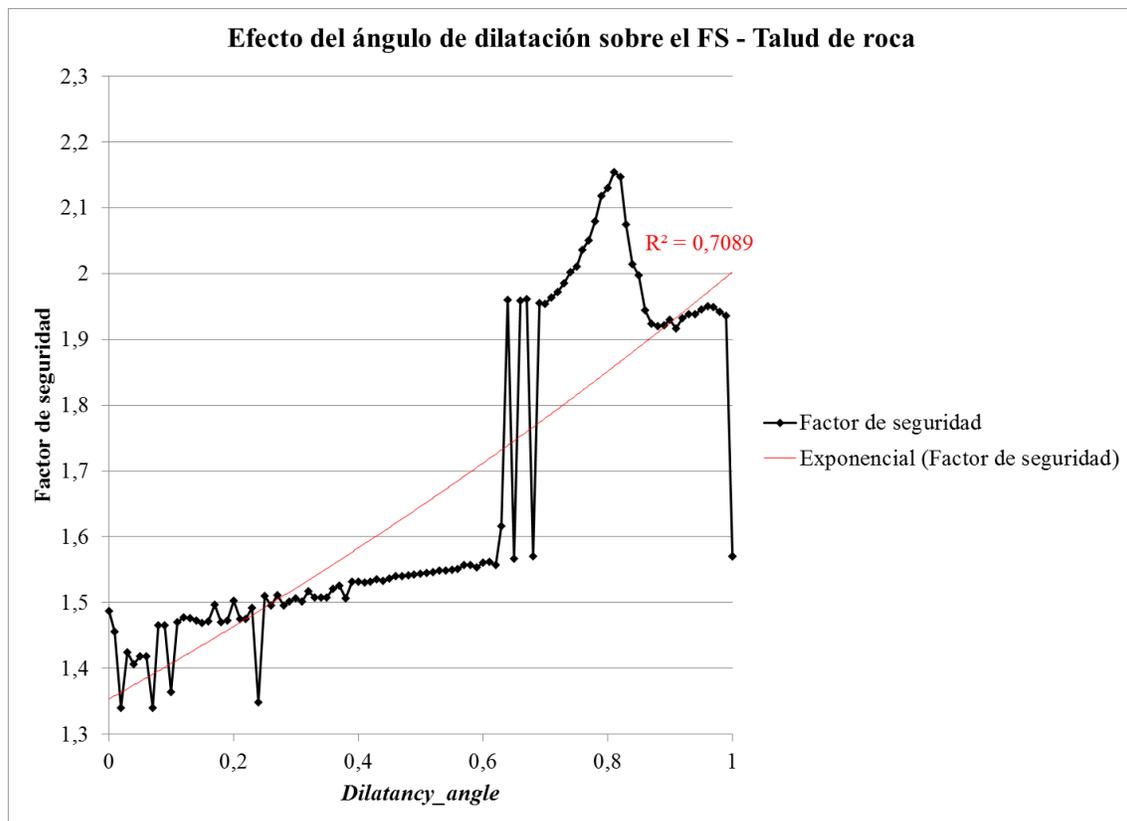


Gráfico 9.32: Efecto del ángulo de dilatación sobre el FS computado para el talud de roca.

9.5 Resultados del Modelo-B

9.5.1 Tabla de resultados de ejemplo

Tabla 9.16: Ejemplo de los resultados obtenidos utilizando el modelo-B.

Caso	Fase	Mínimo Local	Dirección	Pared	Altura de talud [m]	Ángulo de talud [°]	Bancos	FS
1	Fase#1	MínLoc#1	0	Pared#1	370	45,8	25	1,60
2	Fase#1	MínLoc#1	0	Pared#2	370	43,5	27	1,65
3	Fase#1	MínLoc#1	45	Pared#1	370	45,7	18	1,63
4	Fase#1	MínLoc#1	45	Pared#2	370	39,7	20	1,80
5	Fase#1	MínLoc#1	90	Pared#1	360	42,7	26	1,46
6	Fase#1	MínLoc#1	90	Pared#2	40	53,1	3	5,22
7	Fase#1	MínLoc#1	90	Pared#3	-	-	1	-
8	Fase#1	MínLoc#1	90	Pared#4	330	42,5	24	1,41
9	Fase#1	MínLoc#1	135	Pared#1	360	45,0	18	1,66
10	Fase#1	MínLoc#1	135	Pared#2	360	45,0	18	1,68
11	Fase#1	MínLoc#2	0	Pared#1	340	41,1	27	1,85
12	Fase#1	MínLoc#2	0	Pared#2	340	44,6	23	1,43
13	Fase#1	MínLoc#2	45	Pared#1	340	34,9	20	1,80
14	Fase#1	MínLoc#2	45	Pared#2	340	45,0	17	1,70
15	Fase#1	MínLoc#2	90	Pared#1	340	35,3	26	1,48
16	Fase#1	MínLoc#2	90	Pared#2	340	44,6	24	1,68
17	Fase#1	MínLoc#2	135	Pared#1	340	46,9	16	1,66

18	Fase#1	MínLoc#2	135	Pared#2	340	43,3	17	1,75
19	Fase#2	MínLoc#1	0	Pared#1	380	45,4	26	1,61
20	Fase#2	MínLoc#1	0	Pared#2	380	43,2	28	1,63
21	Fase#2	MínLoc#1	45	Pared#1	380	44,9	19	1,62
22	Fase#2	MínLoc#1	45	Pared#2	380	41,8	19	1,71
23	Fase#2	MínLoc#1	90	Pared#1	380	44,3	27	1,61
24	Fase#2	MínLoc#1	90	Pared#2	380	39,3	29	1,31
25	Fase#2	MínLoc#1	135	Pared#1	380	44,9	19	1,61
26	Fase#2	MínLoc#1	135	Pared#2	380	46,5	18	1,60
27	Fase#2	MínLoc#2	0	Pared#1	350	40,8	27	1,76
28	Fase#2	MínLoc#2	0	Pared#2	350	44,2	25	1,33
29	Fase#2	MínLoc#2	45	Pared#1	350	38,2	20	1,74
30	Fase#2	MínLoc#2	45	Pared#2	20	43,3	2	10,00
31	Fase#2	MínLoc#2	45	Pared#3	-	-	1	-
32	Fase#2	MínLoc#2	45	Pared#4	350	45,9	17	1,67
33	Fase#2	MínLoc#2	90	Pared#1	340	40,0	26	1,40
34	Fase#2	MínLoc#2	90	Pared#2	-	-	1	-
35	Fase#2	MínLoc#2	90	Pared#3	-	-	1	-
36	Fase#2	MínLoc#2	90	Pared#4	350	44,2	25	1,17
37	Fase#2	MínLoc#2	135	Pared#1	350	45,9	17	1,66
38	Fase#2	MínLoc#2	135	Pared#2	350	42,5	18	1,72
39	Fase#3	MínLoc#1	0	Pared#1	380	43,2	28	1,25
40	Fase#3	MínLoc#1	0	Pared#2	380	44,3	27	1,09
41	Fase#3	MínLoc#1	45	Pared#1	380	44,9	19	1,48
42	Fase#3	MínLoc#1	45	Pared#2	380	41,8	19	1,70
43	Fase#3	MínLoc#1	90	Pared#1	380	42,1	27	1,26
44	Fase#3	MínLoc#1	90	Pared#2	40	53,1	2	5,53
45	Fase#3	MínLoc#1	90	Pared#3	-	-	1	-
46	Fase#3	MínLoc#1	90	Pared#4	350	45,4	24	1,65
47	Fase#3	MínLoc#1	135	Pared#1	380	44,9	19	1,65
48	Fase#3	MínLoc#1	135	Pared#2	380	44,9	19	1,64
49	Fase#3	MínLoc#2	0	Pared#1	360	40,6	28	1,80
50	Fase#3	MínLoc#2	0	Pared#2	360	43,8	26	1,31
51	Fase#3	MínLoc#2	45	Pared#1	350	39,5	19	1,74
52	Fase#3	MínLoc#2	45	Pared#2	-	-	1	-
53	Fase#3	MínLoc#2	45	Pared#3	-	-	1	-
54	Fase#3	MínLoc#2	45	Pared#4	360	45,0	18	1,66
55	Fase#3	MínLoc#2	90	Pared#1	360	39,6	27	1,41
56	Fase#3	MínLoc#2	90	Pared#2	-	-	1	-
57	Fase#3	MínLoc#2	90	Pared#3	-	-	1	-
58	Fase#3	MínLoc#2	90	Pared#4	360	43,8	26	1,48
59	Fase#3	MínLoc#2	135	Pared#1	360	45,0	18	1,65
60	Fase#3	MínLoc#2	135	Pared#2	360	41,8	19	1,56
61	Fase#4	MínLoc#1	0	Pared#1	380	44,3	26	1,33
62	Fase#4	MínLoc#1	0	Pared#2	380	43,2	28	1,12

63	Fase#4	MínLoc#1	45	Pared#1	380	44,9	19	1,64
64	Fase#4	MínLoc#1	45	Pared#2	380	36,7	23	1,75
65	Fase#4	MínLoc#1	90	Pared#1	390	43,9	27	1,29
66	Fase#4	MínLoc#1	90	Pared#2	40	33,7	3	6,37
67	Fase#4	MínLoc#1	90	Pared#3	-	-	1	-
68	Fase#4	MínLoc#1	90	Pared#4	360	42,7	26	1,28
69	Fase#4	MínLoc#1	135	Pared#1	370	45,7	18	1,63
70	Fase#4	MínLoc#1	135	Pared#2	370	45,7	18	1,62
71	Fase#4	MínLoc#2	0	Pared#1	370	41,4	29	1,17
72	Fase#4	MínLoc#2	0	Pared#2	370	44,6	26	1,64
73	Fase#4	MínLoc#2	45	Pared#1	340	43,3	18	1,75
74	Fase#4	MínLoc#2	45	Pared#2	-	-	1	-
75	Fase#4	MínLoc#2	45	Pared#3	30	54,7	2	6,64
76	Fase#4	MínLoc#2	45	Pared#4	-	-	1	-
77	Fase#4	MínLoc#2	45	Pared#5	-	-	1	-
78	Fase#4	MínLoc#2	45	Pared#6	370	45,7	18	1,63
79	Fase#4	MínLoc#2	90	Pared#1	370	39,4	28	1,42
80	Fase#4	MínLoc#2	90	Pared#2	-	-	1	-
81	Fase#4	MínLoc#2	90	Pared#3	-	-	1	-
82	Fase#4	MínLoc#2	90	Pared#4	370	44,6	26	1,64
83	Fase#4	MínLoc#2	135	Pared#1	370	45,7	18	1,62
84	Fase#4	MínLoc#2	135	Pared#2	370	42,6	19	1,66
85	Fase#5	MínLoc#1	0	Pared#1	390	45,0	27	1,05
86	Fase#5	MínLoc#1	0	Pared#2	390	41,9	29	1,31
87	Fase#5	MínLoc#1	45	Pared#1	390	45,6	19	1,59
88	Fase#5	MínLoc#1	45	Pared#2	-	-	1	-
89	Fase#5	MínLoc#1	45	Pared#3	-	-	1	-
90	Fase#5	MínLoc#1	45	Pared#4	60	29,5	5	5,70
91	Fase#5	MínLoc#1	45	Pared#5	-	-	1	-
92	Fase#5	MínLoc#1	45	Pared#6	340	43,3	18	1,75
93	Fase#5	MínLoc#1	90	Pared#1	390	46,1	26	1,59
94	Fase#5	MínLoc#1	90	Pared#2	40	20,9	3	6,63
95	Fase#5	MínLoc#1	90	Pared#3	-	-	1	-
96	Fase#5	MínLoc#1	90	Pared#4	360	41,6	26	1,40
97	Fase#5	MínLoc#1	135	Pared#1	390	42,6	20	1,57
98	Fase#5	MínLoc#1	135	Pared#2	390	45,6	19	1,62
99	Fase#5	MínLoc#2	0	Pared#1	390	42,9	29	1,72
100	Fase#5	MínLoc#2	0	Pared#2	390	45,0	27	1,55
101	Fase#5	MínLoc#2	45	Pared#1	350	42,5	19	1,68
102	Fase#5	MínLoc#2	45	Pared#2	-	-	1	-
103	Fase#5	MínLoc#2	45	Pared#3	50	30,5	4	6,10
104	Fase#5	MínLoc#2	45	Pared#4	390	45,6	19	1,59
105	Fase#5	MínLoc#2	90	Pared#1	380	39,3	29	1,38
106	Fase#5	MínLoc#2	90	Pared#2	30	63,4	2	5,67
107	Fase#5	MínLoc#2	90	Pared#3	40	41,6	3	5,86

108	Fase#5	MínLoc#2	90	Pared#4	390	46,1	26	1,56
109	Fase#5	MínLoc#2	135	Pared#1	390	45,6	19	1,59
110	Fase#5	MínLoc#2	135	Pared#2	390	42,6	21	1,69

9.6 Análisis del Modelo-A

9.6.1 Incertidumbre en las variables de diseño

9.6.1.1 Experimento-A

A partir de los resultados expuestos en la sección 9.4.2.1 se cumple que:

- i. El tiempo de trabajo requerido para analizar el modelo de suelo (Tabla 9.4) es significativamente mayor al requerido para analizar el modelo de roca (Tabla 9.6), al menos cinco veces mayor. Esto sugiere que, al disminuir la calidad geotécnica de los materiales analizados aumenta el tiempo requerido para computar el FS. El promedio de todos los tratamientos se encuentra bajo los 2min, lo que corresponde un tiempo razonable para analizar cientos de escenarios en el transcurso de un mismo día.
- ii. Los gráficos de Pareto de regresión lineal (Gráfico 9.12 y Gráfico 9.18) muestran que:
 - a. Las condiciones de proceso del Modelo-A utilizadas en este experimento, impactan de forma significativa el FS obtenido. De los 11 parámetros considerados, 4 de ellos: ángulo de dilatación, *elem_type*, *geom_type* y *lx* lo afectan positivamente por sobre el 5%, y los dos primeros, sobre el 25%. Se comprueba que utilizar un ángulo de dilatación nulo y elementos de bajo orden disminuyen el FS calculado. El comportamiento de *lx* sugiere que al utilizar elementos de mayor tamaño se sobreestima el FS, sin embargo, este comportamiento también puede estar asociado a la ocurrencia de singularidades numéricas en elementos muy pequeños, por lo que se recomienda llevar a cabo nuevos experimentos sobre esta variable.
 - b. El ángulo de dilatación es el parámetro con mayor incidencia sobre el factor de seguridad. Esto concuerda con las inquietudes presentadas en investigaciones previas respecto a este parámetro.
 - c. La magnitud de los efectos obtenidos para cada talud difiere. Esto es particularmente importante en los parámetros: ángulo de dilatación y *geom_type*, lo que sugiere que existe dependencia entre las variables de entrada y parámetros del modelo. Se recomienda repetir este experimento sobre un amplio rango de materiales geotécnicos y parámetros geométricos del talud.
 - d. El efecto de algunos factores difiere en signo. En particular valor de *hb* y *bc_der* tiene un efecto contrario según el talud analizado. Nuevamente, esto sugiere que existe una relación entre las propiedades de material, o geometría del talud, con los parámetros del modelo. Este comportamiento, que sugiere dependencia entre las variables de entrada y de diseño del Modelo-A, debe ser analizado realizando una mayor cantidad de experimentos. Al contar con una mayor cantidad de resultados, sería posible desarrollar guías para la creación de un método único de análisis de estabilidad de taludes de la forma: “para un talud con ángulo de fricción menor a 30° debe usarse un valor de *hb* mayor a 0.5”.

- iii. De los gráficos de efectos principales (Gráfico 9.13 y Gráfico 9.19) se desprende que:
 - a. Las medias de los resultados para los taludes de suelo y roca son: 1,46 y 1,54 respectivamente. Ambos valores se encuentran por debajo de las referencias utilizadas. Al realizar una revisión manual detallada de los resultados (no se presenta en este informe) se observa que un número considerable de tratamientos posee bajos valores de FS ($FS < 1$), estos tratamientos tienen en común el uso de *wi*, *wd* y *hb* en sus niveles altos y *elem_type* en su nivel bajo, lo que sugiere la necesidad de utilizar elementos de alto orden en análisis de estabilidad de taludes de suelo. Pero para aseverar esto, se requiere realizar un mayor número de tratamientos.
- iv. De los gráficos de Pareto de regresión cuadrática (Gráfico 9.14, Gráfico 9.15, Gráfico 9.20 y Gráfico 9.21) y gráficos de interacción (Gráfico 9.16, Gráfico 9.17 y Gráfico 9.22) se menciona que:
 - a. Por lo general, los efectos principales tienen un rol más importante que los efectos de interacción, sobre el FS.
 - b. Existen efectos de interacción relevantes. Se destacan los efectos: ángulo de dilatación-*geom_type* y ángulo de dilatación-*elem_type*, en ambos taludes, cuyos gráficos de interacción muestran que las diferencias observadas en el FS, debido al ángulo de dilatación, se acentúan o disminuyen dependiendo de la de distribución y tipo de elemento adoptado en el método de análisis.
- v. De las tablas de ANOVA (Tabla 9.5 y Tabla 9.7) se obtiene que:
 - a. Más del doble de los parámetros considerados presentan un efecto estadísticamente significativo, sobre el factor de seguridad calculado. Esto ratifica la necesidad de generar un método unificado para evaluar la estabilidad de taludes, pues las decisiones de cada investigador inciden significativamente los resultados obtenidos.

9.6.1.2 Experimento-B

A partir de los resultados expuestos en la sección 9.4.2.2 se observa que:

- i. El tiempo de trabajo para analizar el modelo de suelo (Tabla 9.10) es 5 veces mayor al requerido para realizar los mismos tratamientos en el modelo de roca (Tabla 9.12). Esta es una condición repetitiva a lo largo de todos los experimentos desarrollados: el tiempo requerido para computar el FS en el modelo de suelo es notoriamente mayor al requerido en el modelo de roca. El promedio de todos los tratamientos se encuentra bajo los 5min. Este valor se considera alto para realizar análisis multivariables, con gran cantidad de puntos de diseño. El aumento del tiempo de computo hace presumir que algunos de los factores estudiados en este experimento, o la combinación de ellos, impactan los métodos de cálculo del software de elementos finitos.
- ii. Los gráficos de Pareto de regresión lineal (Gráfico 9.23 y Gráfico 9.27) muestran que:
 - a. Los factores estudiados en el experimento-B impactan el resultado, pero de menor manera, en promedio, que los factores considerados en el experimento-A. Es más, 2 de los 4 factores que poseen un impacto mayor al 10%, son factores repetidos en ambos experimentos.
 - b. El largo máximo de los elementos en el eje horizontal es el parámetro con mayor incidencia sobre el factor de seguridad, lo que se encuentra en

- concordancia con los resultados obtenidos en el experimento-A. Es más, el rango de sus niveles se incrementa en el experimento-B, por lo que se espera naturalmente un aumento en su impacto sobre los resultados.
- c. Destaca la importancia del uso de *step* tipo geostático, pues en su ausencia los resultados caen fuertemente, alejándose de la referencia.
 - d. La magnitud de los efectos es similar para ambos taludes y si bien, existen efectos con efectos opuestos, corresponden a los parámetros de menor significancia. Se concluye que no existen diferencias relevantes del efecto de los factores entre los casos de estudio.
- iii. De los gráficos de efectos principales (Gráfico 9.25, Gráfico 9.26, Gráfico 9.29 y Gráfico 9.30) se desprende que:
- a. Las medias de los resultados para los taludes de suelo y roca son: 1,40 y 1,36 respectivamente. Ambos valores se encuentran por debajo de las referencias utilizadas, y por debajo de las obtenidas en el experimento-A. Al realizar una revisión en detalle de los resultados (no se presentan en este informe) se observa que un número considerable de tratamientos presenta valores bajos de FS ($FS < 1$). Estos tratamientos tienen en común el uso de *bc*, *bc_der* y *fieldcond_use* en sus niveles altos y *geoste_use* y *lx* en su nivel bajo. Los resultados sugieren que el *step* geostático debe usarse solo cuando se han definido esfuerzos iniciales del talud y que la condición del borde derecho del talud (ver Figura 9.7) debe ser tipo rodillo, y vuelven a alertar sobre el impacto que tiene el tamaño de los elementos en el eje horizontal.
- iv. De los gráficos de Pareto de regresión cuadrática (Gráfico 9.24 y Gráfico 9.28) se menciona que:
- a. Los efectos de interacción juegan un rol importante en el FS, pero siempre bajo el efecto del factor *lx*. La variación de los resultados se explica en mayor medida por los efectos de interacción de las variables que por su efecto individual, y recalca la necesidad de realizar análisis estadísticos de mayor detalle para conocer las interacciones dobles, e incluso de mayor orden, entre los parámetros del método de reducción de la resistencia, incluidos en el Modelo-A.
- v. De las tablas de ANOVA (Tabla 9.11 y Tabla 9.13) se obtiene:
- a. La variación de los resultados no logra explicarse por los factores considerados. Este resultado es esperable, pues corresponden a factores de menor impacto, respecto a los considerados en el experimento-A.
 - b. No todos los parámetros considerados poseen una significancia estadística sobre los resultados computados. Considerando ambos experimentos A y B se recomienda realizar nuevos análisis de diseño factorial sobre las variables de mayor efecto, identificadas en el conjunto de tablas de ANOVA obtenidas.

9.6.2 Resultados visuales

Respecto a los resultados visuales (Figura 9.8, Figura 9.9 y Figura 9.10) se observa que:

- i. La zona de deformación plástica es curva, nace del pie del talud y crece conforme crece el valor de SRF.
- ii. La zona de deformación no alcanza la cresta de talud al obtenerse el SRF máximo de la simulación. Esto difiere con los resultados obtenidos por otros investigadores previamente. Se sugiere analizar el impacto de los parámetros del modelo sobre la zona de deformación plástica mediante métodos automatizados de análisis de imágenes. Esto permitiría también determinar la curvatura de la superficie de rotura y determinar si es, por ejemplo, circular.
- iii. Al considerar un tipo de elemento de mayor orden, se obtiene una superficie de deformación plástica de mayor longitud y, a diferencia del caso base, pasa levemente bajo el pie del talud. Además, como se obtuvo en resultados anteriores, este parámetro tiende a aumentar el FS computado. Se presupone que, al considerar elementos de mayor orden, por ejemplo, CPE8, se pudiera obtener la zona completa de deformación, de pie a cresta del talud, pero también un FS mayor, alejándose del valor de referencia.
- iv. Al disminuir las extensiones artificiales del modelo, existe una interacción entre la zona de deformación y los bordes del modelo, disminuyendo el FS computado y alejándose de la referencia.
- v. Las distribuciones de esfuerzo, deformación y desplazamiento complementan los resultados y permiten estudiar en detalle el progreso de la superficie de falla.

9.6.3 Efectos del ángulo de dilatancia

Respecto al comportamiento del factor de seguridad, al modificar el valor del ángulo de dilatancia, cuyos resultados se presentan en la sección 9.4.4 se cumple que:

- i. No existe una tendencia clara en los resultados. Los datos presentan un comportamiento errático y fuertemente variable.
- ii. Al ajustar la curva a un comportamiento exponencial, que es el mejor ajuste obtenido, se obtienen bajos coeficiente de determinación, en particular para el caso de suelo, por lo que no se considera un buen ajuste.
- iii. Considerando que el ángulo de dilatancia es el factor con mayor impacto sobre el FS computado se recomienda:
 - a. Realizar un estudio en detalle sobre este factor, considerando posibles efectos de interacción con el resto de los parámetros del modelo.
 - b. Determinar si el método de elementos finitos representa de manera correcta esta característica de los materiales.
 - c. Determinar si es útil utilizar un valor realista de este parámetro para realizar análisis de estabilidad de taludes.
 - d. Implementar un comportamiento variable de este parámetro, que permita capturar etapas iniciales de contracción del material.