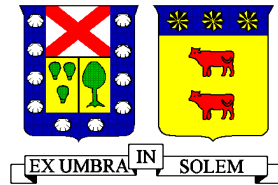


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



INFLUENCIA DEL TAMAÑO E INTENSIDAD DE FRACTURAS DE UN DFN EN LA ESTABILIDAD PARTICULAR DE UN TALUD

SCARLETT MONSERRAT ESTER DURÁN PÉREZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

Profesor Guía
Adeline Delonca

Profesor Co-referente
Santiago Marambio

Marzo de 2024

RESUMEN

Un modelo DFN, que hace referencia a las Redes de Fracturas Discretas, es una representación numérica de las discontinuidades que se encuentran en un macizo rocoso que se modelan utilizando datos de orientación, longitud, apertura y otros atributos de las fracturas reales en el terreno. El propósito fundamental del DFN es reproducir de forma explícita las fracturas en un espacio tridimensional, a través de un proceso estocástico que permite crear múltiples realizaciones equiprobables.

La importancia de considerar un DFN en la evaluación de estabilidad de taludes en una mina reside en que las fracturas son un factor clave que puede afectar significativamente la estabilidad del macizo rocoso porque aumentan el riesgo de deslizamiento y desprendimientos de rocas, especialmente en áreas con pendientes pronunciadas o bajo la influencia de fuerzas externas (gravedad o presión del agua subterránea). También, pueden facilitar la propagación de fallas geológicas y la infiltración de agua, lo que puede conducir a la erosión y la disolución de la roca.

En este contexto, el presente estudio tiene como propósito el profundizar en el efecto que tienen las diferentes variables que definen un DFN sobre la estabilidad de un talud. Con esto, se pretende dar un punto de partida para el entendimiento del efecto de los diferentes parámetros que definen un DFN en el desarrollo de modelos de análisis de estabilidad. Para lograrlo, se generarán DFNs a través del software Fracman®, experimentando con diferentes configuraciones de parámetros de entrada. Estos parámetros son principalmente relacionados a la intensidad y tamaño de fracturas, mientras que la orientación de estas se mantendrá invariable dentro de ciertos límites que aseguren la potencial generación de bloques.

Posteriormente, se llevará a cabo un análisis postproceso de características de los bloques estables e inestables obtenidos en los taludes analizados, con el propósito de cuantificar la estabilidad en función de diversas variables (volumen involucrado, altura, sobrequebre, etc.). Se destaca la influencia significativa de la orientación de las estructuras en la formación del sobrequebre del banco, superando incluso a la intensidad y tamaño de las fracturas. Por otro lado, la relación relativa de volúmenes y bloques inestables a escala banco varía según el nivel de fracturamiento del macizo rocoso y longitud de las estructuras presentes en él. Para bajas intensidades de fracturas y tamaños de estructuras grandes, se tiene que aumenta la probabilidad de generar bloques inestable, donde el macizo rocoso estará en un entorno con alta probabilidad de fallar, situándose en una condición con potencial de ser inestable.

ABSTRACT

A DFN model, which refers to Discrete Fracture Networks, is a numerical representation of discontinuities found in a rock mass, modeled using data such as orientation, length, aperture, and other attributes of real fractures in the field. The fundamental purpose of the DFN is to explicitly reproduce fractures in a three-dimensional space through a stochastic process that allows multiple equiprobable realizations to be created.

The importance of considering a DFN in the evaluation of slope stability in a mine lies in the fact that fractures are a key factor that can significantly affect the stability of the rock mass because they increase the risk of rock slippage and rock falls, especially in areas with steep slopes or under the influence of external forces (gravity or groundwater pressure). They can also facilitate the propagation of geological faults and water infiltration, which can lead to erosion and dissolution of the rock.

In this context, the present study aims to delve into the effect of different variables defining a DFN on slope stability. With this, it is intended to provide a starting point for the understanding of the effect of the different parameters that define a DFN in the development of stability analysis models. To achieve this, DFNs will be generated using Fracman® software, experimenting with different configurations of input parameters. These parameters primarily relate to the intensity and size of fractures, while fracture orientation will be kept invariant within certain limits to ensure potential block generation.

Subsequently, a post-processing analysis of stable and unstable block characteristics obtained in the analyzed slopes will be conducted to quantify the stability as function on various variables (volume involved, height, overbreak, etc.).

The significant influence of structure orientation on backbreak formation in the bench is highlighted, surpassing even the intensity and size of fractures. On the other hand, the relative ratio of volumes and unstable blocks on a bench scale varies according to the fracturing level of the rock mass and the length of structures present in it. For low fracture intensities and large structure sizes, the probability of generating unstable blocks increases, placing the rock mass in an environment with a high probability of failure, thus potentially unstable.

*Con cariño y amor, para mi hermano Benjamín.
Quién durante toda mi vida ha sido un pilar fundamental,
sin ti no estaría donde me encuentro y logrando esto al
día de hoy. Fuiste mi motivación con tu apoyo incondicional,
gracias por todo, eres muy importante para mí.*

También con todo mi amor para mi gatito Elliot.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a lo que ha sido este camino para llegar a ser una profesional. Camino el cual no ha sido fácil, donde me vi expuesta a diversos momentos que me hacen ser quien soy hoy en día y si no fuera por las personas que mencionaré a continuación, no sé si lo hubiera logrado.

Debo comenzar agradeciendo a mi familia, a mis padres Marjorie y Sergio, quienes me dieron todas las herramientas que estuvieron a su alcance para llegar a donde estoy. Gracias por su preocupación y entendimiento, siempre vi en sus ojos el orgullo que sentían con cada paso que daba en mi vida, a pesar de que no lo dijeran. Les amo demasiado.

Agradezco con todo mi amor a una de las personas más importantes en mi vida, mi hermano Benjamín, quien ha sido mi compañero en toda esta vida. Eres quien me escuchaba en los días difíciles, me motivó a seguir y siempre vio en mí lo mejor. Gracias por ser mi hermano y sentirte tan orgulloso de mí.

Agradezco a mis amigas del colegio, Daniela, Javiera y Rayen, quienes hasta el día de hoy entienden lo acotado de mis tiempos y cuando lográbamos vernos hacían de esos días lo mejor.

También, debo agradecer a mis amigos de la universidad: “Mesitas Verdes”, quienes fueron parte de este proceso. Hicieron que los días fueran mejores con su compañía tanto en esas tardes y noches de estudio, momentos de celebración por terminar las pruebas y más. Pero, agradezco en especial a mis mejores amigos, Ignacio Pino, Valeria Torres, y Constanza Morales; coincidir con ustedes fue lo mejor que me pudo pasar. Son una luz en mi vida; me mostraron una amistad desde otra perspectiva, los amo. No puedo dejar fuera a ese grupo de amigos que aparecieron en un momento que la verdad comencé a sentirme perdida, pensé en dejar ir todo lo que había logrado. Mis amigos de discord, que son una parte muy importante de mi vida, quienes me desconectan con su humor, salidas y grandiosa amistad. Hago mención especial a mi amiga Francisca, que a pesar de que llevamos una corta amistad ha sido muy importante y también, a mi pololo Martín, por quedarse noches y madrugadas haciéndome compañía mientras estudiaba, por decirme que podía lograrlo y por estar preocupado durante todo este proceso.

Agradezco a mis profesores, Rodrigo Estay y Adeline Delonca, por su entendimiento y grandes enseñanzas, gracias por motivarme a seguir y mostrarme desde otra perspectiva esta hermosa carrera. También, debo agradecer a Leslie Pérez, por quererme tanto y preocuparse por mí durante estos 6 años. Por último, agradezco sinceramente a Santiago Marambio, por guiarme en este proceso con dedicación y valiosos consejos. Su orientación fue fundamental para el desarrollo de esta memoria.

También quiero agradecer a Felipe Durán, por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este estudio en WSP. La cual fue la empresa que me abrió las puertas para comenzar a desarrollarme como futura ingeniera desde mi práctica profesional en el área de mecánica de rocas. Por otro lado, debo dar las gracias a mis compañeros de área, por su compañía y consejos durante todo este proceso.

Por último, siento que debo agradecerme a mí, por no rendirme en todo este proceso, finalmente puedo decirme a mí misma que lo logré y aunque me cueste creerlo seré la primera profesional de la familia.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. OBJETIVOS.....	12
1.2. ALCANCES.....	12
2. ANTECEDENTES	13
2.1. Generalidades	13
2.2. Estabilidad de taludes.....	13
2.3. Modos de falla cinemática.....	15
2.4. Modelo de Redes de Fracturas Discretas (DFN).....	18
2.5. Parámetros para la construcción de un modelo DFN	19
2.5.1. Intensidad de fracturas	19
2.5.2. Tamaño de fracturas	21
2.5.3. Orientación de fracturas	23
2.5.4. Generación y posicionamiento de fracturas	25
2.6. Análisis cinemático basado en DFN	25
2.7. Estimación de Backbreak a partir del análisis cinemático basado en DFN	26
3. METODOLOGÍA	28
3.1. Metodología tradicional para la construcción de modelos DFN.....	28
3.2. Metodología aplicada en este estudio para la construcción de modelos DFN	30
4. RESULTADOS.....	42
4.1. Caso 1: Sensibilización intensidad de fracturas a escala banco	42
4.2. Caso 2: Sensibilización tamaño de fracturas a escala banco.....	51
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
5.1. Caso 1: Sensibilización intensidad de fracturas a escala banco.....	58
5.2. Caso 2: Sensibilización tamaño de fracturas a escala banco.....	64
6. DISCUSIÓN	72
7. CONCLUSIONES	77
8. REFERENCIAS.....	78
9. ANEXO.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3 - 1: Resumen valores componentes geométricas del diseño interrampa.....	32
Tabla 3 - 2: Puntajes RMR89 llevados a Espaciamiento.	34
Tabla 3 - 3: Valores P10 para el estudio.	34
Tabla 3 - 4: Valores P32 para integrar al modelo DFN en Fracman.....	34
Tabla 3 - 5: Orientaciones medias de la familia preferencial.....	34
Tabla 3 - 6: Datos de entrada para la sensibilización del tamaño de fractura.	35
Tabla 3 - 7: Propiedades para el análisis cinemático.	37
Tabla 3 - 8: Valores para el tamaño de fractura aplicados al Caso 1.	40
Tabla 3 - 9: Valores para la intensidad aplicados al Caso 2.....	41
Tabla 4 - 1: Distancia Backbreak por iteración Modelo DFN 4.	42
Tabla 4 - 2: Distancia Backbreak P_{80} por Modelo DFN.	43
Tabla 4 - 3: Volumen por iteración Modelo DFN 4.....	44
Tabla 4 - 4: Relación porcentual volumen inestable sobre el total Modelo DFN 4.....	45
Tabla 4 - 5: Relación porcentual volumen inestable sobre el total P_{80} para cada Modelo DFN.	46
Tabla 4 - 6: Bloques totales e inestables por cada iteración Modelo DFN 4.	48
Tabla 4 - 7: Relación porcentual bloques inestables sobre el total por iteración del Modelo DFN 4.....	48
Tabla 4 - 8: Relación porcentual bloques inestable sobre el total para cada Modelo DFN.	49
Tabla 4 - 9: Distancia Backbreak por iteración del Modelo DFN 6.	51
Tabla 4 - 10: Distancia Backbreak P_{80} por Modelo DFN.	52
Tabla 4 - 11: Volumen total e inestable por iteración del Modelo DFN 6.....	53
Tabla 4 - 12: Relación volumen inestable respecto al total por iteración del Modelo DFN 6.	53
Tabla 4 - 13: Relación volumen inestable respecto al total por Modelo DFN.....	54
Tabla 4 - 14: Bloques totales e inestable por iteración del Modelo DFN 6.	55
Tabla 4 - 15: Relación bloques inestables respecto del total por iteración del Modelo DFN 6.	56
Tabla 4 - 16: Relación bloques inestables respecto del total por iteración del Modelo DFN 6.	56
Tabla 5 - 1: Resumen del volumen para el Modelo DFN 1 del Caso 1.	60

Tabla 5 - 2: Resumen del volumen para los Modelos DFN 6 y 16 del Caso 1.	61
Tabla 5 - 3: Resumen del volumen para el Modelo DFN 30 del Caso 1.	62
Tabla 5 - 4: Resumen de los bloques por los Modelos DFN 1, 6 y 30 del Caso 1.....	63
Tabla 5 - 5: Resumen del volumen para el Modelo DFN 1 del Caso 2.	66
Tabla 5 - 6: Resumen del volumen para el Modelo DFN 3 del Caso 2.	66
Tabla 5 - 7: Resumen del volumen para el Modelo DFN 8 del Caso 2.	67
Tabla 5 - 8: Resumen de los bloques por los Modelos DFN 1, 3 y 8 del Caso 2.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2 - 1: Partes de un talud.	14
Figura 2 - 2: Componentes geométricas de un talud minero. Fuente: MIN 232 - Modo de Falla.	15
Figura 2 - 3: Análisis Cinemático para el Mecanismo de falla tipo plana. Fuente: Hoek & Bray, 1981.....	16
Figura 2 - 4: Análisis Cinemático para el Mecanismo de falla tipo cuña. Fuente: Hoek & Bray, 1981.....	17
Figura 2 - 5: Bloque en plano inclinado.	17
Figura 2 - 6: Análisis Cinemático para el Mecanismo de falla tipo toppling Fuente: Hoek & Bray, 1981.	18
Figura 2 - 7: Realizaciones equiprobables pero diferentes de un modelo DFN en Fracman. ..	18
Figura 2 - 8: Modelo DFN a escala banco.	19
Figura 2 - 9: Medidas de intensidad de fracturas según su dimensión.....	20
Figura 2 - 10: Representación radio equivalente de fractura en Fracman.....	22
Figura 2 - 11: Distribución Lognormal para radios de fractura en Fracman.....	23
Figura 2 - 12: Proceso de validación para datos de terreno y muestra simulada con Bootstrap. Fuente: Esterhuizen, Guajardo, Jakubec, Pichuante & Thomas, 2022.	24
Figura 2 - 13: Análisis cinemático basado en DFN.	26
Figura 2 - 14: Definición del ángulo de inclinación y del ángulo efectivo ángulo, Ryan & Pryor (2000).	26
Figura 2 - 15: Estimación Backbreak análisis cinemático convencional, Fuente: Golder Associates, 2021.....	27
Figura 2 - 16: Estimación Backbreak análisis cinemático basado en DFN, Fuente: Golder Associates, 2021.....	27

Figura 3 - 1: Metodología generalizada para construcción de modelos DFN. Fuente: WSP, 2020.	28
Figura 3 - 2: Diagrama de la metodología aplicada al caso de estudio.	30
Figura 3 - 3: Componentes geométricas de un talud minero. Fuente: MIN 232 - Modo de Falla.	31
Figura 3 - 4: Componente geométrica Largo de Rampa.	32
Figura 3 - 5: Dimensiones región para generación de fracturas a escala banco.	33
Figura 3 - 6: Modelo DFN.	36
Figura 3 - 7: Representación gráfica de la variabilidad de volumen inestable respecto al total.	39
Figura 3 - 8: P_{80} para la variación del volumen inestable respecto al total.	39
Figura 3 - 9: Diagrama de los casos de estudio.	40
Figura 4 - 1: Grafica distancia Backbreak P_{80} para el Caso 1.	44
Figura 4 - 2: Rangos presencia relativa volumen inestable.	47
Figura 4 - 3: Relación porcentual volumen inestable sobre el total para el Caso 1.	47
Figura 4 - 4: Clasificación de la presencia relativa de volumen inestable para el Caso 1.	47
Figura 4 - 5: Rangos para la relación porcentual de bloques inestable sobre el total.	50
Figura 4 - 6: Relación porcentual de bloques inestables sobre el total para el Caso 1.	50
Figura 4 - 7: Clasificación presencia relativa de bloques inestables para el Caso 1.	50
Figura 4 - 8: Distancia Backbreak P_{80} para el Caso 2.	52
Figura 4 - 9: Relación porcentual del volumen inestable respecto al total para el Caso 2.	54
Figura 4 - 10: Clasificación de la presencia relativa de volumen inestable para el Caso 2.	55
Figura 4 - 11: Relación porcentual del bloques inestables respecto al total para el Caso 2.	57
Figura 4 - 12: Clasificación de la presencia relativa de volumen inestable para el Caso 2.	57
Figura 5 - 1: Límites distancia Backbreak P_{80} para el Caso 1.	58
Figura 5 - 2: Rangos presencia relativa de volumen inestable para el Caso 1.	59
Figura 5 - 3: Análisis cinemático del modelo DFN 1 del Caso 1.	60
Figura 5 - 4: Análisis cinemático de los Modelos DFN 6 y 16 del Caso 1.	61
Figura 5 - 5: Rangos para la presencia relativa de bloques inestables del Caso 1.	62
Figura 5 - 6: Variación de la cantidad de bloques por Modelo DFN del Caso 1.	63
Figura 5 - 7: Límites distancia Backbreak del Caso 2.	64

Figura 5 - 8: Rangos para la presencia relativa de volumen inestable del Caso 2.	65
Figura 5 - 9: Fracturas y análisis cinemático Modelo DFN 1 del Caso 2.	65
Figura 5 - 10: Fracturas y análisis cinemático Modelo DFN 3 del Caso 2.	66
Figura 5 - 11: Fracturas y análisis cinemático Modelo DFN 8 del Caso 2.	67
Figura 5 - 12: Rangos presencia relativa de bloques inestables del Caso 2.	68
Figura 5 - 13: Variación de la cantidad de bloques por Modelo DFN del Caso 2.	68
Figura 5 - 14: Matriz de variación de la presencia relativa de volumen inestable dado un rango P_{10}	70
Figura 5 - 15: Matriz de variación de la presencia relativa de bloques inestables dado un rango P_{10}	70
Figura 5 - 16: Matriz de variación de la presencia relativa de volumen inestable dado un rango de medial r_e	71
Figura 5 - 17: Matriz de variación de la presencia relativa de bloques inestables dado un rango de medial r_e	71

ÍNDICE DE ANEXO

Anexo 9 - 1: Distancia Backbreak por iteración del Modelo DFN 4.	81
Anexo 9 - 2: Volumen por iteración del Modelo DFN 4.	82
Anexo 9 - 3: Relación porcentual volumen inestable sobre el total del Modelo DFN 4.	83
Anexo 9 - 4: Bloques totales e inestables por iteración del Modelo DFN 4.	84
Anexo 9 - 5: Relación porcentual bloques inestables respecto al total por iteración del Modelo DFN 4.	85
Anexo 9 - 6: Distancia Backbreak por iteración del Modelo DFN 6.	87
Anexo 9 - 7: Volumen total e inestable por iteración del Modelo DFN 6.	88
Anexo 9 - 8: Relación volumen inestable sobre el total por iteración del Modelo DFN 6.	89
Anexo 9 - 9: Bloques totales e inestables por iteración del Modelo DFN 6.	90
Anexo 9 - 10: Relación de bloques inestables sobre el total por iteración del Modelo DFN 6.	91

1. INTRODUCCIÓN

En minería a cielo abierto, el mapeo estructural se enfrenta a desafíos que dificultan la recopilación de datos de manera sencilla. Estos desafíos a menudo resultan en omisiones en la identificación de fracturas como fallas y juntas, además de limitaciones en la medición del tamaño de estas. Esto podría implicar en futuros riesgos en la operación debido a posibles mecanismos de falla que ocurran dada la proyección de estructuras no medidas. Así, la correcta medición de estructuras desempeña un papel fundamental en la evaluación de las condiciones de estabilidad de los taludes.

La evaluación de estabilidad de taludes varía según la escala (banco, multi-bancos y global), magnitud y tipo de falla esperada. Además del tipo y escala de falla, un análisis de estabilidad dependerá de las propiedades de los materiales que lo conforman (*Read and Stacey, 2009*).

En la realidad, el macizo rocoso es tridimensional (3D), por lo tanto, las discontinuidades deberían caracterizarse de igual manera. Sin embargo, la dificultad reside en que, dado los recursos limitados, no es posible obtener la totalidad de la información al momento de examinar el macizo rocoso. Por lo tanto, las propiedades de las discontinuidades deben estimarse a partir de diferentes fuentes de información como mapeos geotécnicos superficiales y en profundidad (sondajes). Un subproducto de esta información son los modelos DFN que se define como una red de fracturas discretas.

En geomecánica, DFN se refiere a un modelo o representación de una red de fracturas discretas en una masa rocosa, el cual se compone de una serie de fracturas individuales que están interconectadas en una configuración geométrica compleja, las cuales se caracterizan por su orientación, tamaño, forma, intensidad y ubicación en el espacio tridimensional (*Dershowitz y Einstein, 1988; Dverstop y Andersson, 1989*).

La modelación de DFN figura como una solución viable para lograr una representación realista de las fracturas. Esta herramienta permite visualizar y analizar la distribución espacial de estructuras según cómo fueron identificadas, a través de un modelo geométrico que integra las propiedades mecánicas, hidráulicas y geométricas.

La correcta definición de los parámetros que definen un DFN entrega como resultado una generación de modelos, los cuales pueden ser utilizados para capturar la complejidad y variabilidad de las fracturas en la naturaleza y ser una herramienta de representación realista del sistema de fracturas estudiado.

En este contexto, el presente estudio tiene como propósito profundizar en el efecto que tienen las variables tamaño e intensidad de fracturas de un DFN sobre la estabilidad de un talud a

escala banco. Este trabajo pretende ser un punto de partida para comprender cómo estos parámetros influyen en el análisis de estabilidad de un talud a partir de modelos DFN. Para ello, se empleará una metodología que consiste en la generación de modelos DFN a través del software Fracman® (WSP), variando una sola variable a la vez, para luego realizar un análisis cinemático a través de múltiples iteraciones. Posteriormente, se examinará la estabilidad de los bloques en cada iteración, y finalmente se realizará un análisis estadístico de resultados obtenidos.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVOS GENERALES

- Realizar un análisis de sensibilidad para intensidad y tamaño de fracturas de una Red de Fracturas Discretas (DFN) para evaluar su influencia en la estabilidad particular a escala banco en un talud.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar rangos de mayor influencia de valores para los parámetros inputs de modelos DFN, lo que puede mejorar la precisión de las predicciones de estabilidad del talud.
- Generar DFNs usando el Software Fracman®.
- Evaluar la relación volumen inestable/volumen total y bloques inestables/bloques totales respecto a la variación del tamaño e intensidad de fracturas de un DFN.
- Evaluar cómo se comporta la estimación de la distancia backbreak al momento de variar el tamaño e intensidad de fracturas de un DFN.
- Generar matrices de variabilidad que permitan visualizar el efecto en la estabilidad que tienen diferentes valores del parámetro evaluado.

1.2. ALCANCES

- El estudio se limita a estudiar la influencia de las Redes de Fracturas Discretas (DFN) a escala banco.
- No se evalúa la influencia de otros parámetros que definan un DFN, que no sean la intensidad y el tamaño de fracturas.
- La interpretación de los resultados del análisis de estabilidad puede ser compleja y estar sujeta a sesgos o suposiciones, lo que podría afectar la validez de las conclusiones del estudio.
- Los tiempos de modelamiento por cada caso de sensibilización limitan el poder evaluar casos extremos para seguir evaluando su comportamiento.
- Al no poseer una base de datos real, se trabaja en base a suposiciones y datos conocidos para escalar las variables integradas al estudio.

2. ANTECEDENTES

2.1. Generalidades

La minería a cielo abierto es una técnica de extracción de minerales que implica la remoción de grandes cantidades de material superficial para acceder a depósitos minerales que están bajo tierra. Este tipo de minería ofrece una variedad de ventajas en términos de accesos a grandes depósitos de minerales y costos operativos relativamente bajos; también plantea desafíos significativos en aspectos de seguridad, ambientales, geomecánicos, entre otros.

La geomecánica desempeña un papel crucial en la minería a cielo abierto, ya que se centra en el estudio de la interacción entre las rocas y las estructuras mineras bajo condiciones de carga y tensión.

Los problemas geomecánicos que se presentan durante el desarrollo de las etapas pueden tener un impacto significativo en la seguridad de los trabajadores como en la estabilidad de las operaciones mineras. Estos problemas pueden surgir debido a la naturaleza de las formaciones geológicas, la interacción de las rocas con el ambiente circundante y las actividades de extracción mismas. Algunos de los problemas geomecánicos más comunes incluyen la estabilidad de taludes, subsidencia del terreno, hidrogeológicos y riesgos geotécnicos.

La comprensión y gestión efectiva de estos problemas geomecánicos son esenciales para garantizar la seguridad de los trabajadores y la viabilidad a largo plazo de las operaciones mineras a cielo abierto. Mediante la implementación de prácticas de ingeniería adecuadas, monitoreo y mitigación de riesgos, es posible minimizar los impactos geomecánicos y promover operaciones mineras más seguras y sostenibles.

2.2. Estabilidad de taludes

En el estudio de la estabilidad de los taludes se abordan fenómenos de estado último o de rotura de material. Los agentes externos responsables de la inestabilidad son una fuerza de masa, el peso y, eventualmente, los efectos de filtración, a los cuales hay que añadir otros factores como las sobrecargas estáticas o dinámicas (*Díaz, Sobrecases & Valiente, 2016*).

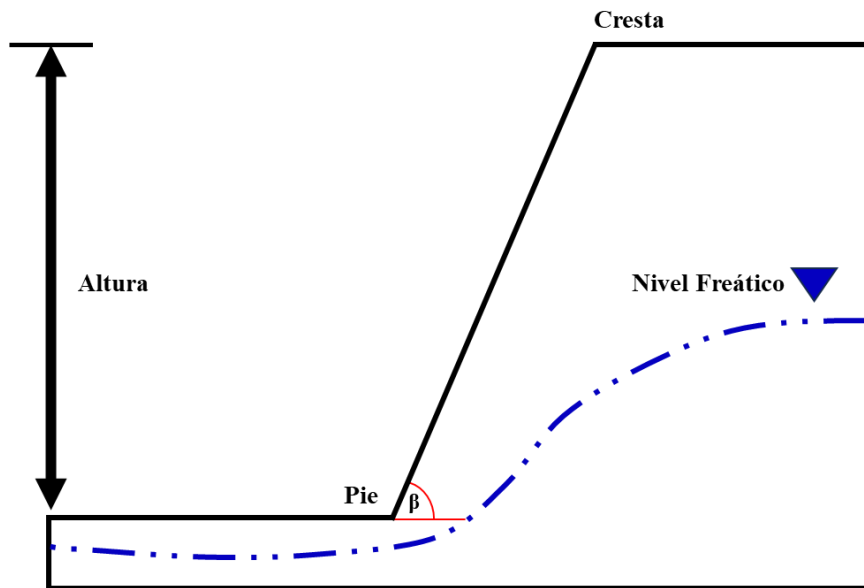


Figura 2 - 1: Partes de un talud.

Al momento de analizar los fenómenos de inestabilidad en taludes, es necesario identificar y caracterizar los distintos tipos de comportamiento, además de clasificarlos oportunamente. La evaluación adecuada del tipo de rotura permite optimizar las medidas de contención y estabilización de taludes, ya que se ajusta al mecanismo de acción como la velocidad y sus dimensiones. Es así como la estabilidad de taludes depende de ciertos factores que van a influenciar en la condición de los planos de rotura y deslizamientos de rocas potenciales. Entre estos factores podemos encontrar:

- Factores geométricos: El diseño del talud según la inclinación, altura y ancho de los bancos influenciará considerablemente en el comportamiento del macizo rocoso al momento de evaluar las condiciones de estabilidad.
- Factores geológicos estructurales: La presencia de estructuras como fallas y discontinuidades condicionan la formación de planos, zonas de debilidad y anisotropía en el macizo rocoso.
- Factores hidrogeológicos: Cuando un talud cuenta con la presencia de agua, disminuye la resistencia del macizo rocoso y se potencian las fuerzas que facilitan la formación de inestabilidades.
- Factores geomecánicos: Las propiedades resistentes de las discontinuidades y del macizo rocoso son las que controlan su comportamiento mecánico, por lo tanto, en función de las características del macizo rocoso, red de fracturamiento y materiales, entre otros, la resistencia de la superficie se verá influenciada.

En minería a cielo abierto existen tres escalas que permiten describir las características de los taludes. Estas escalas se refieren a diferentes niveles de la configuración de los taludes en una mina y son importantes para evaluar la estabilidad de las paredes de la mina y minimizar los riesgos de colapso.

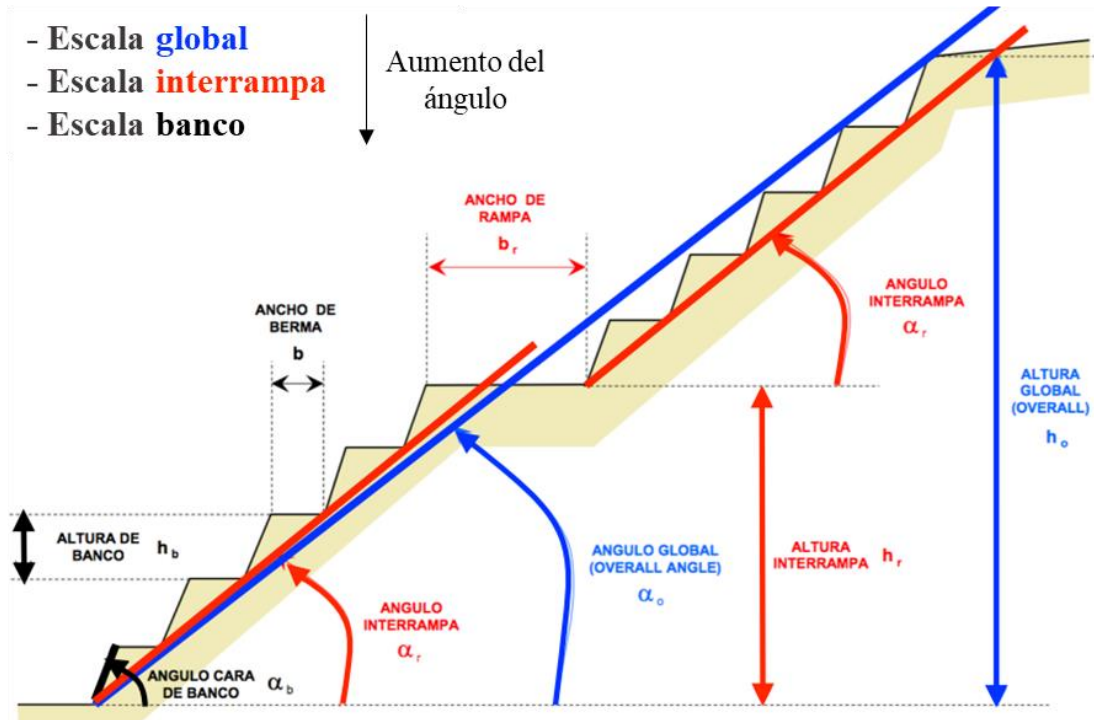


Figura 2 - 2: Componentes geométricas de un talud minero. Fuente: MIN 232 - Modo de Falla.

- **Escala banco:** Se refiere a la altura de cada banco o piso escalonado en una mina a cielo abierto. La estabilidad de los bancos es crucial para garantizar la seguridad de los trabajadores y el equipo en la mina.
- **Escala interrampa:** Se refiere a la inclinación entre los bancos individuales en una mina a cielo abierto. El interrampa es el ángulo entre dos bancos adyacentes y juega un papel importante en la estabilidad de taludes.
- **Escala global:** Se refiere a la inclinación general o global del talud de la mina a cielo abierto. Esta escala considera la inclinación total de la pared de la mina desde el pie del talud hasta la cresta.

2.3. Modos de falla cinemática

Los modos de falla cinemática se entienden como la forma específica en la que un sistema, componente o estructura puede romperse, fallar o colapsar debido a una combinación de circunstancias adversas. Estos mecanismos son esenciales en la ingeniería y diseño, ya que comprender cómo y por qué puede fallar un sistema permite tomar medidas preventivas para evitar peligros.

Estos mecanismos de falla, como los deslizamientos de rocas o suelos, pueden ocurrir a diferentes escalas dentro de una mina a cielo abierto, como a escalas de banco e interrampa.

Cada sistema o componente puede tener varios modos de falla posibles. Así, es importante identificarlos y analizarlos para asegurarse de que se tomen medidas para minimizar los riesgos. Los modos de falla pueden ser causados por diversos factores, como tensiones excesivas, desgaste, corrosión, defectos en el diseño, errores humanos, cambios en las condiciones operativas, entre otros.

Por otro lado, los diferentes tipos de fallas están condicionados por el grado de fracturación del macizo rocoso y por la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto al talud (González de Vallejo, 2002). Los modos de falla más comunes son:

- Falla plana: Tipo de inestabilidad más común en taludes de roca, la cual se da cuando una masa rocosa desliza respecto al resto del macizo rocoso a través de una discontinuidad que aflora en el exterior del talud, presentándose una superficie de contacto entre la masa deslizante y el macizo rocoso durante todo el fenómeno (Hoek & Bray, 1981).

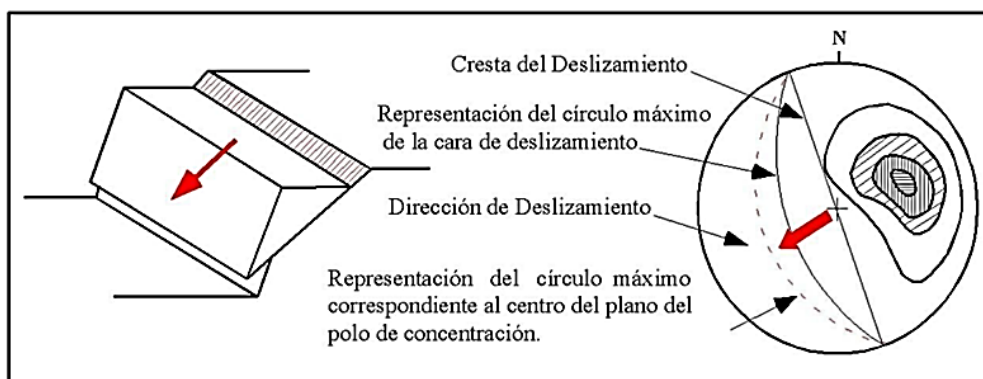


Figura 2 - 3: Análisis Cinemático para el Mecanismo de falla tipo plana. Fuente: Hoek & Bray, 1981.

- Falla cuña: Tipo de deslizamiento controlado por dos o más discontinuidades que están a favor de una línea de intersección que a su vez buza a favor de la cara del talud en un ángulo oblicuo, formando un bloque en forma de cuña (Hoek & Bray, 1981).

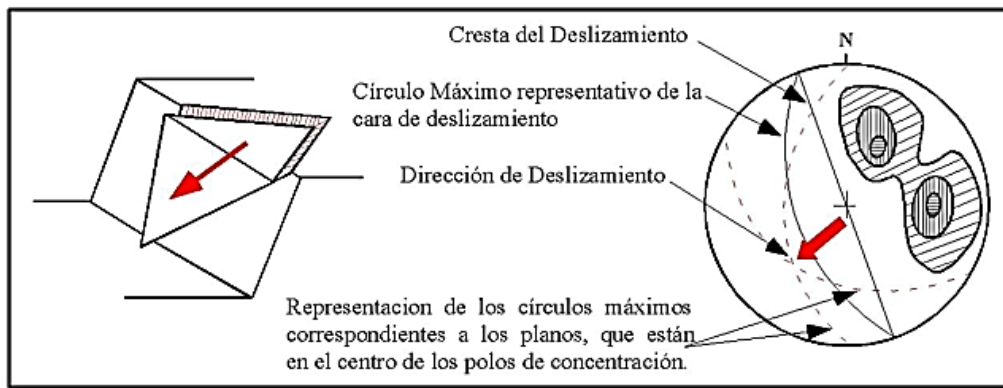


Figura 2 - 4: Análisis Cinemático para el Mecanismo de falla tipo cuña. Fuente: Hoek & Bray, 1981..

- Falla toppling: Se produce en taludes de macizos rocosos donde los estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o subparalela al mismo. (Hoek & Bray, 1981).

En general, aquí la inestabilidad cinemática se produce cuando las condiciones conducen a la rotación hacia delante de un bloque de roca relativamente alto y estrecho, como el de la Figura 2-5. Este bloque puede “fallar” de varias maneras como:

- Deslizamiento hacia abajo del plano inclinado que soporta el bloque.
- Toppling al caer hacia adelante.
- Deslizamiento y toppling.

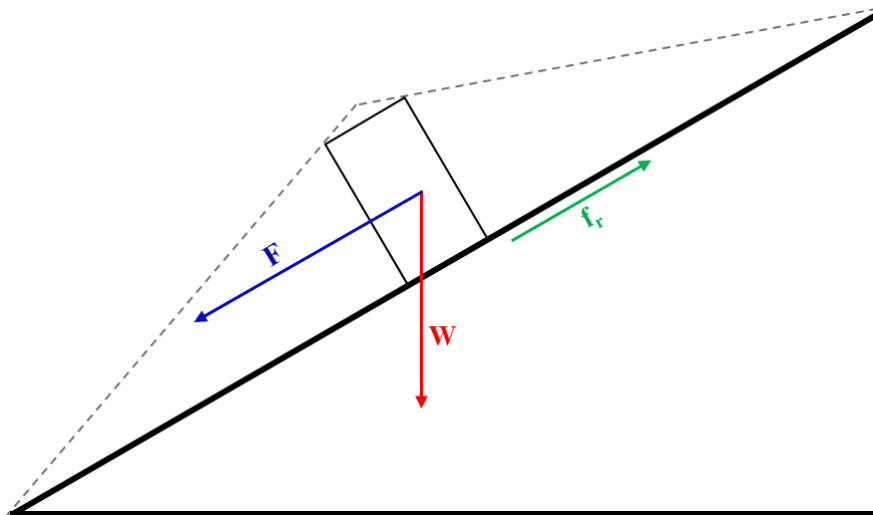


Figura 2 - 5: Bloque en plano inclinado.

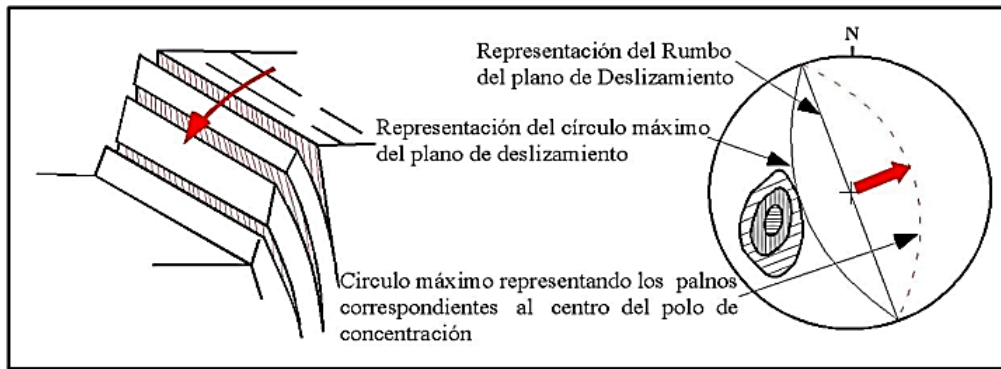


Figura 2 - 6: Análisis Cinemático para el Mecanismo de falla tipo toppling Fuente: Hoek & Bray, 1981.

2.4. Modelo de Redes de Fracturas Discretas (DFN)

En geomecánica, DFN se refiere a un modelo o representación de una red de fracturas discretas en una masa rocosa, el cual se compone de una serie de fracturas individuales que están interconectadas en una configuración geométrica compleja (Dershowitz & Einstein, 1988; Dverstop & Andersson, 1989).

Los modelos DFN son procesos estocásticos que permiten crear realizaciones múltiples pero equiprobables, lo que significa que incorporan elementos de aleatoriedad o incertidumbre en su formulación y análisis. En estos modelos, las fracturas se representan como objetos discretos en lugar de considerar el medio rocoso como continuo, lo que permite capturar la naturaleza aleatoria y heterogénea de la distribución de las fracturas en el subsuelo.

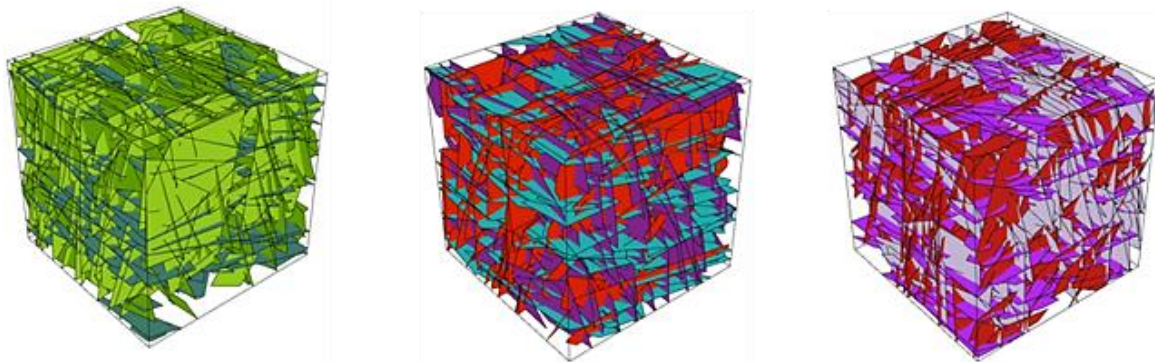


Figura 2 - 7: Realizaciones equiprobables pero diferentes de un modelo DFN en Fracman.

Un DFN se caracteriza por su orientación, tamaño, forma, intensidad y ubicación en el espacio tridimensional. Estos parámetros se obtienen a partir de datos recopilados en el campo, como registros de perforación, imágenes de fracturas, análisis estereográficos, etc. Luego, se utilizan métodos estadísticos para generar una representación realista de la red de fracturas en el macizo rocoso.

Esta herramienta permite visualizar y analizar la distribución espacial de estructuras según cómo fueron identificadas, a través de un modelo geométrico que integra las propiedades mecánicas, hidráulicas y geométricas.

Los modelos DFN tienen una variedad de aplicaciones según la industria en la cual se esté desarrollando, desde su utilización para evaluar la exploración y producción de hidrocarburos, análisis y modelamiento de fracturas, evaluación de puentes de roca y estabilidad del macizo rocoso, predicción del flujo de agua subterránea, entre otros.

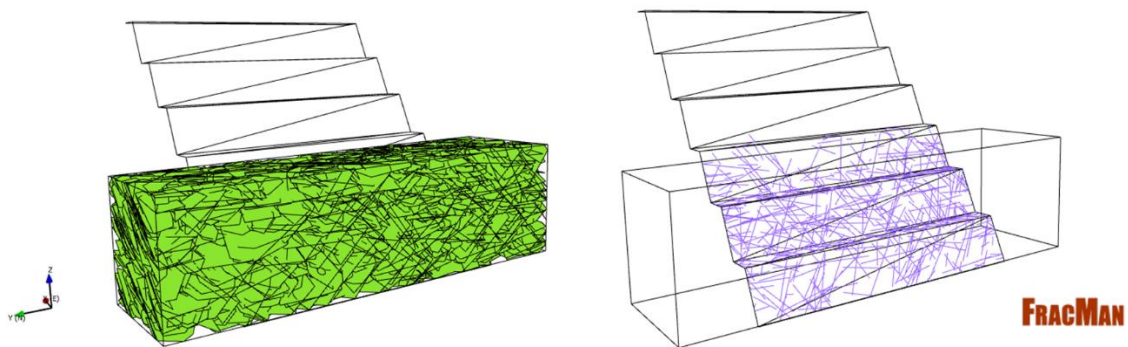


Figura 2 - 8: Modelo DFN a escala banco.

2.5. Parámetros para la construcción de un modelo DFN

Para la construcción de un modelo DFN se requiere definir ciertas propiedades de fracturas. Las propiedades más importantes para generar un modelo DFN son:

2.5.1. Intensidad de fracturas

La intensidad de fracturas se refiere, en términos simples, a la cantidad de fracturas presentes en una masa rocosa determinada. Las medidas tradicionales de intensidad de fractura ignoran los complejos problemas de sesgo de orientación, disposición espacial y tamaño de discontinuidad.

Las medidas de intensidad de fracturas se clasifican en función de la dimensión de la región de medición y la dimensión de la medida de fractura. Dado lo anterior, la intensidad de fractura se caracteriza en los siguientes términos según *Dershowitz, 1984*:

- P_{10} : Intensidad de fractura lineal, expresada como el número de fracturas por unidad de longitud. La cual es una medida unidimensional registrada según la posición de intersecciones de fracturas a lo largo de una línea en la región de interés, como eje central para sondajes, etc. (*Dershowitz, Hermanson, Follin & Mauldon, 2000*).

- P_{32} : Densidad volumétrica de fracturas, expresada como la suma de las áreas de superficies unilaterales del número de polígonos de n-lados por unidad de área, en unidades de L^2/L^3 .

En otras palabras, corresponde al área de fracturas en un volumen determinado. El P_{32} es la métrica de intensidad más útil para descripciones geométricas, además este parámetro no depende de la escala, ya que incorpora directamente el tamaño de la fractura y, a diferencia del P_{10} , este no tiene sesgo en la dirección de medición. Sin embargo, es extremadamente difícil de medir P_{32} , por lo cual se estima analíticamente o se calcula mediante simulación estocástica basada en otras métricas como P_{21} o P_{10} . (Dershowitz, Hermanson, Follin & Mauldon, 2000).

- P_{33} : Porosidad de fractura, expresada como la suma del área de superficie unidireccional para una fractura dada, multiplicada por su apertura geológica, por unidad de volumen, en unidades de L^3/L^3 (adimensional). El P_{33} es sumamente difícil de medir en realidad, ya que requiere no solo conocimiento de las distribuciones de tamaño e intensidad de fracturamiento, sino también información adicional sobre la distribución de apertura de fractura. Generalmente, es un resultado de la modelización de fracturas. (Dershowitz, Hermanson, Follin & Mauldon, 2000).

La Figura 2-9 muestra un resumen de todas las medidas de intensidad según su dimensión.

		Dimensión de Medida				
		0D (cantidad)	1D (largo)	2D (área)	3D (volumen)	
Dimensión de la Muestra	1D (sondaje, línea de mapeo, etc.)	P_{10} Nº de fracturas por unidad de largo de sondaje	P_{11} Largo de fracturas por unidad de largo			Medidas Lineales
	2D (mapeo de caras, afloramientos, etc.)	P_{20} Nº de fracturas por unidad de área	P_{21} Largo de fracturas por unidad de área	P_{22} Área de fracturas por área		Medidas de Superficie
	3D (Volumen)	P_{30} Nº de fracturas por unidad de volumen		P_{32} Área de fracturas por unidad de área	P_{33} Volumen de fracturas por unidad de volumen	Medidas Volumétricas
		Densidad		Intensidad	Porosidad	

Figura 2 - 9: Medidas de intensidad de fracturas según su dimensión.

Para el caso de esta memoria, para definir la intensidad de fracturas en Fracman se utiliza el P_{32} , el cual es un parámetro crítico para entender cómo un macizo rocoso se fragmenta y que se puede definir según *Dershowit & Herda, 1992*:

$$P_{32} = P_{10} \times C_{p3} \quad \text{Ec. 1}$$

- P_{10} , corresponde a la frecuencia de fracturas por metro (FF/m).
- C_{p3} , es una constante de proporcionalidad entre el espaciamiento y la intensidad media, que suele variar entre 1 y 3 para la mayoría de las fracturas (*Dershowitz & Herda, 1992*).

Como el P_{32} es un parámetro difícil de estimar, se escalará según valores de frecuencia de fractura (P_{10}) y un C_{p3} de 2, según la media calculada en el rango que suele variar. Finalmente, la ecuación para obtener el P_{32} aplicada a este caso de estudio queda de la siguiente manera:

$$P_{32} = 2 \times P_{10} \quad \text{Ec. 2}$$

2.5.2. Tamaño de fracturas

Se relaciona directamente con el tamaño de la discontinuidad que se observa en la cara libre del talud o corte, donde se asume de manera teórica que tienen forma circular, simulando una extensión finita y variable dentro de los modelos (*Warburton, 1980*).

El tamaño de fractura en Fracman se puede definir como radio equivalente o como longitud, a través de diferentes distribuciones de probabilidad que permiten especificar el tamaño, relación y propiedades de las fracturas dada la variabilidad de dicho parámetro.

El radio equivalente, r_e , se define como el radio del círculo con un área igual al área del polígono, A_f , que representa la fractura (Ec. 3 y Figura 2-10).

$$A_f = \pi \times r_e^2 \quad \text{Ec. 3}$$

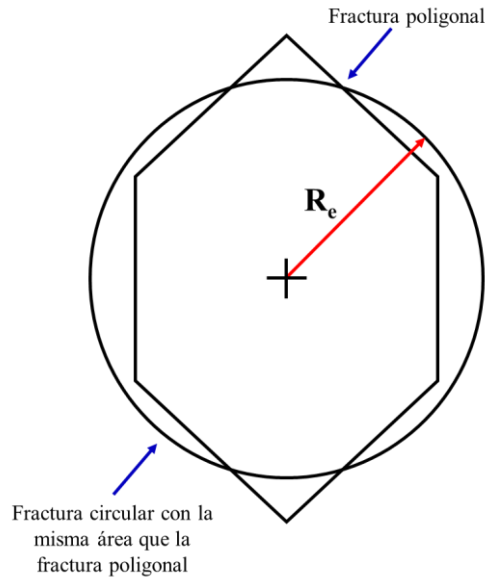


Figura 2 - 10: Representación radio equivalente de fractura en Fracman.

En esta memoria, al momento de definir la distribución de probabilidad que definirá los valores escalares de tamaño de fractura en Fracman, se utilizará la Distribución Log-Normal. Esta se caracteriza por tener una forma asimétrica y sesgada hacia la derecha en su función de densidad de probabilidad. La función de densidad de probabilidad de una distribución Log-Normal se define como:

$$f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- x , es la variable aleatoria.
- μ , es la media de la distribución.
- σ , es la desviación estándar de la distribución.
- e , es la basa del logaritmo natural.
- π , es la contante de pi (aproximadamente 3.14159).

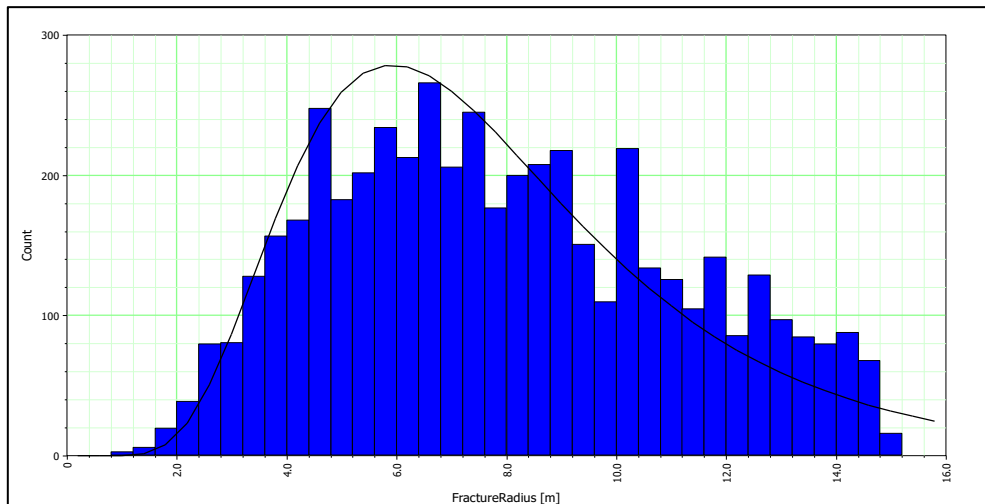


Figura 2 - 11: Distribución Lognormal para radios de fractura en Fracman.

En resumen, el tamaño de un DFN se refiere a las características dimensionales de una red de fracturas discretas y es una parte fundamental en la caracterización y modelado de sistemas de fracturas en geología y geomecánica.

2.5.3. Orientación de fracturas

Se refiere a la orientación del plano de la junta en el espacio expresado por rumbo y buzamiento, o dirección de buzamiento y buzamiento, o la orientación del polo con coordenadas esféricas. (*Dershowitz & Einstein, 1988*).

La orientación de las fracturas puede estar influenciada por factores como la tectónica regional, el tipo de roca, la geometría del cuerpo rocoso y los procesos de carga y deformación a lo largo del tiempo. Se han desarrollado diferentes métodos para determinar la orientación de fracturas como el mapeo geológico en terreno, el análisis de imágenes y el uso de técnicas de registro y análisis de datos geofísicos.

Para integrar la orientación de fracturas, Fracman proporciona cinco tipos de distribuciones de probabilidad (*Constant, Fisher, Normal, Bingham y Bootstrap*) para variables direccionales, las cuales se expresan en términos de sus funciones de densidad.

Para esta memoria, se utiliza la distribución de probabilidad Bootstrap, la cual es una técnica de simulación de Monte Carlo. El Bootstrap permite utilizar datos de orientación en el modelo para la generación de fracturas, donde se selecciona el conjunto de datos a analizar. Con el método Bootstrap, los datos de orientación tomados en terreno se eligen aleatoriamente, cuya probabilidad de elección es igual a $1/n$. Una vez elegido un valor, se aplica un factor de dispersión para mantener el carácter estocástico del modelo; finalmente, este proceso se repite para cada fractura creada en la simulación (*Dershowitz, 2004*).

El muestreo Bootstrap a partir de los datos corregidos se puede validar mediante el muestreo de las fracturas generadas por este método con un sondeo y comparando esta muestra simulada con los datos utilizados para el Bootstrap (Figura 2-12).

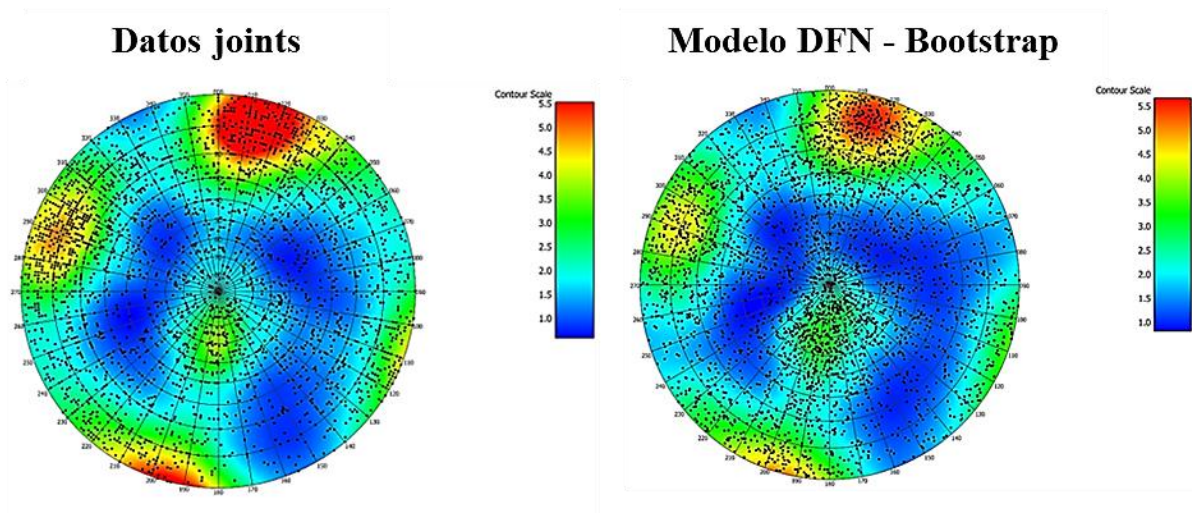


Figura 2 - 12: Proceso de validación para datos de terreno y muestra simulada con Bootstrap. Fuente: Esterhuizen, Guajardo, Jakubec, Pichuante & Thomas, 2022.

El muestreo bootstrap utilizado para la generación de DFN reproduce no solo los patrones estructurales principales, sino también el trasfondo de discontinuidades aleatorias.

Las orientaciones de fracturas pueden variar significativamente, por lo cual se pueden especificar en términos de ángulos y direcciones.

Un término muy utilizado en geología estructural para describir la orientación de fracturas, fallas y otras estructuras es el “*trend*” y “*plunge*”.

- “*Trend*”: Se refiere a la dirección horizontal en la que se encuentra una estructura geológica. Se mide en grados, generalmente en sentido horario desde el norte, y se describe utilizando la brújula.
- “*Plunge*”: Es el ángulo vertical que existe entre la horizontal de una estructura geológica. Indica en qué dirección se inclina una estructura hacia arriba o hacia abajo. Se mide en grados y dependiendo de cómo se incline, puede ir hacia el norte, sur, este u oeste.

Por lo tanto, los términos “*trend*” y “*plunge*” describen tanto la dirección horizontal como la inclinación vertical de la fractura. Esto proporciona una explicación detallada de la orientación del espacio de la fractura tridimensional.

2.5.4. Generación y posicionamiento de fracturas

Se refiere a la manera en que se generan y ubican las fracturas en un espacio determinado. Fracman cuenta con tres algoritmos de generación de fracturas para definir la distribución de probabilidad de este parámetro: “*The Enhanced Beacher Model*”, “*The Nearest Neighbor Model*” y “*The Levy-Lee Fractal Model*”.

Para esta memoria se utiliza el método estocástico “*The Enhanced Beacher Model*”, el cual se utiliza para simular la formación de fracturas en el subsuelo. En este método se generan fracturas de manera uniforme en el espacio mediante un proceso de Poisson, el cual proporciona una disposición para terminaciones y formas de fracturas más diversas, lo que hace más flexible y útil en la simulación de sistemas geológicos con fracturas.

2.6. Análisis cinemático basado en DFN

El análisis cinemático simula la estabilidad de bloques en pendientes, lo que permite la evaluación probabilística de la estabilidad cinemática en excavaciones de roca en superficie y subterráneas. Este calcula un ancho de derrame asociado con cada bloque utilizando el método descrito en *Gibson, 2006*.

A través de la herramienta “*Rockwedge*” de Fracman, se realiza el análisis cinemático combinado con métodos probabilísticos basados en DFN, el cual identifica los bloques que son geométricamente posibles y, al mismo tiempo, determina su probabilidad de formación. Este método no hace suposiciones ni limitaciones del sistema de fractura o su potencial formación de bloques. Además, se basa en evaluar la estabilidad de todos los bloques o cuñas formados únicamente por uno o dos conjuntos de fracturas, que se espera que se formen para una geometría de banco determinada.

La hipótesis subyacente es que siempre se formará la cuña más grande posible para un conjunto definido de entradas y tendrá el potencial de fallar, siempre que la cuña sea cinemáticamente admisible.

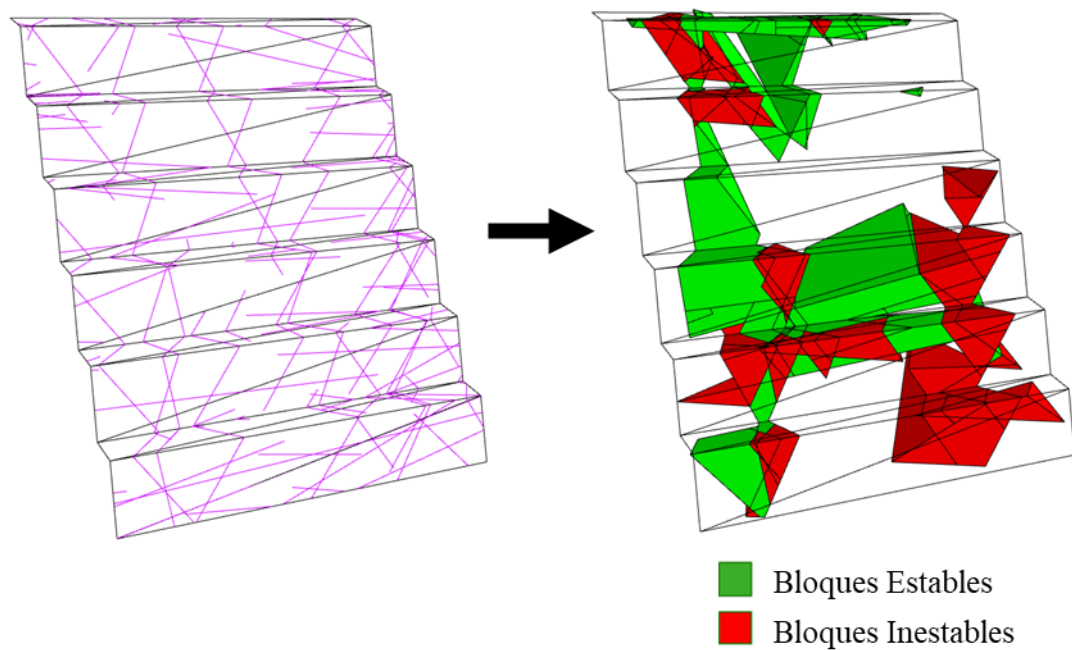


Figura 2 - 13: Análisis cinemático basado en DFN.

2.7. Estimación de Backbreak a partir del análisis cinemático basado en DFN

El backbreak (o quiebre) se refiere al fenómeno en el cual parte del material de la pared no deseado se rompe y se proyecta hacia atrás dentro de una excavación, cavidad o túnel durante una operación de excavación o voladura. Es un término comúnmente utilizado en minería, construcción de túneles y otras actividades de excavación subterránea.

La magnitud de quiebre y el ángulo de la cara del banco (Figura 2-14) están controlados por las discontinuidades y fallas que interceptan el banco, donde la estabilidad de estas estructuras está controlada por una variedad de factores.

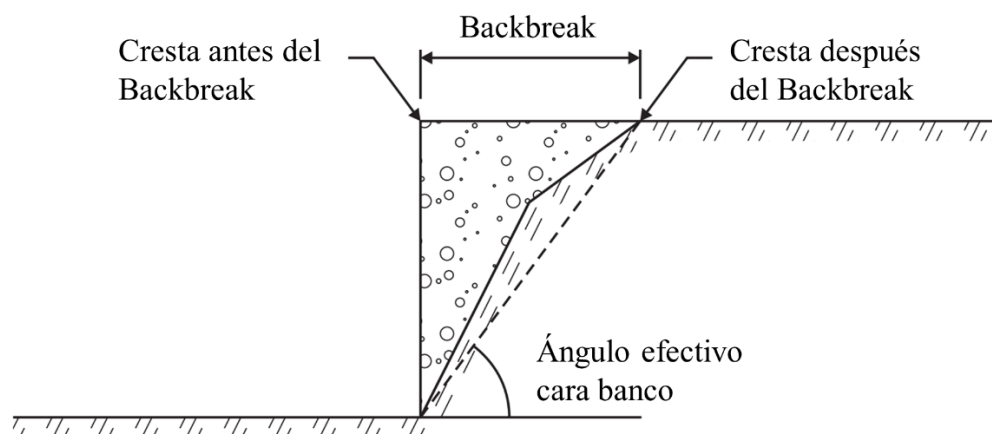


Figura 2 - 14: Definición del ángulo de inclinación y del ángulo efectivo ángulo, Ryan & Pryor (2000).

La estimación de backbreak basado en DFN en Fracman implica simular el comportamiento de la roca circundante a una excavación o voladura, considerando la presencia y distribución de fracturas en el macizo rocoso.

El análisis convencional de la fractura se basa en medir la distancia desde el inicio de la cresta del banco al vértice más externo de la cuña, en cambio, en DFN tienen una variedad de métricas de backbreak según la geometría de cuña más compleja (Figura 2-15 y 2-16).

- Medidas hasta el vértice en la parte superior.
- Slices o Cortes (capturando la variación del backbreak).
- Medidas de área (rendimiento general del banco).

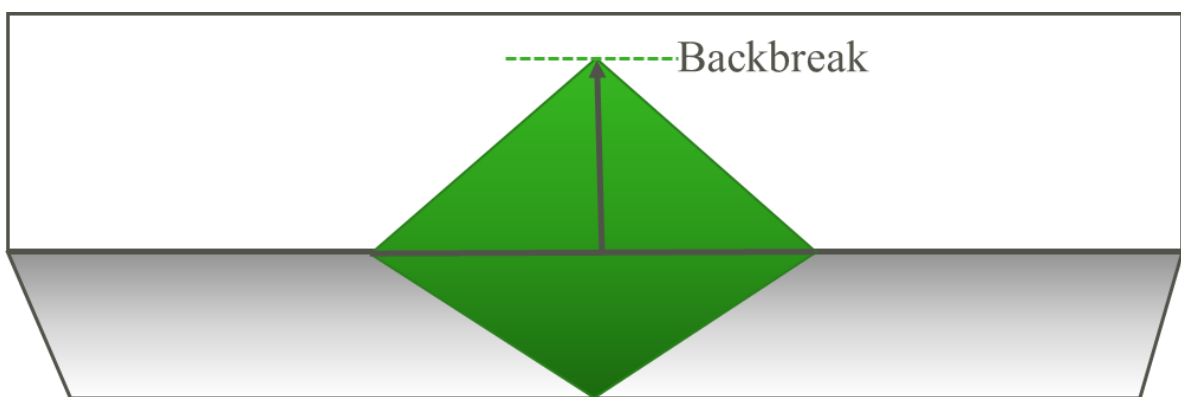


Figura 2 - 15: Estimación Backbreak análisis cinemático convencional, Fuente: Golder Associates, 2021.

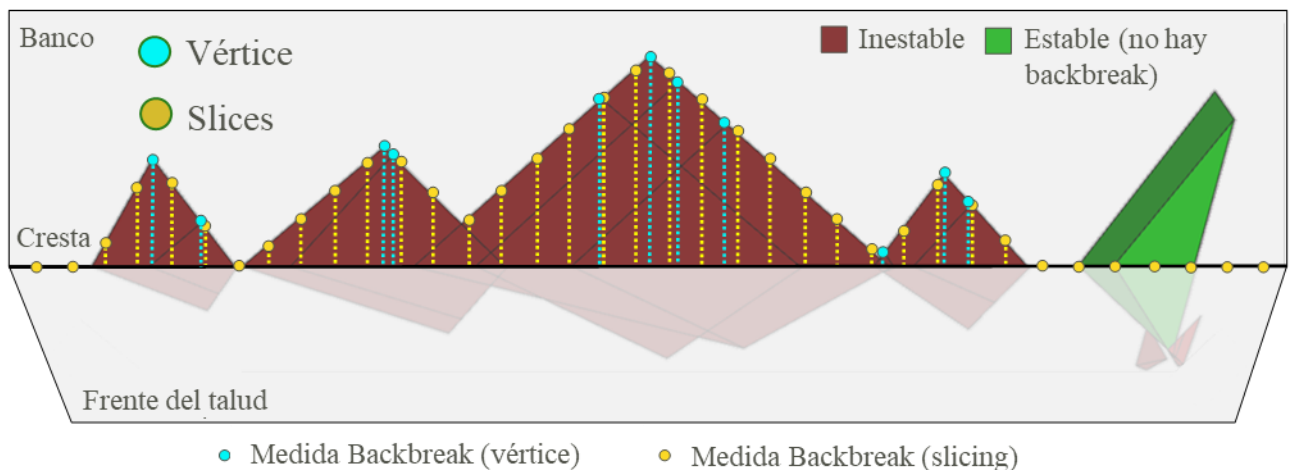


Figura 2 - 16: Estimación Backbreak análisis cinemático basado en DFN, Fuente: Golder Associates, 2021.

3. METODOLOGÍA

El proceso de elaboración de modelos DFN se realiza a través del software Fracman®, la cual es una herramienta utilizada para modelar y analizar redes de fracturas. Este software permite la generación y representación de redes de fracturas en masas rocosas, y ofrece diversas funcionalidades para el análisis de la geometría, propiedades y comportamiento de estas.

Se presentan dos enfoques: el primero corresponde a la metodología tradicional que se utiliza en estudios de geomecánica, mientras que el segundo es la metodología aplicada al presente estudio, la cual es una modificación de la tradicional.

3.1. Metodología tradicional para la construcción de modelos DFN

La metodología tradicional para la construcción de modelos DFN a modo general se puede ver en la Figura 3-1 consta de tres etapas y se detallará posteriormente.

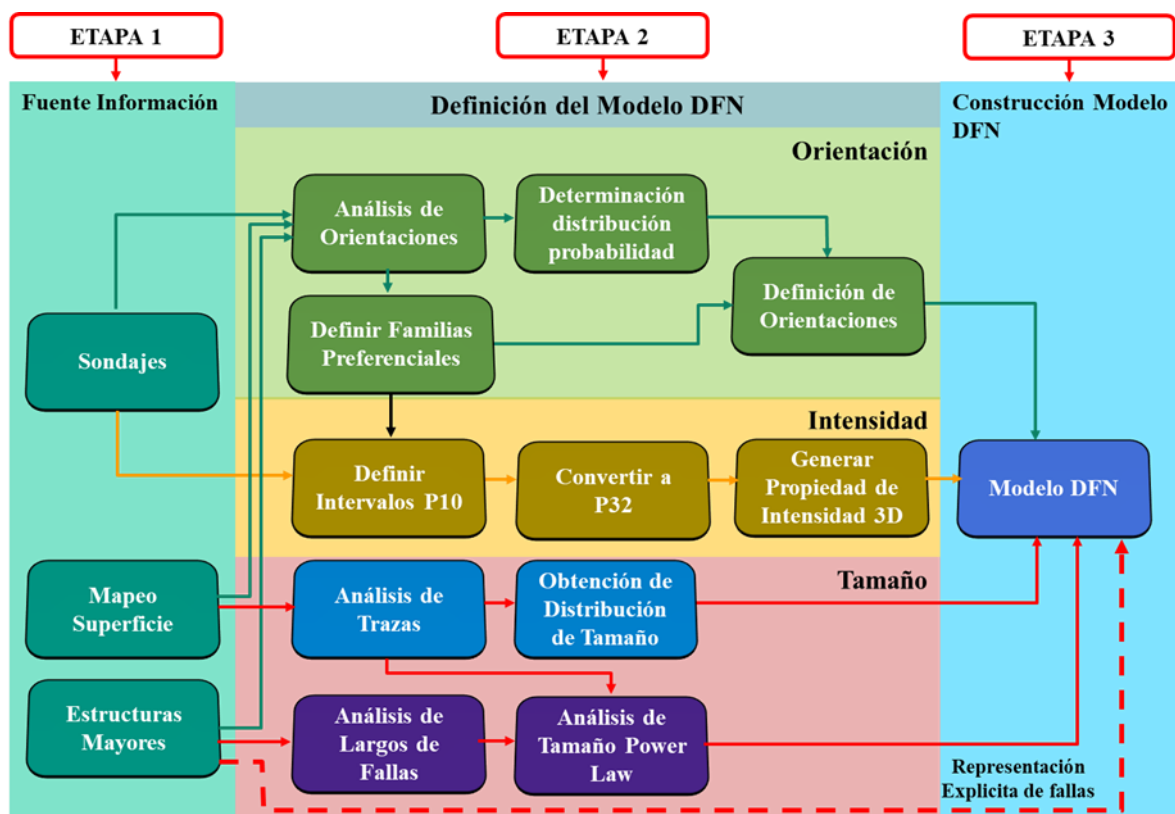


Figura 3 - 1: Metodología generalizada para construcción de modelos DFN. Fuente: WSP, 2020.

ETAPA 1: Fuente de información

Primero se debe revisar y analizar la información obtenida a partir de datos recopilados en terreno como sondajes, mapeos en superficie, identificación de estructuras mayores, entre otros. El análisis de la información recopilada en terreno; que pueden ser la cantidad de fracturas por

metro, su longitud, entre otros, permite saber que valores se integrarán en la definición del modelo DFN.

La información de sondajes permite la definición de la orientación e intensidad de DFN, los mapeos de superficies e identificación de estructuras mayores ayudan a definir el tamaño y la orientación de las estructuras.

ETAPA 2: Definición del Modelo DFN

Esta etapa consta con la especificación de los parámetros constitutivos del Modelo DFN, como la orientación, intensidad y tamaño de fracturas.

- Definición de la orientación de fracturas: Primeramente, se debe realizar un análisis de las orientaciones a través de la información obtenida según los sondajes, mapeos e identificación de estructuras mayores para poder definir el método probabilístico con el que se analizará la orientación de fracturas en Fracman. Luego, se definen las familias preferenciales, para proceder, en conjunto con la distribución determinada, a la definición de las orientaciones dentro del modelo.
- Definición de la intensidad de fracturas: Según los datos recopilados por sondajes, se obtiene la frecuencia de fracturas por metro. De esta manera se integra el parámetro P_{10} definiendo ciertos intervalos para posteriormente convertir a P_{32} utilizando la ecuación 1, y así poder generar la propiedad de intensidad tridimensional del modelo.
- Definición del tamaño de fracturas: A través del mapeo de superficie se realiza un análisis de trazas y con la definición de las estructuras mayores se puede generar la evaluación de los largos de falla, para así proceder a realizar un análisis de tamaño según la distribución Power Law. Por otro lado, se obtiene la distribución de tamaño a través del análisis de trazas para integrar posteriormente al modelo. Por último, según la definición de las estructuras mayores, se incorpora la representación explícita de las fallas.

ETAPA 3: Construcción modelo DFN y posterior análisis

Finalmente, se procede a incorporar todas las especificaciones de los parámetros para construir y generar el modelo DFN para así proceder a los análisis cinemáticos que se requieran realizar. Posteriormente, se puede realizar el análisis de los resultados dependiendo de las variables que se necesiten evaluar.

3.2. Metodología aplicada en este estudio para la construcción de modelos DFN

La metodología de trabajo para el desarrollo de esta memoria se define en base a seis etapas que se pueden visualizar en la Figura 3-2 y se detallaran posteriormente.

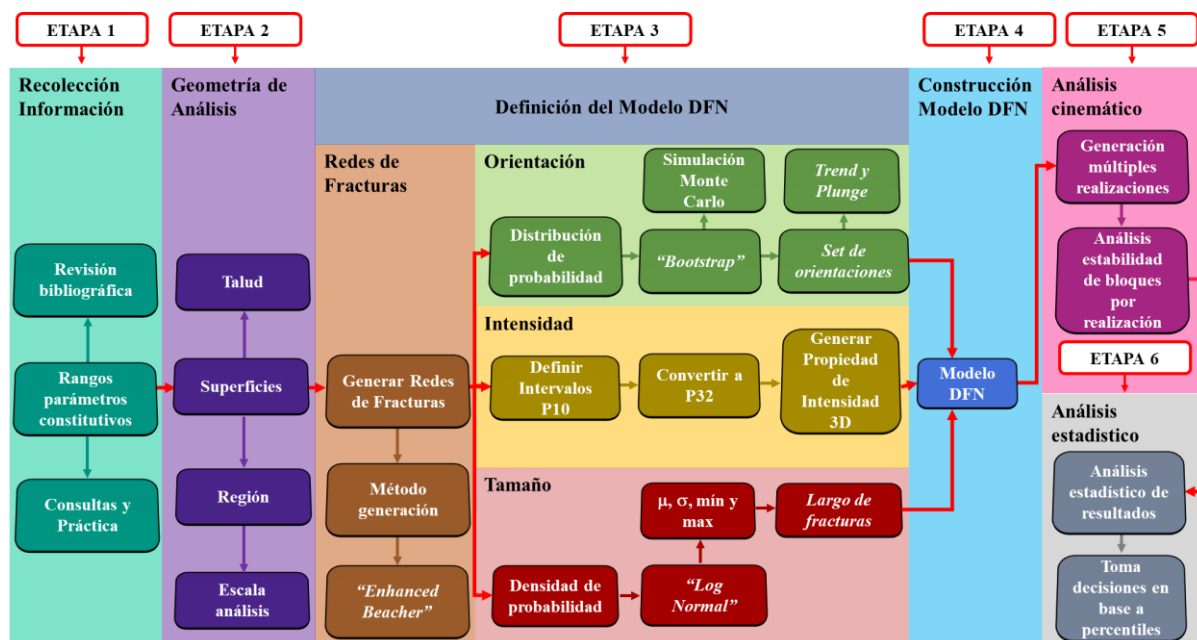


Figura 3 - 2: Diagrama de la metodología aplicada al caso de estudio.

ETAPA 1: Recolección de Información

Para poder comenzar con el desarrollo del estudio, se requiere la identificación de los rangos en los cuales se variarán los parámetros constitutivos de DFN. Esto se llevará a cabo mediante un proceso de revisión bibliográfica, consultas y la práctica, centrándose en el análisis de los parámetros de intensidad, tamaño y orientación de fracturas.

Aquí se definirán los parámetros de entrada del modelo DFN que se utilizarán durante el desarrollo del estudio. En este caso, se realizará una sensibilización para la intensidad y tamaño de fracturas, mientras que la orientación se mantendrá invariable fijando los set de estructuras dentro de un rango de direcciones de manto que favorezcan la formación de bloques con potencial de inestabilidad.

ETAPA 2: Definición de la geometría de análisis

Se crean las superficies que serán objeto de análisis, las cuales serán el talud y una región para la formación de fracturas.

- **Diseño talud:** Se define la geometría de análisis, la cual se mantendrá invariable durante el desarrollo del estudio, como un sistema banco-berma de ángulo cara banco de 65° , ancho de berma de 7.7 metros y altura de banco de 15 metros.

La Figura 3-3 es una imagen referencial para las características del sistema banco-berma anteriormente descrito. Para esta memoria, se encuentra acotado a un solo interrampa de los dos que se visualizan.

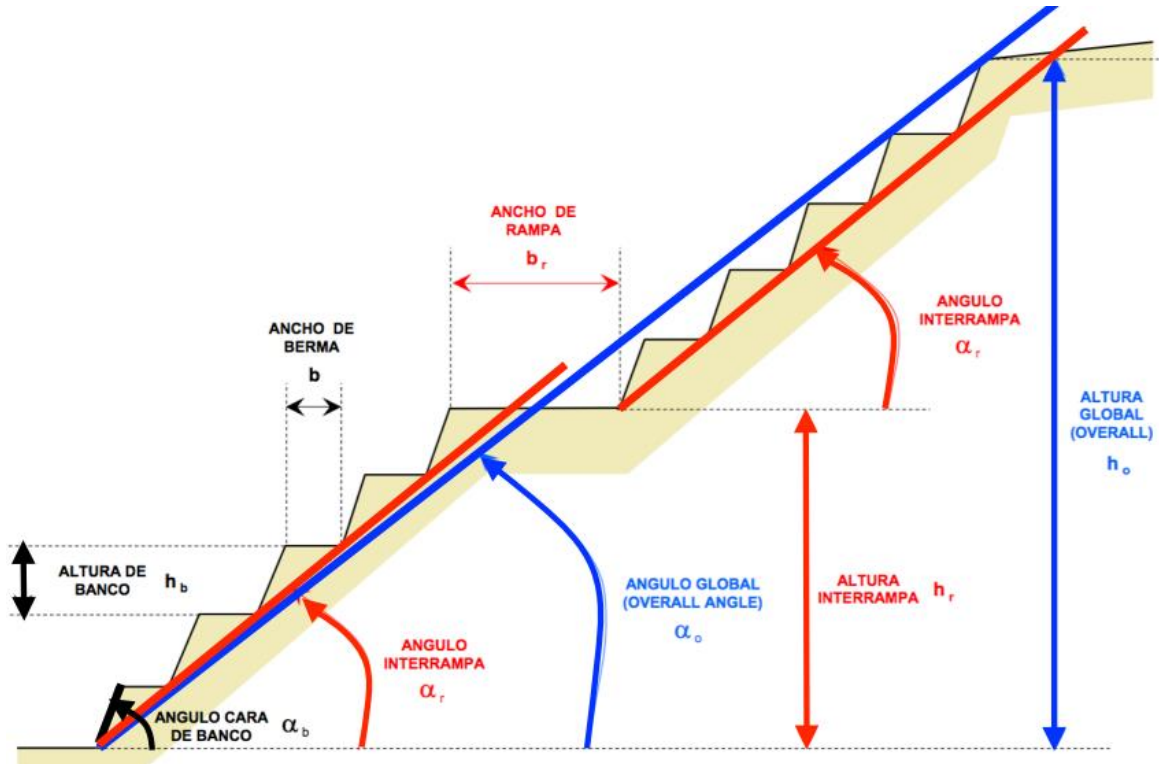


Figura 3 - 3: Componentes geométricas de un talud minero. Fuente: MIN 232 - Modo de Falla.

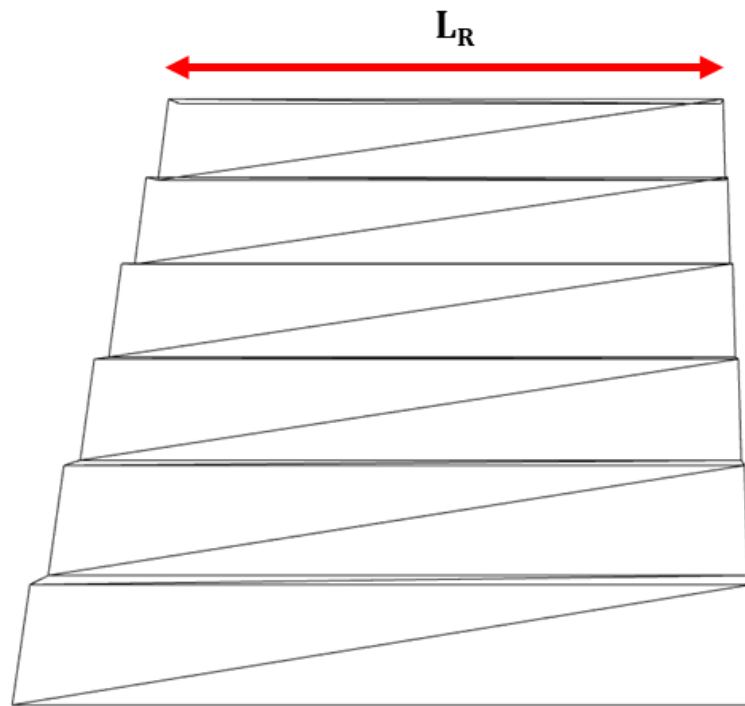


Figura 3 - 4: Componente geométrica Largo de Rampa.

El resumen de los valores para las componentes geométricas aplicadas al diseño del interrampa se puede visualizar en la Tabla 3-1, donde se detallan las dimensiones en referencia de las Figuras 3-3 y 3-4.

Tabla 3 - 1: Resumen valores componentes geométricas del diseño interrampa.

Parámetros	Banco-Berma			Interrampa		
	h_b [m]	α_b [°]	b [m]	α_r [°]	h_R [m]	L_R [m]
Diseño	15	65	7.7	45.6	90	100

- Diseño región para la generación de fracturas: Se definen las dimensiones dependiendo de la escala del análisis a realizar, que pueden ser escala banco, interrampa o multi-interrampa. Esta delimitará lo que será la formación de las redes de fracturas.

Para esta memoria se realizan solo análisis a escala banco, dado que los análisis a escala interrampa suelen estar controlados por sistemas de falla mixtos. En este estudio es de interés evaluar la influencia del control por discontinuidades a escala banco.

Para evitar problemas de borde en el algoritmo de generación de fracturas, se utiliza una región de dimensiones mayores que la escala de análisis, que en este caso integra 2 a 3 bancos. Las dimensiones se pueden visualizar en la Figura 3-5.

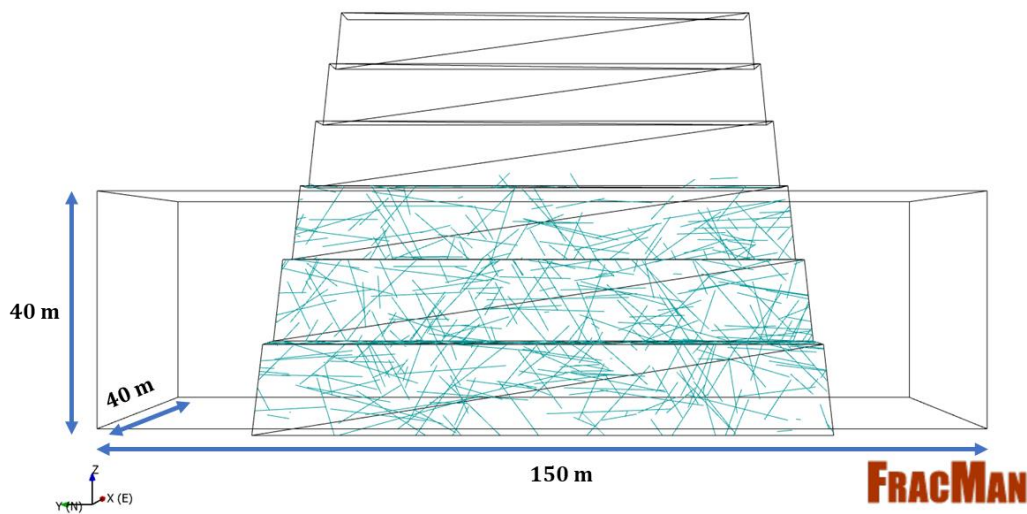


Figura 3 - 5: Dimensiones región para generación de fracturas a escala banco.

ETAPA 3: Definición del modelo DFN

La definición del modelo DFN consta de cuatro sub-etapas, las cuales son la definición del método para la generación de fracturas y la definición de los parámetros constitutivos como la intensidad, orientación y tamaño de fracturas.

- Definición del método para generación de fracturas: Se procede con la selección del método de generación de fracturas “Enhanced Beacher”, el cual es una extensión del modelo original de Beacher, que se utiliza para simular la formación de fracturas en el subsuelo. Aquí se generan fracturas de manera uniforme en un espacio determinado según región para la generación de fracturas.
- Definición de la intensidad de fracturas: La intensidad de fracturas se define en base al P_{32} en Fracman. Para lograr esto, es necesario definir intervalos de P_{10} (frecuencia de fracturas por metro) con el fin de calcular el P_{32} utilizando la ecuación 2 con el objetivo de generar las propiedades de intensidad tridimensionales (3D) para el caso de sensibilización de intensidad.

Los valores P_{10} que se trabajaran en esta memoria varían entre 0.5 y 4.0 [FF/m], con incrementos de 0.1 [FF/m]. El rango P_{10} propuesto corresponde a valores que se encuentran dentro del rango de un mapeo RMR89 (Rock Mass Rating, en inglés por Bieniawski, 1989) llevado a espaciamiento (Tabla 3-2). Se tiene que el espaciamiento

corresponde a uno sobre la frecuencia de fracturas por metro presentada en la escala de análisis (Ec. 5).

$$S = \frac{1}{P_{10}} \quad \text{Ec. 5}$$

Tabla 3 - 2: Puntajes RMR89 llevados a Espaciamiento.

Puntaje RMR89	20	15	10
Espaciamiento	> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m
FF/m	0.5	1.7 - 0.5	5.0 - 1.7

Los valores P_{10} se escalan posteriormente a P_{32} para generar la propiedad de intensidad de fracturas tridimensional. Los valores para ambas variables se pueden visualizar en las Tablas 3-3 y 3-4.

Tabla 3 - 3: Valores P_{10} para el estudio.

P_{10} [FF/m]	Caso extremo P_{10} [FF/m]	Variación P_{10} [FF/m]
0.5 - 3.5	4.0	0.1

Tabla 3 - 4: Valores P_{32} para integrar al modelo DFN en Fracman.

P_{32} [1/m]	Caso extremo P_{32} [1/m]	Variación P_{32} [1/m]
1.0 - 6.6	8.0	0.2

- Definición orientación de fracturas: La orientación de fracturas se establece a través de la distribución de probabilidad “*Bootstrap*” o “Piqueo aleatorio”, la cual permite utilizar datos de orientación en el modelo para la generación de fracturas, donde se selecciona el conjunto de datos a analizar.

Los set de orientación se encuentran definidos en la Tabla 3-5, los cuales se integran según el número de set, además de su “*trend*” y “*plunge*”. Estos se mantendrán invariables durante el desarrollo del estudio.

Tabla 3 - 5: Orientaciones medias de la familia preferencial.

Set	Trend [°]	Plunge [°]
1	45	40
2	90	50
3	135	40
4	90	70

Los set de orientaciones, como se mencionó anteriormente, se mantienen fijos durante todo el estudio dado que estos influyen considerablemente en la condición de formación de bloques con potencial de inestabilidad dentro de este estudio. Por lo tanto, se definen set que favorezcan la formación de bloques para evaluar la condición de inestabilidad con la influencia de los parámetros de tamaño e intensidad de fracturas.

- Definición tamaño de fracturas: En Fracman®, a través de la opción “Fracture Size”, se puede seleccionar la distribución para definir el tamaño de fractura.

El tamaño de fractura para este estudio se especifica en función de la densidad de probabilidad Log-Normal, ingresando la media, desviación, mínimo y largo de fractura dependiendo del caso y escala de análisis. Se utiliza la distribución Log-Normal en base al artículo “*Statistical analysis of fracture length and spacing of rock mass*” (M. Moosavi, R. Hassanizadeh, 2013), donde se menciona que la distribución Log-Normal proporciona un buen ajuste para describir la variabilidad en las longitudes de fracturas.

Para el caso de sensibilización de tamaño, este se varia en una media de radio equivalente (r_e) de 7 a 25 [m], la desviación del radio equivalente (r_e) corresponde a un 60% de la media. El mínimo largo de fractura se trunca en 1 [m] y el máximo en 15 [m]. Truncar el largo de fractura permite simular de manera más realista la variabilidad observada en la naturaleza; además, es necesario para evitar resultados poco realistas o confiables en el análisis.

Tabla 3 - 6: Datos de entrada para la sensibilización del tamaño de fractura.

Distribución	Media [m]	Desv. [m]	Trunc. Min. [m]	Trunc. Max. [m]
Log-Normal	7 - 25	4 - 20	1	15

ETAPA 4: Construcción modelo DFN

Finalmente, luego de integrar todas las definiciones de los parámetros se puede generar lo que será el modelo DFN. Para efectos de esta memoria, se considera generar 50 iteraciones a partir

de las propiedades DFN ya definidas, tal que se puedan obtener resultados de forma estadística. Es importante recalcar que cada una de estas iteraciones es distinta pero equiprobable.

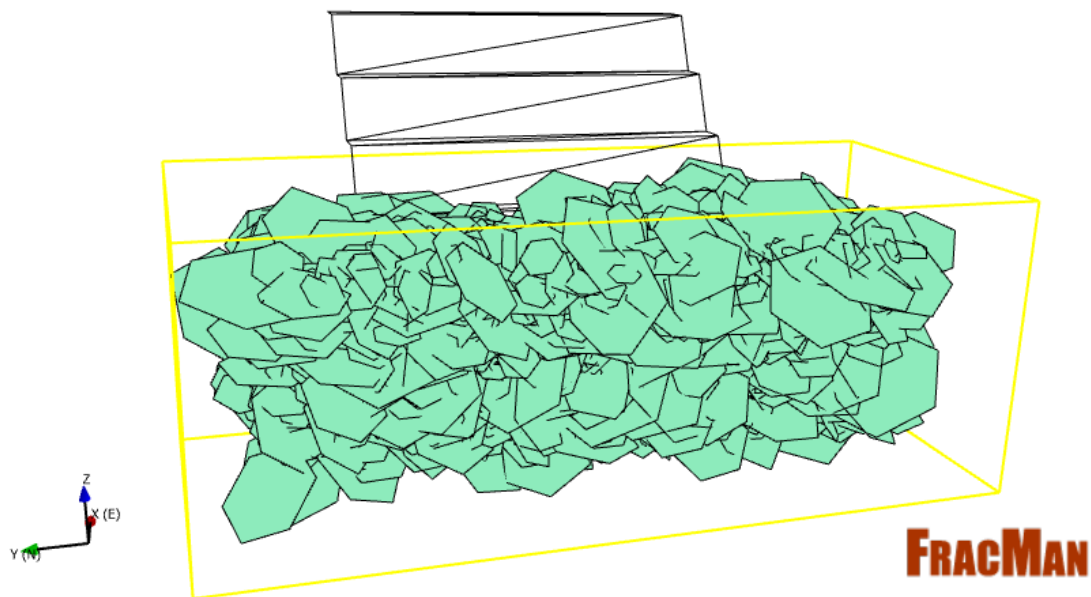


Figura 3 - 6: Modelo DFN.

ETAPA 5: Análisis cinemático

El análisis cinemático se realiza mediante la generación de múltiples realizaciones de modelos DFN utilizando la herramienta "Rock Wedge", que evalúa cada bloque producido por las redes de fracturas y crea una base de datos para cada modelo con las variables a evaluar.

Los bloques evaluados tienen dos posibles condiciones, estables o inestables, la cual depende de su factor de seguridad. Los bloques con un factor de seguridad superior a 1 se denominan estables, mientras que los bloques inestables tienen un factor de seguridad inferior a 1.

Por otro lado, para poder llevar a cabo el análisis cinemático se deben integrar las propiedades resistentes de fractura y el modelo constitutivo que, para este caso de estudio, se utiliza Mohr Coulomb. Además de la densidad de la roca, carga sísmica estática y selección del modelo DFN a analizar.

Tabla 3 - 7: Propiedades para el análisis cinemático.

Análisis Cinemático de Cuñas			
Propiedades de Fractura	Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb	
	Cohesión	0	[Pa]
	Angulo fricción	30	[°]
	Presión poros	0	[Pa]
Condiciones de Carga	Densidad roca	2700	[kg/m3]
	Estática		

El modelo constitutivo de Mohr-Coulomb es uno de los modelos más utilizados para describir el comportamiento de los materiales geotécnicos, especialmente en suelos y rocas. Se utiliza debido a su simplicidad y capacidad para capturar muchas de las características observadas en la mayoría de los materiales granulares y cohesivos.

Para este estudio no utilizar parámetro de cohesión (cohesión igual a 0) implica presentar una condición agresiva del punto de vista estructural, suponiendo que las fracturas son abiertas incluso para tamaños importantes. En términos prácticos, una fractura con cohesión cero podría ser extremadamente frágil y propensa a desmoronarse o desintegrarse fácilmente.

Por otro lado, el hecho de utilizar bloques que dependen únicamente de la resistencia friccionante, implica que un análisis netamente geométrico, en donde la cohesión no cumple el rol de retener bloques en zonas de confinamiento bajo. Al depender únicamente de la resistencia friccional, la geometría y la distribución de las fuerzas son los factores principales que determinan la estabilidad de los bloques.

Se define un sistema de fracturas con presión de poros igual a cero, tomando en consideración una condición en la que no hay presión de fluido actuando en los poros de estas, lo que puede tener implicaciones significativas en el comportamiento mecánico y la estabilidad de suelos y rocas.

Se considera una carga sísmica estática, contemplando el efecto de un terremoto como una carga aplicada de manera constante y uniforme sobre una estructura. Aunque esta descripción es un tanto simplificada, será útil para análisis preliminares.

ETAPA 6: Análisis estadístico de datos

Después del análisis cinemático terminado, se realiza una evaluación estadística de los datos obtenidos. En este paso, se realiza una evaluación de la estabilidad de bloques por cada realización, seguido de un análisis estadístico de los resultados para cada modelo DFN (con 50 realizaciones) en base al 80% de los casos (percentil 80).

De los datos obtenidos en Fracman según la evaluación cinemática, se analizarán:

- Porcentaje de bloques inestables respecto al total de bloques.
- Porcentaje de volumen inestable respecto al total de volumen de bloques.
- Sobrequebre o Backbreak en cresta de bancos en metros.

Fracman permite, a través de la evaluación cinemática, exportar los análisis realizados en formato de archivo de texto (.txt) para cada realización por modelo DFN. Estos archivos contienen data de análisis cinemático por bloque para distintas variables, que se compilan a través de códigos en Python en archivos Excel para comenzar su análisis. Estos archivos Excel contendrán:

- Resumen data por realización:
 - i. Volumen total [m^3] (suma del volumen inestable y estable)
 - ii. Volumen inestable [m^3]
 - iii. N° total de bloques
 - iv. N° bloques inestables
 - v. N° bloques estables
- Resumen data para cada bloque en cada realización:
 - i. Factor de seguridad por bloque.
 - ii. Volumen de cada bloque [m^3]
 - iii. Distancia backbreak de cada bloque [m]

Con los datos compilados, se realiza un filtro de tal manera que se remueven del análisis todos los bloques con volumen inferior a 1 [m^3]. Esto se debe a que volúmenes menores a 1 metro cúbico son considerados poco relevantes para la escala de análisis.

Luego, se comienza con el análisis de las variables de interés a través de la obtención de percentiles, los cuales son un indicador estadístico que permiten, al momento de estar manejando una gran cantidad de datos respecto a algún fenómeno o variable de estudio, ordenarlos y asignar a cada uno de estos valores un porcentaje asociado. Este porcentaje representará la cantidad de datos (en forma porcentual) que son menores a este valor. La relación entre la data y sus percentiles se ordena y gráfica para poder tomar decisiones de manera rápida.

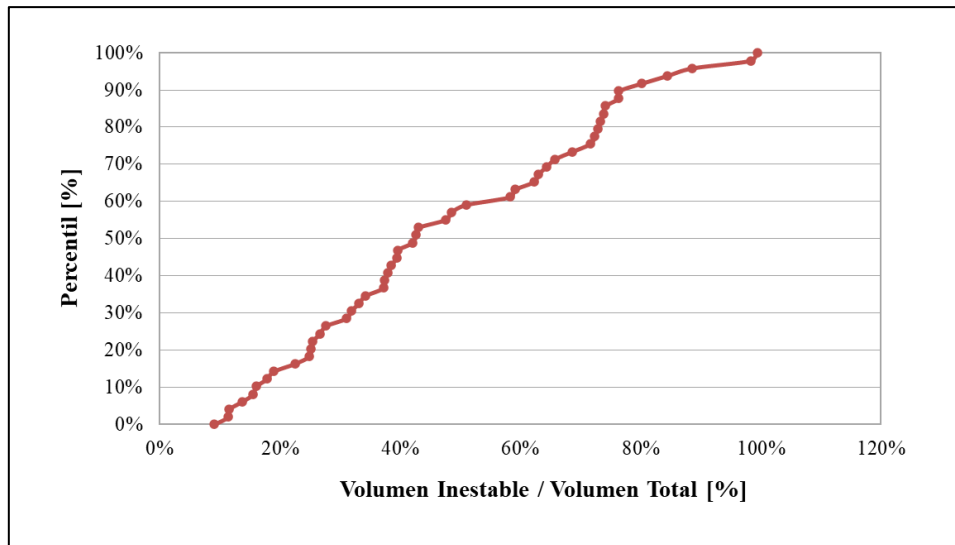


Figura 3 - 7: Representación gráfica de la variabilidad de volumen inestable respecto al total.

Se estima un valor representativo dependiendo de lo que se esté analizando; por ejemplo, para rocas de mala calidad se utiliza como valor representativo el P_{35} (Percentil 35). Para este estudio se utiliza el P_{80} (Percentil 80), el cual se considera representativo dado que el conjunto de datos es extenso y variable. Al calcular el percentil 80, se está considerando el valor por debajo del cual el 80% de los datos están distribuidos, donde valores extremadamente altos o bajos (valores atípicos) tendrán menos impacto en el cálculo. Esto tendrá una representatividad para la mayoría de los casos, proporcionando una medida más estable y generalizable dada la alta variabilidad.

De esta manera, se aplica esta metodología a través de las herramientas de Excel para obtener un valor representativo, en base al 80% de los casos para cada variable a evaluar de los modelos DFN, como se puede visualizar en la Figura 3-8.

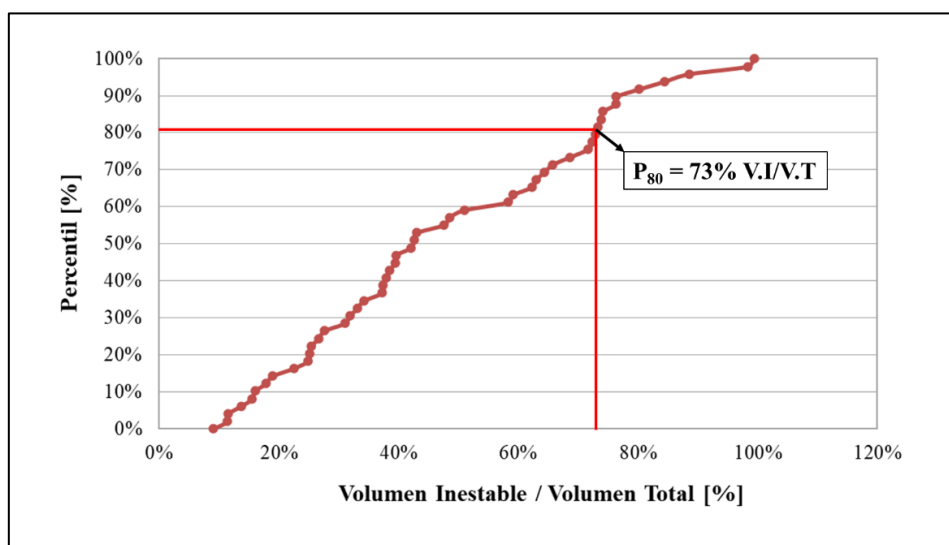


Figura 3 - 8: P_{80} para la variación del volumen inestable respecto al total.

Por último, se registran los valores de P_{80} para cada variable en una tabla de Excel.

Las variables de interés para este caso son:

- Presencia relativa de Volumen Inestable (Volumen Inestable/Volumen Total)
- Presencia relativa de Bloques Inestables (Bloques Inestables/Bloques Totales)
- Estimación distancia Backbreak

Con la estadística analizada se crearán plots que permitirán estudiar la tendencia de estas variables con la sensibilización de cada parámetro. Esto permitirá evaluar el cómo influyen en la estabilidad del talud a escala banco.

Finalmente, el estudio se puede resumir en base a dos casos de evaluación a escala banco, distribuidos en dos entornos de sensibilización de intensidad y tamaño de fractura, variando un parámetro en el rango establecido mientras se fija el otro (Figura 3-9).

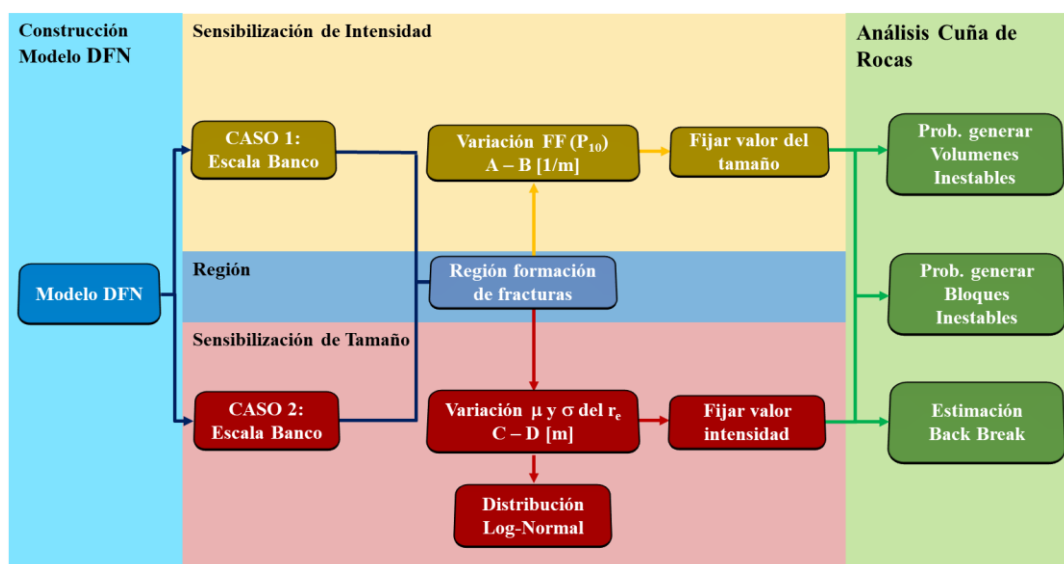


Figura 3 - 9: Diagrama de los casos de estudio.

- Caso 1: Sensibilización de intensidad de fracturas a escala banco.

En este caso los datos de entrada para la intensidad en el modelo DFN serán los especificados en la Tabla 3-3 y 3-4, y el tamaño se fijará en una media de radio equivalente (r_e) de 7.5 [m], desviación del radio equivalente (r_e) de 5 [m], mínimo truncado de largo de fractura de 1 [m] y el máximo truncado de 15 [m].

Tabla 3 - 8: Valores para el tamaño de fractura aplicados al Caso 1.

Escala	Distribución	Media del r_e [m]	Desv. del r_e [m]	Trunc. Min. [m]	Trunc. Max. [m]
Banco	Log-Normal	7.5	5	1	15

- Caso 2: Sensibilización de tamaño de fracturas a escala banco.

En este caso los datos de entrada para el tamaño en el modelo DFN serán los especificados en la Tabla 3-6, y la intensidad se fijará en un valor de P_{10} de 2.4 [FF/m] que corresponde a un P_{32} de 4.8 [1/m].

Tabla 3 - 9: Valores para la intensidad aplicados al Caso 2.

P_{10} [FF/m]	P_{32} [1/m]
2.4	4.8

4. RESULTADOS

4.1. Caso 1: Sensibilización intensidad de fracturas a escala banco

4.1.1. Resultados Distancia Backbreak

Primeramente, se obtiene la distancia backbreak para las 50 iteraciones por modelo DFN a través del análisis cinemático, como se puede visualizar en la Tabla 4-1, la cual se acotó y se puede revisar en detalle en el Anexo 9-1.

Tabla 4 - 1: Distancia Backbreak por iteración Modelo DFN 4.

Iteración	Distancia Backbreak [m]
1	7.0
5	7.7
10	6.8
15	5.8
20	6.9
25	7.7
30	7.7
35	7.7
40	6.6
45	5.2
50	6.0

Luego, se obtiene el P_{80} para las 50 realizaciones por cada modelo DFN, obteniendo así un valor representativo para cada caso de intensidad de fractura P_{10} . Los valores P_{80} de distancia backbreak se compilan para cada valor de intensidad de fracturas (Tabla 4-2), lo que da como resultado el gráfico que se puede ver en la Figura 4-1, que permite comprender la relación de una variable frente a otra.

Tabla 4 - 2: Distancia Backbreak P_{80} por Modelo DFN.

Modelo DFN	P32 [1/m]	P10 [FF/m]	BB P_{80} [m³]
1	1	0.5	3.7
2	1.2	0.6	4.0
3	1.4	0.7	3.9
4	1.6	0.8	4.1
5	1.8	0.9	3.9
6	2	1	4.0
7	2.2	1.1	4.2
8	2.4	1.2	4.1
9	2.6	1.3	4.2
10	2.8	1.4	4.3
11	3	1.5	4.7
12	3.2	1.6	4.3
13	3.4	1.7	4.5
14	3.6	1.8	4.7
15	3.8	1.9	4.7
16	4	2	4.7
17	4.2	2.1	4.7
18	4.4	2.2	4.8
19	4.6	2.3	4.8
20	4.8	2.4	4.9
21	5	2.5	4.9
22	5.2	2.6	4.8
23	5.4	2.7	5.0
24	5.6	2.8	5.1
25	5.8	2.9	5.0
26	6	3	5.1
27	6.2	3.1	5.1
28	6.4	3.2	5.2
29	6.6	3.3	5.2
30	8	4	5.4

Aquí se puede notar que la tendencia que siguen los datos es creciente y lineal con una relación directamente proporcional.

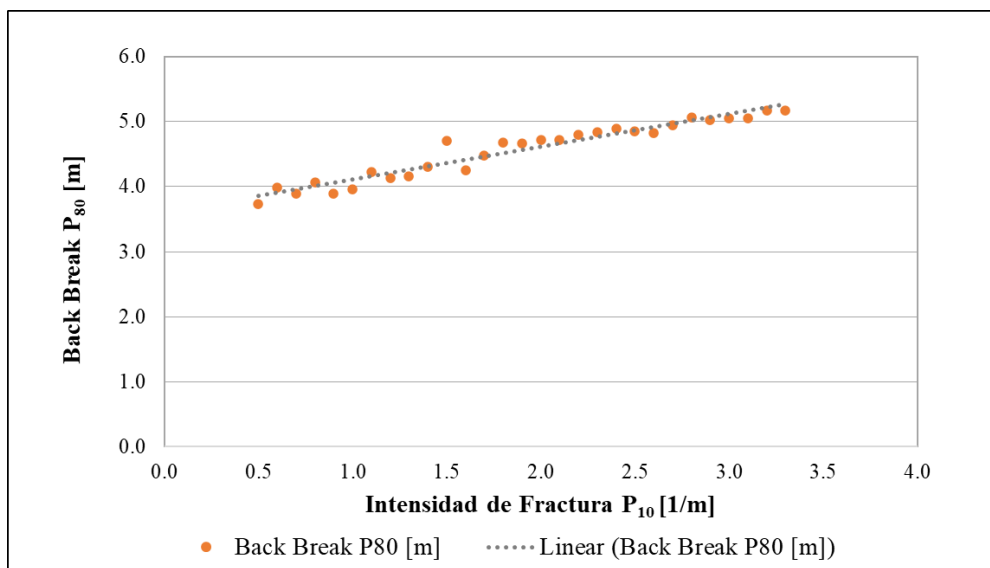


Figura 4 - 1: Grafica distancia Backbreak P₈₀ para el Caso 1.

4.1.2. Resultados Volúmenes Inestables

Para la obtención del porcentaje de volumen inestable presente a escala banco, primeramente, se obtiene el volumen total que corresponde a la suma del volumen inestable más volumen estable de los bloques analizados cinemáticamente. Luego, se registra tanto el volumen total como inestable para cada valor de intensidad de fracturas, esto para cada iteración por modelo DFN, que se puede visualizar para uno de los casos de intensidad en la Tabla 4-3, la cual se acotó a ciertas iteraciones y se puede visualizar por completo en el Anexo 9-2.

Tabla 4 - 3: Volumen por iteración Modelo DFN 4.

Iteración	Volumen total [m ³]	Volumen Inestable [m ³]
1	4617	2591
5	7337	2110
10	5816	1577
15	4943	1446
20	7999	1820
25	4851	1654
30	6620	3062
35	5349	2174
40	6154	3284
45	5902	3300
50	6661	2946

Se sigue con la obtención de la relación porcentual de volumen inestable respecto al volumen total. Este factor se registra para cada iteración como se puede visualizar en la Tabla 4-4, la cual

esta acotada y se puede revisar el detalle para las 50 iteraciones en el Anexo 9-3. Esto se realiza de igual manera para cada modelo DFN.

Tabla 4 - 4: Relación porcentual volumen inestable sobre el total Modelo DFN 4.

Iteración	V. Inestable / V. Total [%]
1	56%
5	29%
10	27%
15	29%
20	23%
25	34%
30	46%
35	41%
40	53%
45	56%
50	44%

Por último, se obtiene el percentil 80 para tomar un valor representativo frente a la variabilidad que presentan dentro de un mismo modelo DFN cada iteración respecto al porcentaje de volumen inestable que se genera a escala banco. Estos valores se registran, como se puede visualizar en la Tabla 4-5, para cada modelo DFN.

Tabla 4 - 5: Relación porcentual volumen inestable sobre el total P80 para cada Modelo DFN.

Modelo DFN	P₃₂ [1/m]	P₁₀ [FF/m]	P₈₀ (V. Inestable / V. Total) [%]
1	1	0.5	73%
2	1.2	0.6	68%
3	1.4	0.7	60%
4	1.6	0.8	55%
5	1.8	0.9	64%
6	2	1	52%
7	2.2	1.1	47%
8	2.4	1.2	48%
9	2.6	1.3	47%
10	2.8	1.4	47%
11	3	1.5	42%
12	3.2	1.6	43%
13	3.4	1.7	42%
14	3.6	1.8	39%
15	3.8	1.9	41%
16	4	2	38%
17	4.2	2.1	38%
18	4.4	2.2	39%
19	4.6	2.3	38%
20	4.8	2.4	36%
21	5	2.5	37%
22	5.2	2.6	39%
23	5.4	2.7	37%
24	5.6	2.8	37%
25	5.8	2.9	39%
26	6	3	39%
27	6.2	3.1	40%
28	6.4	3.2	40%
29	6.6	3.3	41%
30	8	4	51%
31	10	5	70%

El porcentaje de volumen inestable respecto al total presente a escala banco se separa en tres rangos que permite clasificar en alto, medio, o bajo. Esto permitirá analizar la tendencia de esta variable frente a la variación de intensidad de fracturas.

P80 (V.I/V.T) [%]		
ALTO 100%-70%	MEDIO 70%-40%	BAJO 40%-0%

Figura 4 - 2: Rangos presencia relativa volumen inestable.

Se grafica el porcentaje de volumen inestable a escala banco según cómo varía la intensidad de fractura. En la Figura 4-3 se puede visualizar que la tendencia para este caso es variable, donde en un inicio decrece, luego se mantiene variable llegando a un punto de inflexión y comienza a crecer nuevamente.

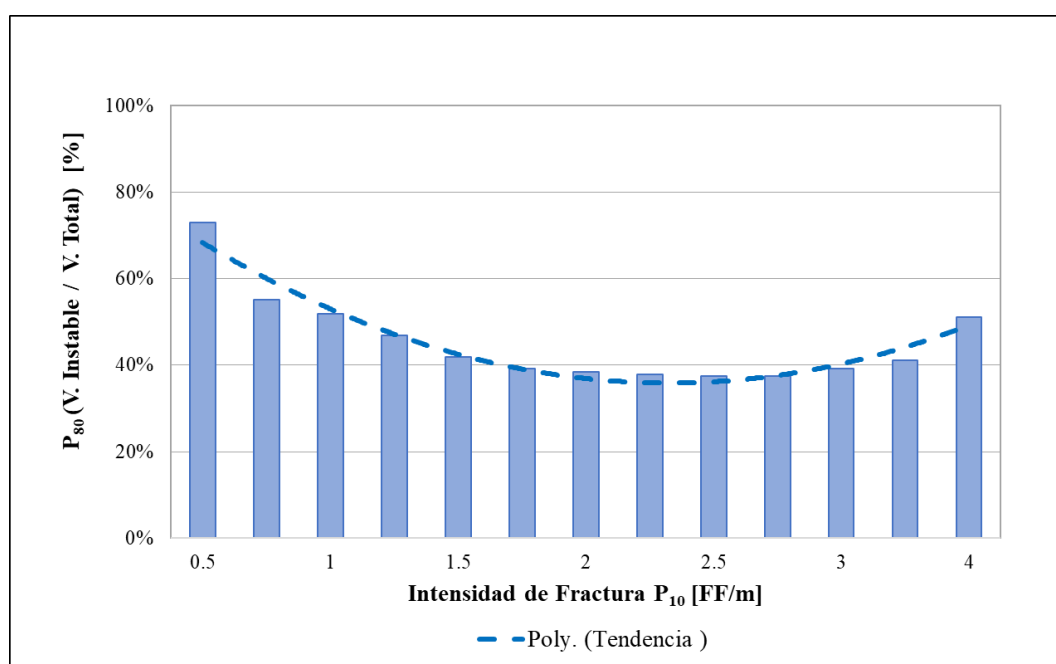


Figura 4 - 3: Relación porcentual volumen inestable sobre el total para el Caso 1.

Finalmente, la Figura 4-4 muestra la clasificación de la relación del porcentaje de volumen inestable frente al total presente a escala banco según la variación del nivel de fracturamiento P_{10} dado el criterio propuesto anteriormente.

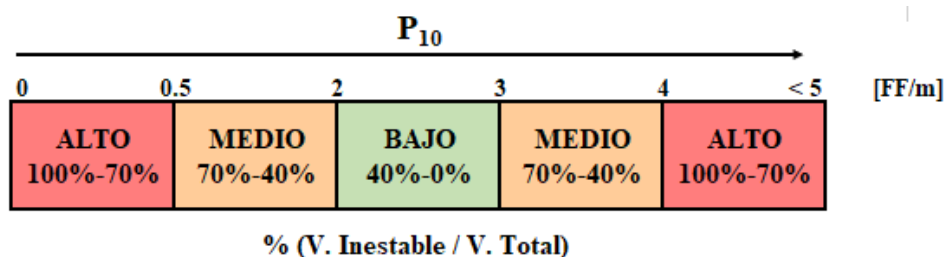


Figura 4 - 4: Clasificación de la presencia relativa de volumen inestable para el Caso 1.

4.1.3. Resultados Bloques Inestables

Para la obtención del porcentaje de bloques inestables respecto al total presente a escala banco, primero, se debe calcular la cantidad total de bloques formados después del análisis cinemático para cada modelo DFN. Se sigue con la misma metodología de obtención de resultados que en el apartado 1.2, pero asociado al número de bloques totales e inestables (bloques totales corresponde a la suma de los bloques inestables más lo estables). Esto se puede ver para un caso particular en la Tabla 4-6, la cual está acotada y se puede revisar en detalle en el Anexo 9-4.

Tabla 4 - 6: Bloques totales e inestables por cada iteración Modelo DFN 4.

Iteración	Bloques Totales	Bloques Inestables
1	2112	1092
5	3479	1115
10	3588	1123
15	2937	952
20	4108	974
25	2511	867
30	2379	935
35	2637	841
40	4011	1868
45	3215	1275
50	3249	773

Se sigue con la obtención de la relación porcentual de bloques inestables respecto a los bloques totales. La Tabla 4-7 muestra cómo se registra este factor para cada iteración, y se puede ver el detalle de las 50 iteraciones en el Anexo 9-5. Esto se hace de la misma manera para cada modelo DFN.

Tabla 4 - 7: Relación porcentual bloques inestables sobre el total por iteración del Modelo DFN 4.

Iteración	B. Inestable / B. Total [%]
1	52%
5	32%
10	31%
15	32%
20	24%
25	35%
30	39%
35	32%
40	47%
45	40%
50	24%

Por último, se obtiene el percentil 80 para las 50 iteraciones de cada modelo DFN, esto dado que dentro de un mismo modelo existe una gran variabilidad en el porcentaje de bloques inestables presentes a escala banco. El P_{80} se registra para cada modelo DFN que corresponde en este caso para cada valor de intensidad de fractura P_{10} , como se puede visualizar en la Tabla 4-8.

Tabla 4 - 8: Relación porcentual bloques inestable sobre el total para cada Modelo DFN.

Modelo DFN	P_{32} [1/m]	P_{10} [FF/m]	P_{80} (B. Inestable / B. Total) [%]
1	1	0.5	66%
2	1.2	0.6	64%
3	1.4	0.7	61%
4	1.6	0.8	60%
5	1.8	0.9	61%
6	2	1	55%
7	2.2	1.1	53%
8	2.4	1.2	51%
9	2.6	1.3	51%
10	2.8	1.4	47%
11	3	1.5	45%
12	3.2	1.6	45%
13	3.4	1.7	43%
14	3.6	1.8	40%
15	3.8	1.9	39%
16	4	2	37%
17	4.2	2.1	37%
18	4.4	2.2	37%
19	4.6	2.3	35%
20	4.8	2.4	35%
21	5	2.5	34%
22	5.2	2.6	33%
23	5.4	2.7	32%
24	5.6	2.8	34%
25	5.8	2.9	33%
26	6	3	32%
27	6.2	3.1	34%
28	6.4	3.2	34%
29	6.6	3.3	34%
30	8	4	28%

Así también para este caso, los porcentajes de bloques inestables presentes a escala banco se clasificarán en tres rangos dependiendo de su presencia en esta escala, la cual puede ser alta, media o baja.

P80 (B.I/B.T) [%]		
ALTO 100%-70%	MEDIO 70%-40%	BAJO 40%-0%

Figura 4 - 5: Rangos para la relación porcentual de bloques inestable sobre el total.

Se obtiene el gráfico para el porcentaje de volumen inestable presente a escala banco según la variación de intensidad de fractura P_{10} , el cual se puede ver en la Figura 4-6. Aquí la tendencia, en un principio, es decreciente, llegando a un punto en donde su comportamiento comienza a ser asintótico.

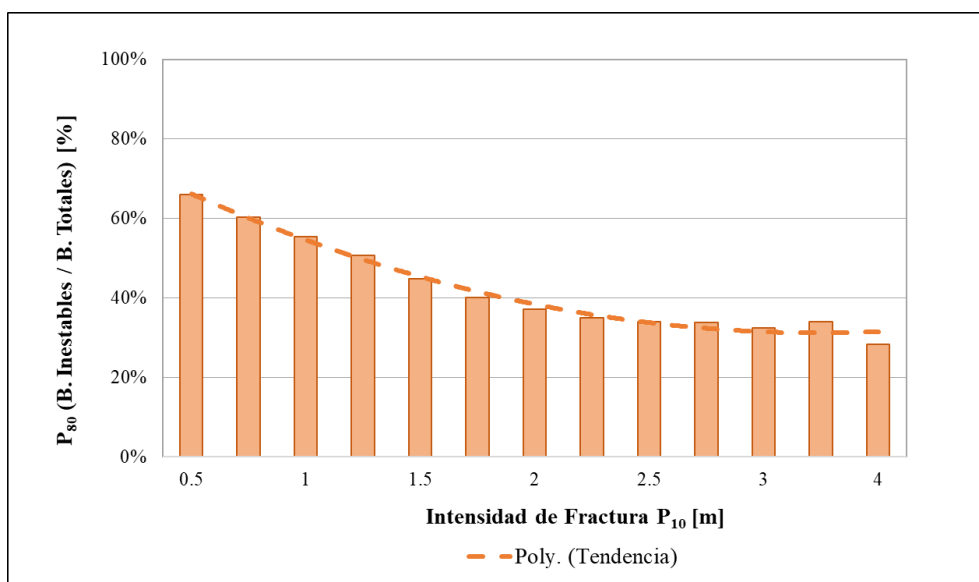


Figura 4 - 6: Relación porcentual de bloques inestables sobre el total para el Caso 1.

Finalmente, la relación relativa del porcentaje de bloques inestables presentes a escala banco según la variación del nivel de fracturamiento P_{10} se puede clasificar como muestra la Figura 4-7 según el criterio propuesto anteriormente.

P_{10}		
0	2	< 4
MEDIO 70%-40%		BAJO 40%-0%
% (B. Inestable / B. Total)		

Figura 4 - 7: Clasificación presencia relativa de bloques inestables para el Caso 1.

4.2. Caso 2: Sensibilización tamaño de fracturas a escala banco

Así como en el Caso 1, se realiza la obtención de resultados de igual manera para el Caso 2, con la diferencia que la variable de análisis se estudia en base a la variación del tamaño de fractura.

4.2.1. Resultados Distancia Backbreak

Se obtiene la distancia backbreak para cada iteración por modelo DFN asociado a la variación de tamaño de fractura. En este caso se varía la media del radio de fractura (r_e), por lo cual este será el parámetro comparativo para la distancia backbreak.

Así se registra para cada modelo DFN como se puede visualizar en el caso particular de la Tabla 4-9 los valores de distancia backbreak para cada iteración, la cual está acotada y se puede visualizar en detalle en el Anexo 9-6.

Tabla 4 - 9: Distancia Backbreak por iteración del Modelo DFN 6.

Iteración	Distancia Backbreak [m]
1	2.6
5	4.8
10	3.7
15	2.5
20	4.5
25	4.4
30	4.0
35	3.2
40	2.8
45	3.1
50	3.5

Luego, se obtiene el percentil 80 para las 50 iteraciones por modelo DFN. Esto se puede ver en detalle en la Tabla 4-10.

Tabla 4 - 10: Distancia Backbreak P80 por Modelo DFN.

Modelo DFN	Media Radio de Fractura [m]	Distancia Backbreak P ₈₀ [m]
1	7	5.0
2	9	5.0
3	11	4.9
4	13	4.7
5	15	4.7
6	17	4.6
7	19	4.8
8	21	4.5
9	23	3.1
10	25	2.5

La Figura 4-9 muestra el gráfico de distancia backbreak respecto a la variabilidad de la media del radio equivalente de fractura. Podemos observar que la tendencia aquí es decreciente considerando los resultados del Modelo DFN 9 y 10.

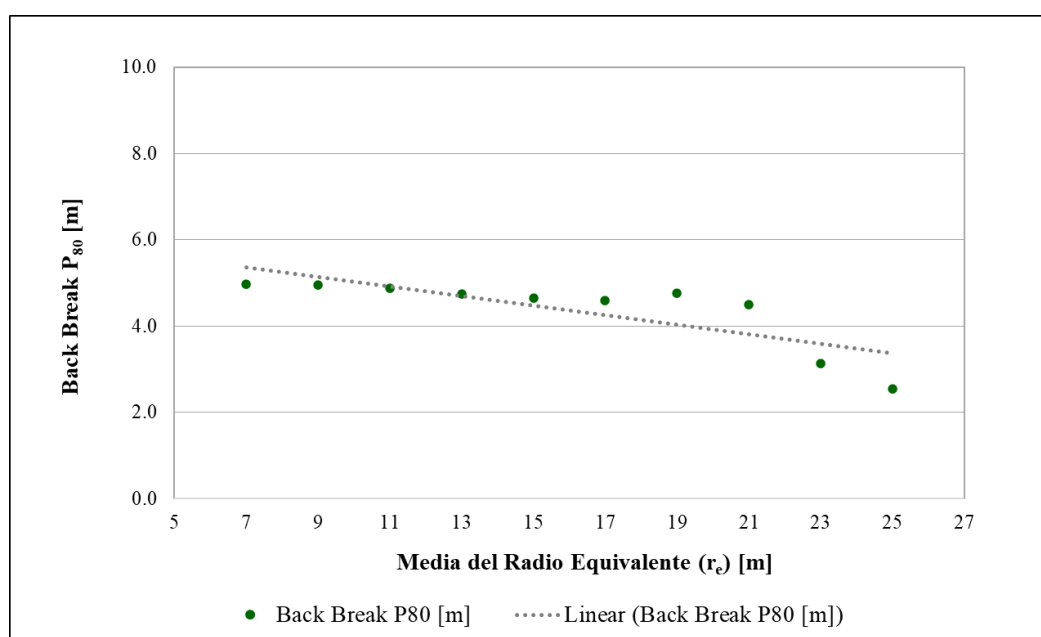


Figura 4 - 8: Distancia Backbreak P80 para el Caso 2.

4.2.2. Resultados Volúmenes Inestables

Para este caso se sigue con la misma metodología del apartado 1.2, pero para cada valor media del radio equivalente por iteración del modelo DFN. Esto se muestra en la Tabla 4-11 para un caso particular de media del radio de fractura, que se acotó a ciertas iteraciones y se muestra por completo en el Anexo 9-7.

Tabla 4 - 11: Volumen total e inestable por iteración del Modelo DFN 6.

Iteración	Volumen total [m³]	Volumen Inestable [m³]
1	801	322
5	630	376
10	225	51
15	766	390
20	1220	586
25	836	238
30	1243	701
35	839	293
40	842	428
45	651	575
50	781	494

Luego, se calcula la proporción del volumen inestable en relación con el total (Tabla 4-12 y su detalle en el Anexo 9-8). Esto se hace de la misma manera para cada modelo DFN.

Tabla 4 - 12: Relación volumen inestable respecto al total por iteración del Modelo DFN 6.

Iteración	V. Inestable /V. Total [%]
1	40%
5	60%
10	23%
15	51%
20	48%
25	29%
30	56%
35	35%
40	51%
45	88%
50	63%

Se sigue con la obtención del percentil 80 para la proporción de volumen inestable respecto al total. Esto se puede visualizar en la Tabla 4-13.

Tabla 4 - 13: Relación volumen inestable respecto al total por Modelo DFN.

Modelo DFN	Media Radio de Fractura [m]	P ₈₀ (V. Inestable / V. Total) [%]
1	7	38%
2	9	39%
3	11	43%
4	13	46%
5	15	61%
6	17	66%
7	19	81%
8	21	88%
9	23	92%
10	25	100%

Luego, se obtiene el gráfico del porcentaje de volumen inestable a escala banco dada la variabilidad de la media del radio equivalente. Para este caso, la tendencia creciente, lineal y directamente proporcional.

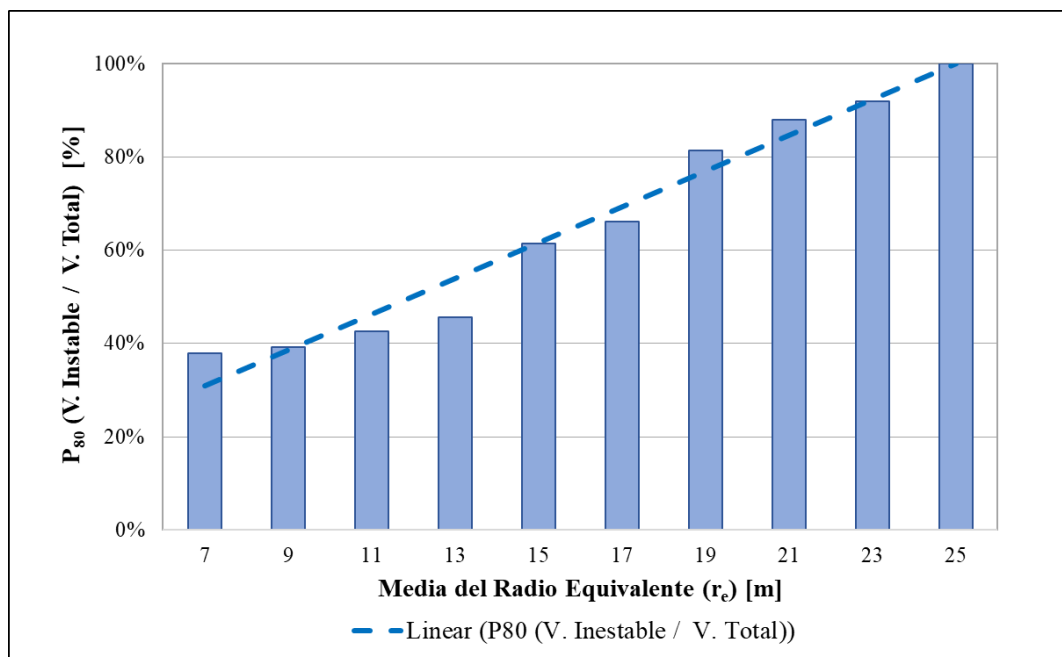


Figura 4 - 9: Relación porcentual del volumen inestable respecto al total para el Caso 2.

Por último, según el criterio propuesto anteriormente (Figura 4-2), la relación porcentual de volumen inestable presente a escala banco según la variación de la media del radio de fractura se puede clasificar como se puede ver en la Figura 4-10.

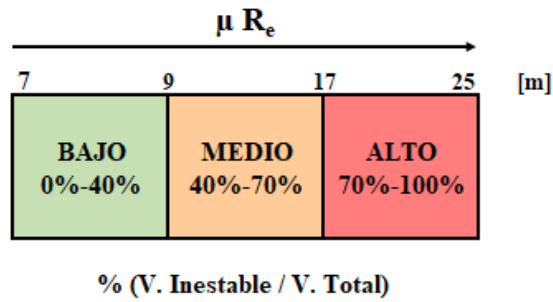


Figura 4 - 10: Clasificación de la presencia relativa de volumen inestable para el Caso 2.

4.2.3. Resultados Bloques Inestables

Así también, para determinar el porcentaje de bloques inestables presentes a escala banco, se aplica la misma metodología del apartado 1.3.

Para cada valor de media del radio de fractura, se registran los bloques totales e inestables para las 50 iteraciones, como se muestra en la Tabla 4-14, que está acotada y se puede revisar en detalle en el Anexo 9-9.

Tabla 4 - 14: Bloques totales e inestable por iteración del Modelo DFN 6.

Iteración	Bloques Totales	Bloques Inestables
1	140	43
5	155	86
10	130	43
15	120	52
20	186	128
25	120	67
30	199	113
35	118	74
40	160	108
45	135	99
50	250	125

Después, se calcula la proporción de bloques inestables en relación con los bloques totales por modelo DFN (Tabla 4-15 y el Anexo 9-10 contiene su detalle).

Tabla 4 - 15: Relación bloques inestables respecto del total por iteración del Modelo DFN 6.

Iteración	B. Inestable / B. Total [%]
1	31%
5	55%
10	33%
15	43%
20	69%
25	56%
30	57%
35	63%
40	68%
45	73%
50	50%

La Tabla IV-16 muestra el P_{80} para cada modelo DFN correspondiente a la relación relativa de bloques inestables.

Tabla 4 - 16: Relación bloques inestables respecto del total por iteración del Modelo DFN 6.

Modelo DFN	Media Tamaño Fractura [m]	P_{80} (B. Inestable / B. Total) [%]
1	7	33%
2	9	35%
3	11	43%
4	13	48%
5	15	58%
6	17	64%
7	19	67%
8	21	72%
9	23	80%
10	25	81%

Después, se obtiene el gráfico del porcentaje de bloques inestables respecto al total presente a escala banco dada la variación de la media del radio de fractura, como se muestra en la Figura 4-17. Podemos observar que la tendencia es decreciente e indirectamente proporcional en este caso.

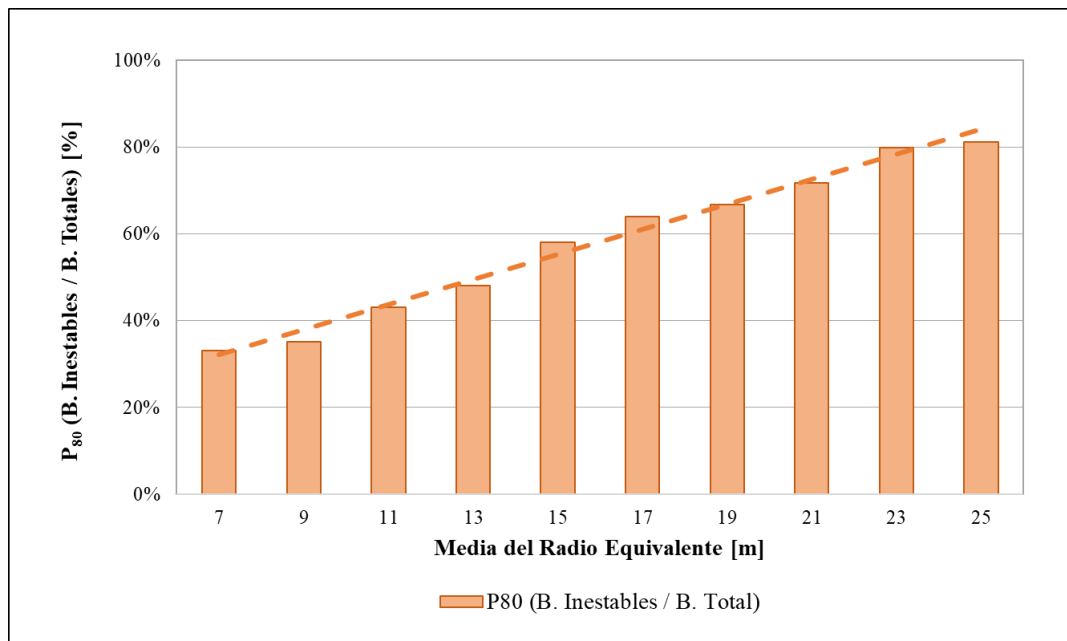


Figura 4 - 11: Relación porcentual del bloques inestables respecto al total para el Caso 2.

Finalmente, en base al criterio propuesto anteriormente (Figura 4-5), la presencia relativa de bloques inestables presentes a escala banco según la variación de la media del radio de fractura se puede visualizar en detalle en la Figura 4-11.

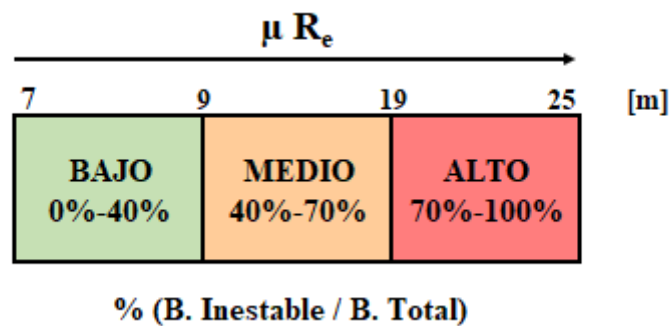


Figura 4 - 12: Clasificación de la presencia relativa de volumen inestable para el Caso 2.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las principales observaciones de los resultados obtenidos se presentan a continuación.

5.1. Caso 1: Sensibilización intensidad de fracturas a escala banco

5.1.1. Estimación distancia backbreak

Respecto a la estimación de la distancia backbreak que se genera al momento de realizar una sensibilización de intensidad de fracturas P_{10} a escala banco, se tiene que a medida que aumenta el nivel de fracturamiento en el macizo rocoso, también aumenta el quiebre en la geometría del banco. Esto se deduce a través de la tendencia que presenta la variabilidad del parámetro DFN intensidad de fractura P_{10} frente a la distancia backbreak que se puede visualizar en la Figura V-I.

La Figura 5-1 muestra un límite inferior de 3 metros de quiebre para valores de fracturamiento desde las 0.5 [FF/m] y un límite superior de 6 metros de quiebre hasta 4 [FF/m]. Según la tendencia lineal y creciente directamente proporcional, se espera que el quiebre de banco aumente más allá de los 6 metros para valores superiores a 4 [FF/m].

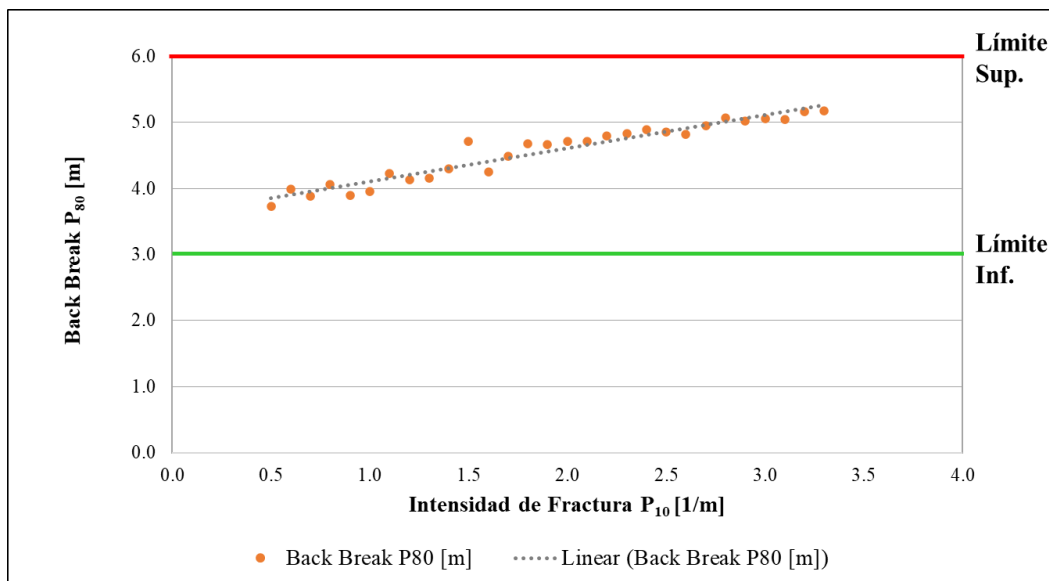


Figura 5 - 1: Límites distancia Backbreak P_{80} para el Caso 1.

Dado lo anterior, se clasifica en rangos la estimación para la distancia del quiebre que se esperaría obtener según el valor de intensidad de fractura que se esté evaluando. Aquí se deducen 4 rangos que se analizarán en base al ancho de la berma (7.7 metros) de la geometría inicialmente propuesta para el caso de estudio:

- Rango 1: Para valores de intensidad de fractura entre 0 y 1 [FF/m] se espera tener quiebres de banco que varíen entre 3 a 4 metros. Dado lo anterior existe una pérdida de más de la mitad de la berma para esta geometría particular.
- Rango 2: Para valores de P_{10} entre 1 y 3 [FF/m] se espera tener quiebres de banco que varíen entre 4 a 5 metros. Aquí se presenta una pérdida de $\frac{3}{2}$ de la berma aproximadamente para esta geometría particular.
- Rango 3: Para valores de P_{10} entre 2.5 y 4 [FF/m] se espera tener quiebres de banco que varíen entre 5 a 6 metros, presentándose así una pérdida de $\frac{3}{4}$ de berma aproximadamente para esta geometría particular.
- Rango 4: Para valores de P_{10} mayores a 4 [FF/m] se deduce que los quiebres de banco serán mayores a 6 metros, ocurriendo aquí una pérdida completa de la berma para este caso particular.

5.1.2. Presencia relativa de volumen inestable

El porcentaje de volumen inestable presente a escala banco se analizará según el gráfico que muestra la tendencia de esta variable en función de la intensidad de fractura P_{10} , en el cual se demarcan 3 rangos (Figura 5-2).

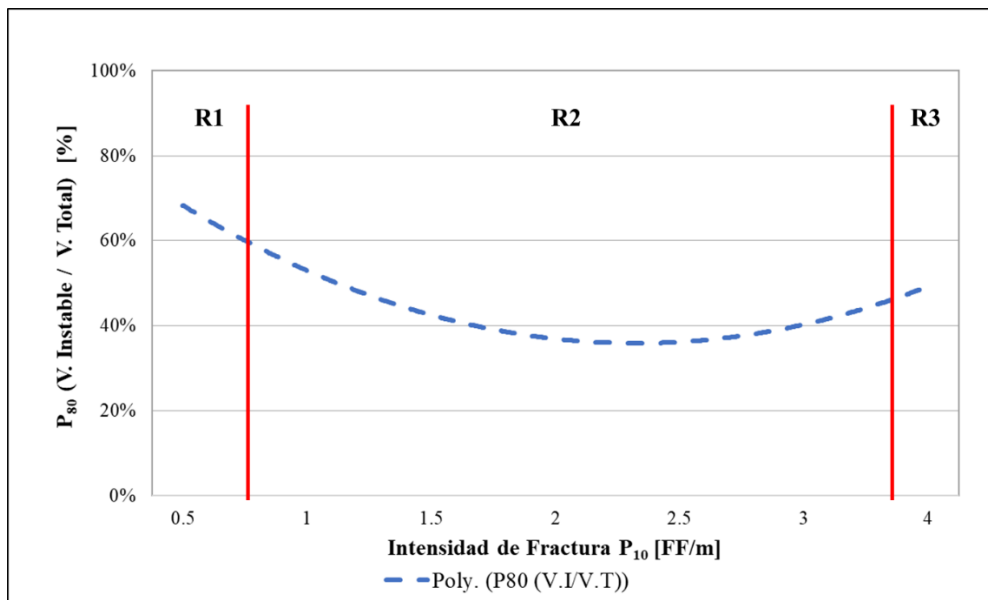


Figura 5 - 2: Rangos presencia relativa de volumen inestable para el Caso 1.

Para comprender el comportamiento de las tendencias de estas variables, se analizará por rango:

- Rango 1: En este rango, se puede notar que, a medida que se incrementa la intensidad de fractura, disminuye el porcentaje relativo de volumen inestable a escala banco. Observando la Figura 5-2, se tiene que para valores de intensidad de fractura entre 0 a

0.75 [FF/m], aproximadamente, se encuentra más de un 60% de volumen inestable respecto al total (rango alto) presente a escala banco.

La Figura 5-3 y Tabla 5-1 muestran las fracturas y volumen de los bloques generados a través del análisis cinemático de un modelo DFN con una intensidad de fracturas de 0.5 [FF/m]. Dada la poca presencia de joints (bajos valores de intensidad de fractura) es mucho más difícil generar bloques, los cuales al formarse serán pequeños y, por lo tanto, tendrán un menor volumen inestable que irá aumentando a medida que aumentamos el nivel de fracturamiento del macizo rocoso. Los bloques formados tienen una alta probabilidad de ser inestables, por lo que su proporción respecto al total es alta, lo que presenta un caso desfavorable para un análisis de estabilidad a escala banco.

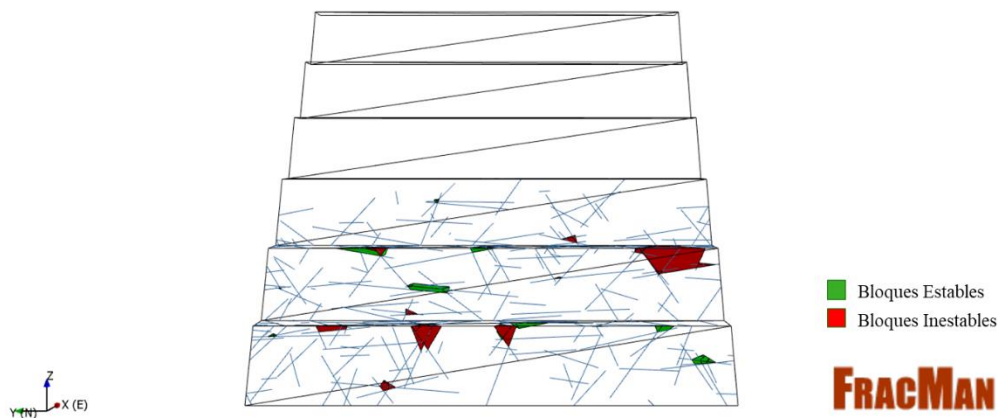


Figura 5 - 3: Análisis cinemático del modelo DFN 1 del Caso 1.

Tabla 5 - 1: Resumen del volumen para el Modelo DFN 1 del Caso 1.

Intensidad de Fracturas [FF/m]	0.5
Volumen Total [m³]	134
Volumen Inestable [m³]	102
Volumen Estable [m³]	32
Volumen máximo de bloque inestable [m³]	118
Volumen Inestable / Volumen Total [%]	76%

Rango 2: En este caso, a medida que aumenta el nivel de fracturamiento en el macizo rocoso, el porcentaje de volumen inestable respecto al total presenta cierta variabilidad. Esto es lo más parecido a la realidad, porque existen probabilidades variables de formación de bloques y de que estos puedan ser inestables.

En este rango, se puede inferir que el comportamiento de esta variable se debe a que se presentará una mayor concentración de estructuras pequeñas y estructuras de gran tamaño, las cuales influyen en la variabilidad de formación de bloques que pueden ser tanto estables como inestables.

Se tiene que, a partir de las 0.75 [FF/m], aproximadamente, el macizo rocoso comienza a tener una presencia relativa entre un 60% y 35% de volumen inestable, lo que se sitúa en un rango medio a bajo.

En la Figura 5-4 y Tabla 5-2, se observan dos casos de intensidad de fracturas asociados al rango 2l primero para un P_{10} de 1 [FF/m] y el punto de inflexión asociado a un P_{10} de 2 [FF/m]. Aquí se visualiza un claro aumento en la cantidad de bloques presentes y su volumen entre un modelo y otro. Por otro lado, al momento de evaluar la relación porcentual del volumen inestable respecto al total, esta disminuye al pasar de 1 [FF/m] a 2 [FF/m].

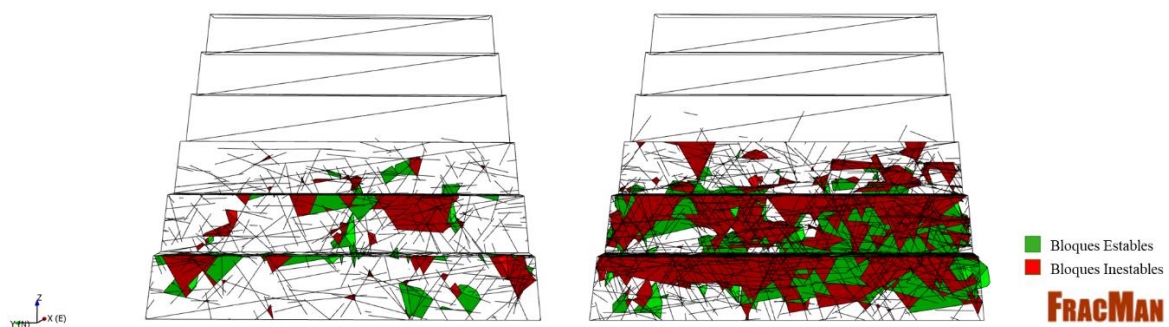


Figura 5 - 4: Análisis cinemático de los Modelos DFN 6 y 16 del Caso 1.

Tabla 5 - 2: Resumen del volumen para los Modelos DFN 6 y 16 del Caso 1.

Intensidad de Fracturas [FF/m]	1	2
Volumen Total [m ³]	597	6225
Volumen Inestable [m ³]	309	1886
Volumen Estable [m ³]	288	4339
Volumen máximo de bloque inestable [m ³]	356	1826
Volumen Inestable / Volumen Total [%]	52%	30%

- Rango 3: En este caso, se presenta que, a medida que incrementa el nivel de fracturamiento en el macizo rocoso, llegando a valores por sobre las 4 [FF/m], el porcentaje relativo de volumen inestable aumenta. Esto se puede interpretar dado el alto nivel de fracturamiento en el macizo rocoso, los bloques grandes también comienzan a fracturarse incrementando

el número de bloques, los cuales tendrán una alta probabilidad de ser inestables. Este fenómeno se puede visualizar en la Tabla 5-3, si bien la relación porcentual de volumen inestable respecto al total comienza a aumentar nuevamente, el bloque más grande en este caso tiene un volumen asociado de 103 [m³], estando en presencia de un macizo rocoso sumamente fracturado con gran cantidad de bloques asociados a volúmenes de bajo orden.

Tabla 5 - 3: Resumen del volumen para el Modelo DFN 30 del Caso 1.

Intensidad de Fracturas [FF/m]	4
Volumen Total [m³]	9488
Volumen Inestable [m³]	5034
Volumen Estable [m³]	4454
Volumen máximo de bloque inestable [m³]	103
Volumen Inestable / Volumen Total [%]	53%

5.1.3. Presencia relativa de bloques inestables

Al momento de evaluar la presencia relativa de bloques inestables a escala banco, podemos notar que su tendencia es decreciente y llegando a las 2 [FF/m] se comporta como una asíntota manteniéndose en un rango relativamente constante. Este comportamiento se debe a la probabilidad para generar bloques dado el nivel de fracturamiento del macizo rocoso.

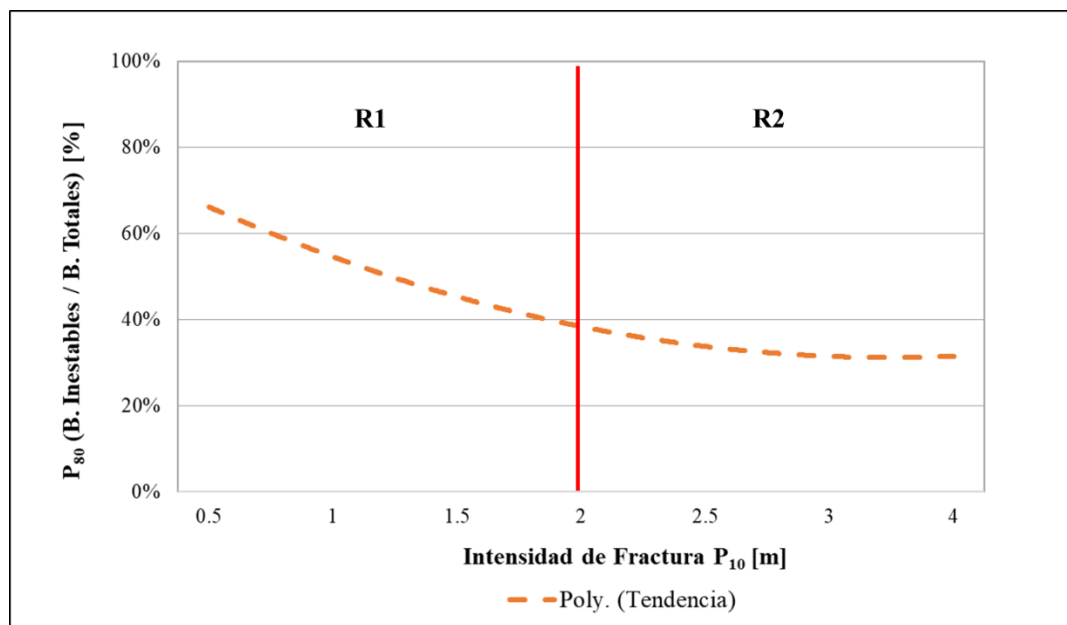


Figura 5 - 5: Rangos para la presencia relativa de bloques inestables del Caso 1.

Dado que el input de familias estructurales fue definido a priori desfavorable, para valores de intensidad de fractura bajos (rango 1), estaremos en presencia de un macizo rocoso poco

fracturado, por lo cual se generan pocos bloques, los cuales tienen una alta probabilidad de ser inestables. En este rango se estará situado en un entorno entre un 40% y un 60% de bloques inestables respecto al total a escala banco.

A medida que los valores de intensidad de fractura van aumentando, se presenta que la relación de bloques inestables respecto al total comienza a disminuir, encontrándonos en un rango variable de probabilidad de formación de estos mismos. Esto se debe a que, al igual que bloques inestables, se generan bloques estables que afectan esta relación.

Por último, la tendencia se aproxima a una asíntota en el rango 2, acercándose a valores por sobre las 2 [FF/m]. Aquí el macizo rocoso se encuentra tan fracturado que la relación porcentual de bloques inestables respecto al total se mantiene en el equilibrio sobre el 20%. Esto permitiría suponer que, a pesar de que se aumente el fracturamiento a P_{10} mayores a 4 fracturas por metro, la relación de bloques inestables sobre el total no debería verse afectada mayormente.

En la Figura 5-5 y Tabla 5-4, se muestra cómo al tener un macizo rocoso muy fracturado aumenta el número de bloques considerablemente, además de cómo se da la relación de los bloques inestables respecto al total.

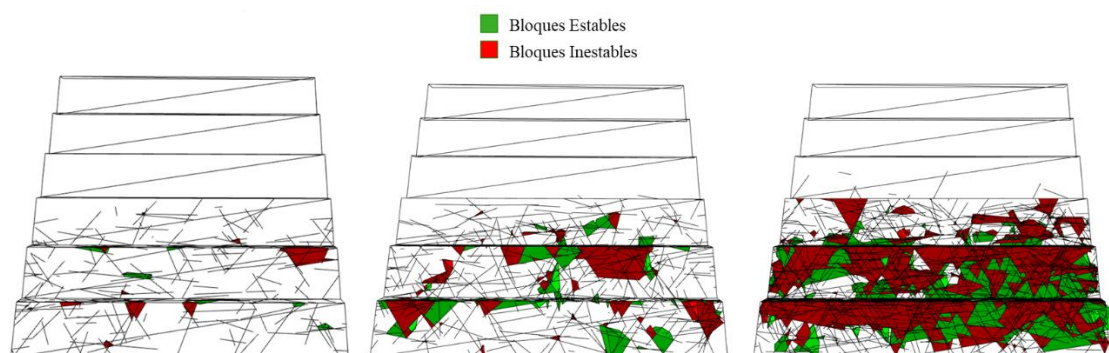


Figura 5 - 6: Variación de la cantidad de bloques por Modelo DFN del Caso 1.

Tabla 5 - 4: Resumen de los bloques por los Modelos DFN 1, 6 y 30 del Caso 1.

Intensidad de Fracturas [FF/m]	0.5	1	4
N° Bloques Totales	55	347	180.448
N° Bloques Inestables	35	198	51.351
N° Bloques Estables	20	149	129.097
Relación Bloques Totales / Bloques Inestables [%]	63%	57%	28%

5.2. Caso 2: Sensibilización tamaño de fracturas a escala banco

5.2.1. Estimación distancia backbreak

Se interpreta a través de la Figura 5-7 que, a medida que el tamaño de fractura (media del radio equivalente r_e) aumenta, el quiebre en la geometría del banco se mantiene relativamente invariable. Esto se debe a que, si bien el tamaño cumple un rol dentro de la formación de sobrequebre, es la orientación de las estructuras (que se mantienen invariables durante todo el estudio) las que influyen más en su formación.

Se presentan dos datos atípicos, que no responden a la tendencia anterior. No entran al análisis de esta variable, dado que para grandes tamaños de estructuras se espera que el sobrequebre del banco aumente o, como en este caso, se mantenga dentro de un rango invariable.

Por otro lado, la Figura 5-7 muestra un límite inferior de 4 metros para valores de media del r_e inferiores a 21 [m] y un límite superior de 6 metros para valores de media r_e desde los 7 [m]. Según la tendencia lineal, se espera que el quiebre de banco varíe solamente dentro de un rango de 6 a 4 [m] para valores superiores a 23 [m] de media de radio equivalente.

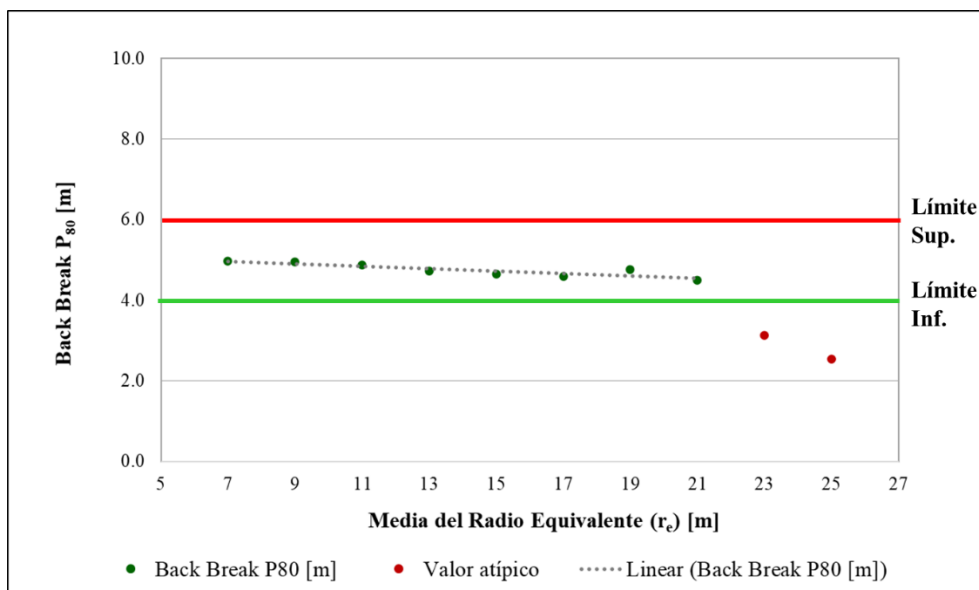


Figura 5 - 7: Límites distancia Backbreak del Caso 2.

5.2.2. Presencia de volumen inestable

Al momento de evaluar la presencia relativa de volumen inestable a escala banco, se puede notar que su tendencia es lineal, creciente y directamente proporcional (Figura 5-8). Es decir, a medida que aumenta el tamaño de fractura (media del r_e) también incrementa la presencia de volumen inestable en el macizo rocoso.

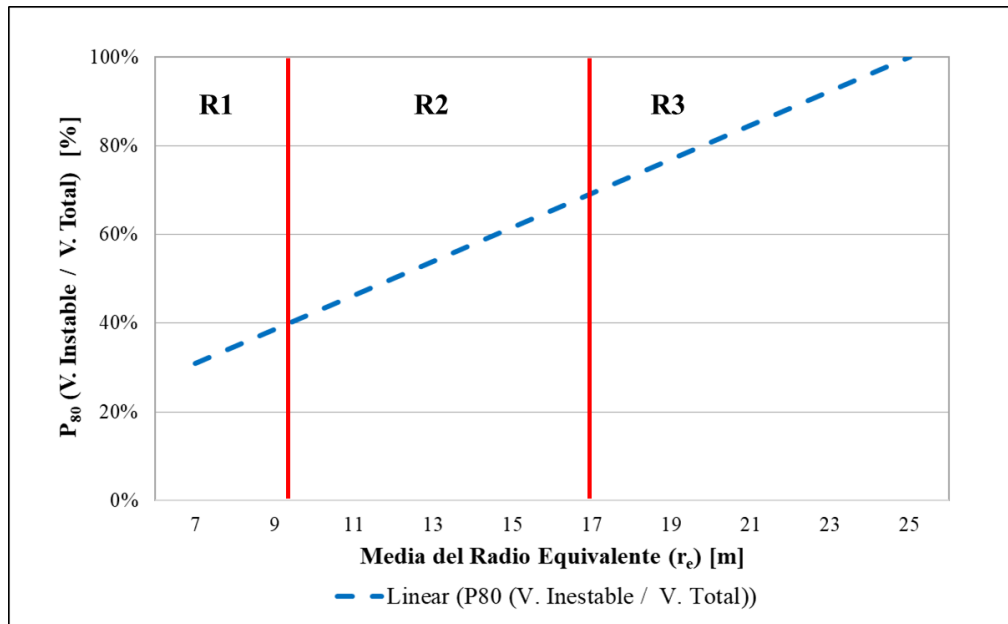


Figura 5 - 8: Rangos para la presencia relativa de volumen inestable del Caso 2.

Para este caso se separa en rangos, los cuales permitirán analizar la presencia relativa de volumen inestable según si es alta, media o baja (Figura 5-8).

- Rango 1: Para valores de media del r_e entre 7 a 9 [m], se presenta hasta un 40% (rango bajo) de volumen inestable respecto al total a escala banco. Aquí el macizo rocoso se ve expuesto a estructuras pequeñas (fracturas), que se encuentran en el orden de longitud desde medio banco aproximadamente. Por lo tanto, se tendrá una mayor presencia de fracturas para cumplir con el valor de intensidad fijado (4.8 [FF/m]), con esto se generará un gran número de bloques, de los cuales, en relación con el total, muy pocos tendrán asociado un volumen inestable (Figura 5-9 y Tabla 5-5). Explicándose así el que la presencia relativa de volumen inestable está bajo el 40%.

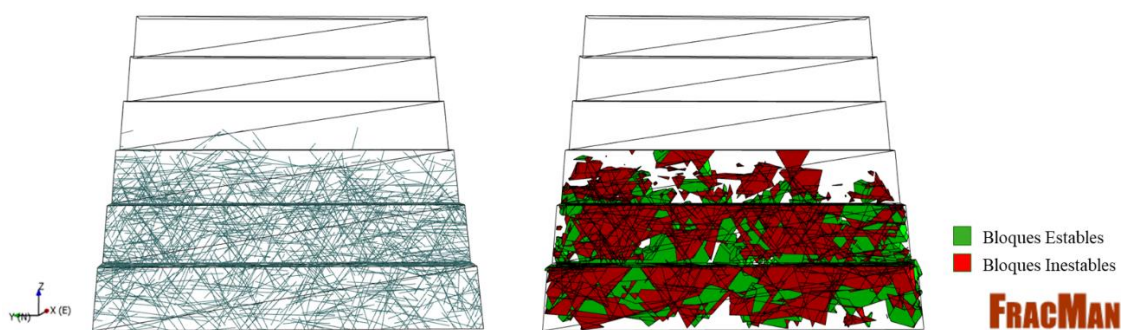


Figura 5 - 9: Fracturas y análisis cinemático Modelo DFN 1 del Caso 2.

Tabla 5 - 5: Resumen del volumen para el Modelo DFN 1 del Caso 2.

Media del Radio Equivalente [m]	7
Volumen Total [m³]	7865
Volumen Inestable [m³]	2705
Volumen Estable [m³]	5160
Volumen máximo de bloque inestable [m³]	1900
Relación Volumen Inestable / Volumen Total [%]	34%

- Rango 2: Para valores de media del r_e entre 9 a 17 [m], se presenta entre un 40% a 70% (rango medio) de volumen inestable respecto al total a escala banco. En este caso, el macizo rocoso es fracturado por estructuras con un orden de longitud desde un banco. En la Figura 5-10 y la Tabla 5-6, se muestra cómo al estar en presencia de estructuras más grandes, disminuye la cantidad presente en el macizo rocoso dado el espacio que ocupan. Esto también provoca que se generen menos bloques (menor volumen total), aumentando la probabilidad de que estos tengan asociados volúmenes inestables.

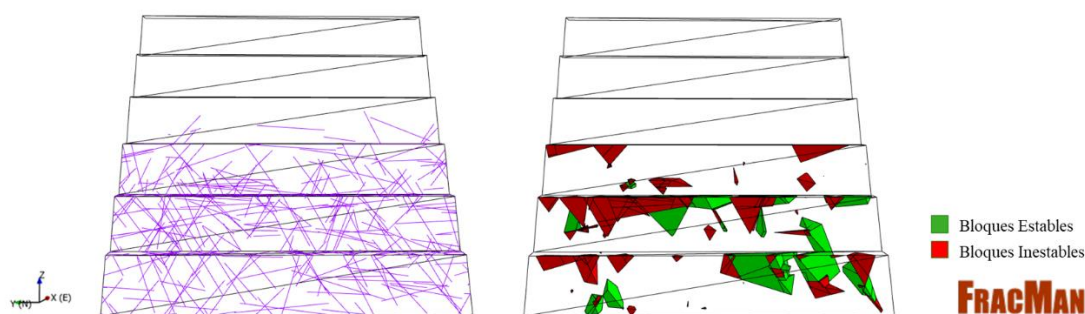


Figura 5 - 10: Fracturas y análisis cinemático Modelo DFN 3 del Caso 2.

Tabla 5 - 6: Resumen del volumen para el Modelo DFN 3 del Caso 2.

Media del Radio Equivalente [m]	11
Volumen Total [m³]	5854
Volumen Inestable [m³]	3024
Volumen Estable [m³]	2830
Volumen máximo de bloque inestable [m³]	309
Relación Volumen Inestable / Volumen Total [%]	51%

- Rango 3: Para valores de media del r_e entre 17 a 25 [m], se presenta entre un 70% a 100% (rango alto) de volumen inestable respecto al total a escala banco. Para este caso, el macizo

rocoso es fracturado por estructuras que sobrepasan el orden de longitud de más de un banco.

Se está en presencia de fracturas extremadamente grandes que generan muy pocos bloques, disminuyendo así el volumen total considerablemente (Figura 5-11). Por lo tanto, la probabilidad de que los bloques generados tengan asociado un volumen inestable incrementa, llegando a un orden por sobre el 70% de volumen inestable sobre el total.

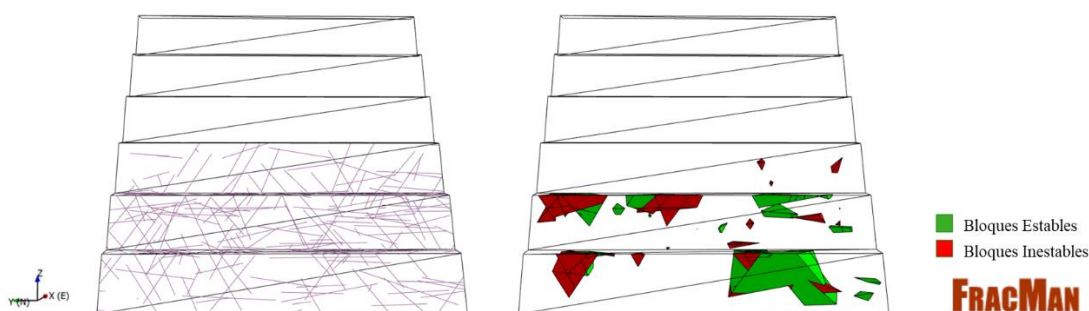


Figura 5 - 11: Fracturas y análisis cinemático Modelo DFN 8 del Caso 2.

Tabla 5 - 7: Resumen del volumen para el Modelo DFN 8 del Caso 2.

Media del Radio Equivalente [m]	21
Volumen Total [m³]	149
Volumen Inestable [m³]	115
Volumen Estable [m³]	34
Volumen máximo de bloque inestable [m³]	98
Relación Volumen Inestable / Volumen Total [%]	77%

- Rango 4: Para valores de la media del r_e mayor o igual a 25 [m], la presencia de volumen inestable sobre el total a escala banco llega al 100%, es decir, el macizo rocoso en su totalidad está conformado por bloques inestables.

5.2.3. Presencia de bloques inestables

Se tiene que, a medida que aumenta el tamaño de las fracturas (media del r_e) presentes en el macizo rocoso, este presenta un incremento en la presencia relativa de bloques inestables. Esto se interpreta a través de la tendencia que presentan estas variables, la cual es lineal, creciente y directamente proporcional (Figura 5-12).

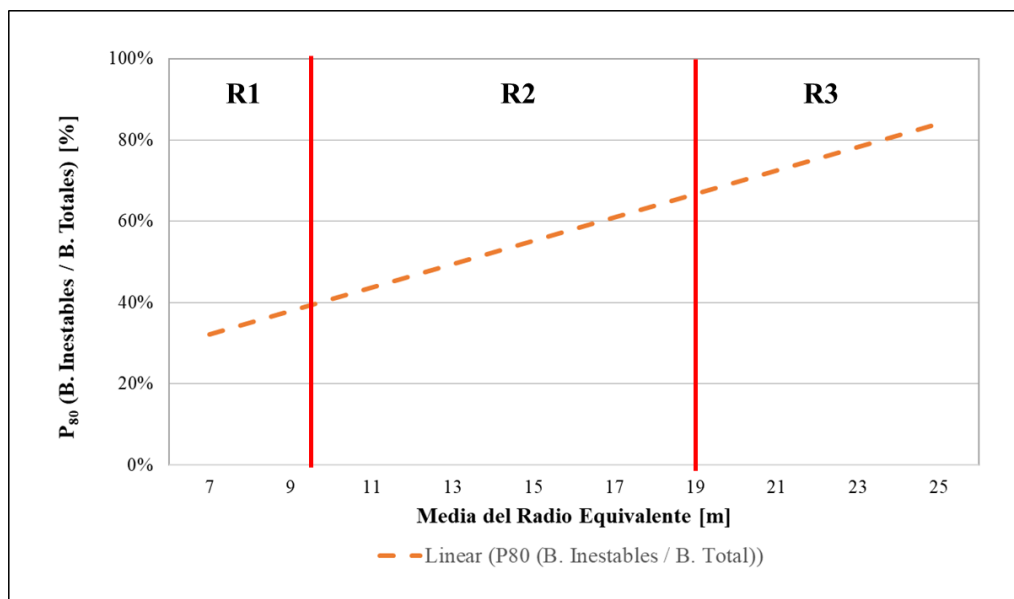


Figura 5 - 12: Rangos presencia relativa de bloques inestables del Caso 2.

Para este caso se separa en rangos, los cuales permitirán analizar la presencia relativa de bloques inestables según si es alta, media o baja.

La Figura 5-13 y Tabla 5-8 nos muestran cómo para cada rango la relación de bloques inestables respecto al total para casos particulares, que se analizarán posteriormente.

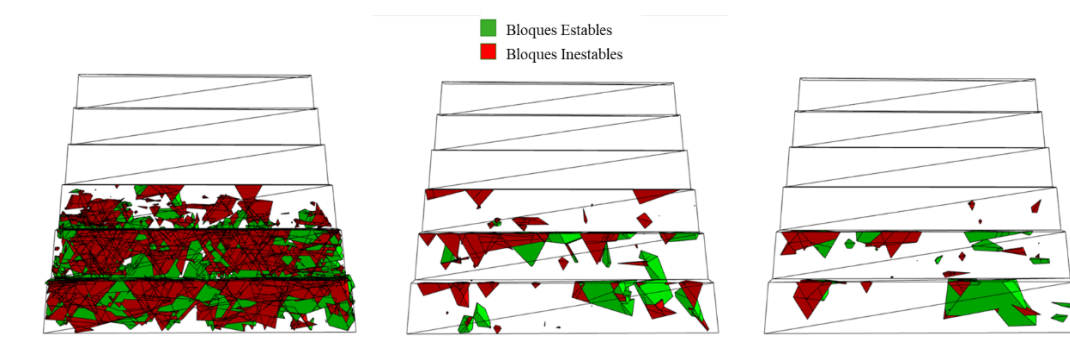


Figura 5 - 13: Variación de la cantidad de bloques por Modelo DFN del Caso 2.

Tabla 5 - 8: Resumen de los bloques por los Modelos DFN 1, 3 y 8 del Caso 2.

Rango	1	2	3
Media del Radio Equivalente [m]	7	11	21
N° Bloques Totales	25555	4737	77
N° Bloques Inestables	7616	2529	47
N° Bloques Estables	17939	2208	30
Relación Bloques Totales / Bloques Inestables [%]	30%	53%	74%

- Rango 1: Para valores de media del r_e entre 7 a 9 [m] se presenta hasta un 40% (rango bajo) de bloques inestables respecto al total a escala banco. Al estar en presencia de una gran cantidad de fracturas pequeñas, se generan muchos bloques, disminuyendo así la probabilidad de que estos sean inestables.
- Rango 2: Para valores de media del r_e entre 9 a 19 [m] se presenta entre un 40% a 70% (rango medio) de bloques inestables respecto al total a escala banco. Aquí se presentan fracturas de largos variables, pero de mayor magnitud, donde la cantidad de bloques que se generan comienza a disminuir, pero la presencia relativa de los bloques inestables comienza a aumentar, dado que al tener menor número de fracturas aumenta la probabilidad de que los bloques que logran formarse sean inestables.
- Rango 3: Para valores de media del r_e entre 19 a 25 [m] se presenta entre un 70% a 100% (rango alto) de bloques inestables respecto al total a escala banco. El macizo rocoso presenta fracturas de órdenes de longitud mayores a dos bancos, al ser tan grandes, se producen pocos bloques, donde los que se logran generar tienen una alta probabilidad de ser inestables casi en su totalidad.

5.3. Matrices de variación

Finalmente, se generan matrices de variación a través del análisis de la presencia relativa de volumen y bloques inestables a escala banco dada la variación de la intensidad o tamaño de la fractura. Las matrices permiten comprender cómo cambia una variable de interés en respuesta a las variaciones del parámetro en cuestión. Esto es crucial para identificar la importancia relativa del parámetro y su influencia en la estabilidad del talud.

- ¿Cuál es su utilidad?

Dado un caso hipotético, se tiene una base de un mapeo geotécnico en el cual se obtiene un P_{10} de estructuras mapeadas de 1 [FF/m] (P_{10} esperado), pero luego dada una actualización de la base de datos se encuentra una mayor desviación y este valor de intensidad de fracturas aumenta a 2.5 [FF/m] (potencial P_{10}). Realizando la intersección en la Figura 5-14, entre el valor esperado y potencial, se tiene que la relación del volumen inestable respecto al total se reduce en un 30% y la relación de bloques inestables sobre el total se reduce en un 40% cuando pasa de 1 [FF/m] a 2.5 [FF/m].

Estas matrices facilitan la toma de decisiones fundamentada al proporcionar información detallada sobre cómo cambian los resultados en función de las variaciones del parámetro. Este

ejemplo, aplica de igual manera cuando se evalúa el tamaño de estructuras respecto a la media del radio equivalente.

$\Delta \left(\frac{V.I}{V.T} \right) \%$		POTENCIAL P_{10} [FF/m]				
		$0 a 0.5$	$0.5 a 2$	$2 a 3$	$3 a 4$	4Δ
P_{10} ESPERADO [FF/m]	$0 a 0.5$	Δ 0%	Δ -30%	Δ -50%	Δ -40%	Δ -5%
	$0.5 a 2$	Δ 40%	Δ 0%	Δ -30%	Δ -20%	Δ 40%
	$2 a 3$	Δ 90%	Δ 30%	Δ 0%	Δ 10%	Δ 80%
	$3 a 4$	Δ 70%	Δ 20%	Δ -10%	Δ 0%	Δ 60%
	4Δ	Δ 5%	Δ -30%	Δ -50%	Δ -40%	Δ 0%

Δ Reducción	Δ Aumento	Δ Constante
--------------------	------------------	--------------------

Figura 5 - 14: Matriz de variación de la presencia relativa de volumen inestable dado un rango P_{10} .

$\Delta \left(\frac{B.I}{B.T} \right) \%$		POTENCIAL P_{10} [FF/m]	
		$0 a 2$	2Δ
P_{10} ESPERADO [FF/m]	$0 a 2$	0%	-40%
	2Δ	60%	0%

Δ Reducción	Δ Aumento	Δ Constante
--------------------	------------------	--------------------

Figura 5 - 15: Matriz de variación de la presencia relativa de bloques inestables dado un rango P_{10} .

$\Delta \left(\frac{V.I}{V.T} \right) \%$		POTENCIAL Media Re [m]		
		7 a 9	9 a 19	19 a 25
Media Re ESPERADO [m]	7 a 9	$\Delta 0\%$	$\Delta 40\%$	$\Delta 100\% >$
	9 a 19	$\Delta -30\%$	$\Delta 0\%$	$\Delta 70\%$
	19 a 25	$\Delta -60\%$	$\Delta -40\%$	$\Delta 0\%$

Δ Reducción	Δ Aumento	Δ Constante
--------------------	------------------	--------------------

Figura 5 - 16: Matriz de variación de la presencia relativa de volumen inestable dado un rango de medial r_e .

$\Delta \left(\frac{B.I}{B.T} \right) \%$		POTENCIAL Media Re [m]		
		7 a 9	9 a 21	21 a 25
Media Re ESPERADO [m]	7 a 9	$\Delta 0\%$	$\Delta 60\%$	$\Delta 100\% >$
	9 a 21	$\Delta -40\%$	$\Delta 0\%$	$\Delta 40\%$
	21 a 25	$\Delta -60\%$	$\Delta -30\%$	$\Delta 0\%$

Δ Reducción	Δ Aumento	Δ Constante
--------------------	------------------	--------------------

Figura 5 - 17: Matriz de variación de la presencia relativa de bloques inestables dado un rango de medial r_e .

6. DISCUSIÓN

En este estudio se indagó en la influencia del tamaño e intensidad de fracturas en la estabilidad de taludes rocosos mediante el análisis de modelos de Redes de Fracturas Discretas (DFN). Los parámetros de tamaño e intensidad de fracturas desempeñan un papel crucial en la caracterización del comportamiento geomecánico de los macizos rocosos y su susceptibilidad a deslizamientos y colapsos. En este contexto, examinamos detalladamente cómo estos parámetros afectan la configuración y geometría de las superficies de falla en los taludes, así como la probabilidad de sobrequebre y la generación de bloques inestables. Los resultados obtenidos proporcionan valiosa información para comprender y predecir la estabilidad de taludes en entornos geotécnicos complejos, y establecen una base sólida para futuras investigaciones en el campo de la geomecánica y la geología aplicada.

- Parámetros de modelos DFN

El tamaño e intensidad de las fracturas en los modelos de Redes de Fracturas Discretas (DFN) pueden tener un impacto significativo en la estabilidad de un talud, en base a este estudio se puede concluir lo siguiente respecto a estos parámetros:

- i. Tamaño de fracturas

Un talud que se encuentra en presencia de fracturas grandes tiene un alto riesgo de deslizamiento o colapso. Las estructuras grandes pueden actuar como superficies de debilidad significativas, influyendo en la configuración y geometría de las superficies de falla en el talud. Por otro lado, el tamaño de fracturas es un factor potencial para la generación de bloques inestables. Las fracturas pueden fragmentar el material del talud en bloques individuales. Estos bloques pueden volverse inestables debido a la acción de diversos factores (erosión, gravedad, entre otros) aumentando el riesgo de caída de rocas y deslizamientos de bloques en el talud.

El tamaño de fracturas en los modelos DFN se puede definir en base a una variedad de distribuciones de probabilidad.

La selección de la distribución para definir el tamaño de fracturas de un modelo DFN dependerá de la escala de análisis del talud, datos disponibles, objetivos del modelo, tipo de formación geológica, entre otros factores. En este estudio se utilizó la distribución Log-Normal, la cual proporciona un buen ajuste para describir la variabilidad en las longitudes de fracturas a escala banco (M. Moosavi, R. Hassanizadeh, 2013). Esta distribución tiende a ser más homogénea en términos de tamaños de fracturas, centrándolas a un valor medio (media del radio equivalente para este caso) para modelar el comportamiento del macizo rocoso. Además, representa de la

mejor manera la realidad de un macizo rocoso analizado a escalas más pequeñas, donde existen estructuras de tamaños variables, pero que siguen una tendencia uniforme.

Para escalas de análisis más grandes (escala interrampa o multi-interrampa), se tiende a ocupar la distribución Power Law (Ley de Potencias) para definir el tamaño de fracturas. La presencia de una distribución Power Law puede indicar una alta incidencia de fracturas pequeñas y potencialmente una mayor densidad de fracturas en el macizo rocoso, reflejando la complejidad estructural a gran escala.

ii. Intensidad de fracturas

La intensidad de fracturas puede variar considerablemente en el espacio, tanto para escalas grandes (interrampa o multi-interrampa) o escalas más acotadas como los análisis a escala banco. Existen diferentes formas para poder caracterizar este parámetro, que, dependiendo los objetivos específicos del estudio y la información requerida sobre el macizo rocoso, se selecciona cuál utilizar. En este estudio se utilizaron dos métodos para caracterizar los modelos DFN, el P_{10} y P_{32} , los cuales dependen de la dimensión de la región de medición y la dimensión de la medida de fractura.

La intensidad de fracturas P_{32} es un parámetro importante para generar propiedades tridimensionales de redes de fracturas en modelos geotécnicos y geológicos. El P_{32} genera una representación realista de la distribución y la geometría de las fracturas, en base a su medida de la densidad de fracturas en el macizo rocoso. En cambio, las medidas tradicionales ignoran los complejos problemas de sesgo de orientación, disposición espacial y tamaño de discontinuidad. Si bien, el P_{10} es un parámetro de mucha interpretación, la cual puede verse afectada por diversos factores que deben ser considerados cuidadosamente para evitar sesgo en los análisis. Este se utiliza para escalar los valores de P_{32} , dado que es un parámetro más conocido al momento de caracterizar intensidades de fracturas y permite trabajar a base de rangos conocidos.

Adentrándose en los efectos que tiene la intensidad de fracturas en un macizo rocoso, se puede concluir que una alta intensidad de fracturas puede debilitar la estabilidad de los taludes rocosos, ya que las fracturas pueden actuar como superficies de debilidad y facilitar el deslizamiento del macizo rocoso. Las fracturas pueden crear zonas de desprendimiento o fallas potenciales que aumentan el riesgo de colapso de los taludes.

- Principales hallazgos

Dentro de los principales hallazgos que se pueden mencionar con base de los resultados y análisis de este estudio están:

- i. Para esta memoria se utilizaron set de estructuras que se mantuvieron invariables, fijados dentro de un rango de direcciones de manto que favorecieran la formación de bloques, generando una condición desfavorable para el macizo rocoso. A pesar de que tanto la intensidad de fracturas como el tamaño de estas son factores relevantes, se observa que la orientación de las estructuras tiene una influencia significativamente mayor en la interacción de las fracturas y, por lo tanto, en la probabilidad de sobrequebre.

Al realizar los análisis de la estimación de la distancia backbreak para ambos casos de sensibilización, se puede concluir que la orientación de las estructuras es mucho más influyente en la formación del sobrequebre del banco, que la intensidad y tamaño de fracturas. Para ambos casos, el rango en el que varían en su totalidad los datos se encuentra entre 4 a 6 [m] de backbreak, el cual se mantiene casi invariable a medida que se varía la frecuencia de fracturas por metro o la media del radio equivalente. Por ejemplo, para pasar de una intensidad de fractura de 1 [FF/m] a 2 [FF/m] (aumento de un 200% del P_{10}), la distancia del sobrequebre aumentó en un 18% y llegando a 4 [FF/m] (aumento del 400% del P_{10}), el sobrequebre aumentó en un 36% aproximadamente. Esto ocurre de manera similar en el caso 2, para pasar de estructuras con un radio equivalente de 7 a 21 [m] (incremento del 300% de media del re), el sobrequebre se redujo en un 9%. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar la orientación de las estructuras al evaluar la estabilidad de los bancos en proyectos geotécnicos.

- ii. Con respecto a la estimación de la relación relativa de volúmenes y bloques inestables a escala banco, para cada caso existe un comportamiento particular.

A medida que aumenta el nivel de fracturamiento en el macizo rocoso en un análisis a escala banco, se tiene que la relación de volumen y bloques inestable respecto al total tiene un comportamiento variable dada la probabilidad de generación de los bloques con volumen inestable asociado. Para valores bajos de intensidad de fracturas, se está en presencia de un macizo rocoso poco fracturado, por lo tanto, los bloques que logren formarse tendrán una alta probabilidad de tener volúmenes inestables, y a medida que el fracturamiento va aumentando, esta probabilidad comienza a ser variable dado el incremento de bloques. Respecto a la presencia relativa de bloques inestables, se tiene que, si bien el nivel de fracturamiento influye considerablemente en el número total de bloques que se generan, la relación de que estos sean inestables respecto al total disminuye hasta llegar a un equilibrio por sobre el 20% para valores por sobre las 2 [FF/m].

Finalmente, se considera que, para valores muy bajos y altos de intensidad de fracturas, se encuentra en entornos donde existe una alta probabilidad de que este falle. Para valores

medios de fracturamiento se está en entornos donde esta probabilidad es variable, dado que la relación de bloques o volúmenes estables respecto al total comienza a disminuir.

Por otro lado, cuando se evalúa el incremento del tamaño de las estructuras (media del r_e), la relación de volúmenes y bloques inestables sobre el total también aumenta. El tamaño de las estructuras influye considerablemente en la probabilidad de que los bloques generados sean inestables.

Para estructuras más pequeñas, existe una alta generación de bloques donde la relación relativa de volumen y bloques inestable es baja; en cambio, para estructuras más grandes se presenta que la generación de bloques disminuye, por lo tanto, la probabilidad de que estos sean inestables aumenta. Con esto se concluye que un macizo rocoso expuesto a estructuras de órdenes de magnitud muy altos tiende a tener una alta probabilidad de que este falle.

- iii. Se obtienen matrices dada la variación de volumen y bloques inestables respecto al total, las cuales, al proporcionar información detallada sobre cómo cambian los resultados en función de las variaciones del parámetro, facilitan la toma de decisiones fundamentadas. Las matrices ayudan a identificar los valores óptimos o críticos del parámetro que maximizan o minimizan la variable de interés. Por otro lado, ayuda a reconocer de manera simple las relaciones complejas entre el parámetro y la variable de interés, así como tendencias que pueden no ser evidentes a simple vista.

- Avances futuros

Si bien, la geomecánica puede ser impredecible y variable en ciertos aspectos, un enfoque riguroso de caracterización del subsuelo, análisis de riesgos y aplicación de principios geotécnicos puede ayudar a mitigar la incertidumbre y mejorar la capacidad de prever y gestionar los desafíos geotécnicos en proyectos o estudios de estabilidad.

Es fundamental profundizar en el estudio de la geomecánica debido a la limitación que presentan las herramientas predictivas actuales con el paso del tiempo. A medida se avanza en el conocimiento y la tecnología, se hace evidente que algunas de las herramientas de predicción utilizadas en el pasado pueden volverse obsoletas o insuficientes para abordar los desafíos geotécnicos contemporáneos. Indagar más allá en la geomecánica nos permite desarrollar nuevas herramientas, técnicas y metodologías que sean más precisas, confiables y adaptables a las condiciones cambiantes del subsuelo. Esto puede implicar el uso de tecnologías avanzadas de exploración geotécnica, modelado numérico avanzado, análisis de datos geoespaciales y métodos innovadores de monitoreo y control de riesgos geotécnicos.

La modelación de DFN es una herramienta moderna y de gran relevancia en el ámbito de la geomecánica y geología aplicada. A pesar de no ser tan conocida como otras técnicas de modelado geotécnico, cada vez se utiliza y requiere saber más de sus aplicaciones dado que tiene la capacidad de representar de manera realista y detallada la red de fracturas en un macizo rocoso.

Es así como este estudio pretende ser un punto de partida para la comprensión de los parámetros, intensidad y tamaño de fracturas que componen un modelo DFN y en cómo estos influyen en la estabilidad de un macizo rocoso. Por otro lado, los DFN están compuestos por más parámetros, donde este estudio se puede utilizar como guía para realizar futuras sensibilizaciones. Esta es una herramienta que permitirá estudiar un macizo rocoso desde otra perspectiva y así poder comprender en profundidad cómo este se comporta cuando está en presencia de una red de fracturas.

7. CONCLUSIONES

La presente investigación ha revelado la importancia crítica de los parámetros de tamaño e intensidad de fracturas en los modelos de Redes de Fracturas Discretas (DFN) para la evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a escala banco. Mediante un análisis de sensibilidad detallado, se identificaron rangos clave de estos parámetros que ejercen una influencia significativa en la estabilidad del talud, destacando la necesidad de una selección precisa para mejorar la precisión de las predicciones geotécnicas.

La validación exitosa de las herramientas de modelado, particularmente la generación de DFNs utilizando el software Fracman®, proporciona una base sólida para respaldar la confiabilidad de los resultados obtenidos y su aplicabilidad en futuros análisis geotécnicos. Los hallazgos revelaron cómo la variación en el tamaño e intensidad de fracturas afecta la geometría y configuración de las fracturas en el talud, lo que proporciona una comprensión más profunda de los mecanismos de inestabilidad. Además, la evaluación de la estimación de la distancia backbreak en respuesta a cambios en los parámetros de fracturas ha permitido una mejor comprensión de la propensión a los deslizamientos y colapsos en el talud.

La generación de matrices de variabilidad ha facilitado una representación visual clara de los resultados, proporcionando una herramienta poderosa para la toma de decisiones informadas en la gestión de riesgos geotécnicos. En conjunto, estos hallazgos y conclusiones contribuyen significativamente al avance del conocimiento en el campo de la geomecánica y proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en ingeniería civil y geotecnia.

8. REFERENCIAS

- B. Dverstop & J. Andersson. (1989). Application of the discrete fracture network concept with filed data: Possibilities of model calibration and validation, *Water Resour. Res.*, 25, 540-550.
- C. Guajardo, J. Jakubec, E. Esterhuizen, H. Pichuante, A. Thomas. (2022). The Discrete Fracture Network-Block Caving Fragmentation hybrid method: A new tool to assess fragmentation of block caving mining projects. [Presentación] Caving.
- D. Priest & A. Hudson. (1976). Discontinuity Spacings in Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 13, pp. 135-148. Pergamon Press. Printed in Great Britain.
- E. Hoek & J. Bray. (1981). *Rock Slope Engineering: Third Edition*. [Libro]. British Library Cataloguing in Publication Data. ISBN 0-419-16010-8 (pbk).
- E. Odling. (1997) Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway. *Journal of Structural Geology* Volume 19 issue 10 g. PH: 80191-8141(97)00041-2.
- Golder Associates (UK) Ltd. (2021). *Fracman 8.0 Manual*. Cavendish House, Bourne End Business Park, Cores End Road, Bourne End, Buckinghamshire, SL8 5AS, UK.
- E. Montiel, P. Varona, C. Fernandez, Z. Espinoza. (2020). Use of discrete fracture networks in 3D numerical modelling for stability analysis in open pits. *Slope Stability 2020 - PM Dight* (ed.) © Australian Centre for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9876389-7-7. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2025_60_Montiel/
- J. Chilès, H. Wackernagel, H. Beucher, C. Lantuéjoul & P. Élion. (2008). Estimating fracture density from a linear or areal survey.
- J. Lorig & P. Varona. (2013). *Guidelines for numerical modelling of rock support for mines*. Australian Centre for Geomechanics, Perth. ISBN 978-0-9806154-7-0. [doi:10.36487/ACG_rep/1304_04_Lorig](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1304_04_Lorig)
- K. Kurt. (2019) Construcción de modelos de Redes de Fracturas Discretas (DFN) a escala fase, para el análisis de estabilidad y geometrias de inestabilidades estructurales en el rajo Don Luis,

Codelco División Andina, V región de Valparaíso, Chile. [Memoria]. Universidad Andrés Bello.

K. Sharif. (2019) Failure characterization in Rock Engineering using a unified DFN-FDEM analysis approach. [Tesis]. University Of British Columbia.

M. Valerio, S. Rogers, K. Lawrence, C. Byrne, K. Veltin, T. Darakjian, M. Gaida, D. Cambio, G. Chapin. (2020). Improving bench design through discrete fracture network analysis. Golder Associates member of WSP. [Presentación]. International Slope Stability in Mining Conference.

M. Valerio, S. Rogers, KP. Lawrence, KM. Moffitt, B. Rysdahl & M. Gaida. (2020) Discrete fracture network based approaches to assessing inter-ramp design. Slope Stability 2020 - PM Dight (ed.) © Australian Centre for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9876389-7-7 Slope Stability 1017. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/2025_67_Valerio/

P. Warburton. (1980). A stereological interpretation of joint trace data. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts Volume 17, Issue 4, Pages 181-190. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(80\)91084-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)91084-0)

S. Valiente, M. Sobrecases, O. Díaz. (2016). Estabilidad taludes, conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo. Revista Civilizate. (issn: 2411-944X) <http://hdl.handle.net/10251/76781>

S. Marambio & I. Pérez. (2023). Aplicaciones del uso de Modelos de Fracturas Discretas (DFN) y Análisis Probabilístico en Túneles – Uso de Herramienta Computacional Fracman®. [Presentación]. VI Congreso en Desarrollo Rápido de Túneles para la Minería.

W. Dershowitz. (1984). Rock joint systems. PhD. Thesis. MIT, Cambridge, MA. with Joint System Models. Rock Mechanics and Rock Engineering 21, 21—51.

W. Dershowitz & H. Einstein. (1988). Article Characterizing Rock Joint Geometry.

W. Dershowitz & H. Herda. (1992). Interpretation of fracture spacing and intensity. Rock Mechanics, Tillerson & Wawersik (eds). ISBN 90 5410 045 1.

W. Dershowitz, J. Hermanson, S. Follin & M. Mauldon. (2000). Fracture Intensity Measures in 1-D, 2-D, and 3-D. Paper presented at the 4th North American Rock Mechanics Symposium, Seattle, Washington. Paper Number: ARMA-2000-0849.

W. Dershowitz, P. La Pointe, T. Doe. (2004). Advances in discrete fracture network modeling. Proceedings of the US EPA/NGWA fractured rock conference, Portland.

9. ANEXO

Anexo 9 - 1: Distancia Backbreak por iteración del Modelo DFN 4.

Iteración	Distancia Backbreak [m]
1	7.0
2	6.8
3	7.7
4	7.7
5	7.7
6	7.7
7	6.5
8	7.4
9	7.5
10	6.8
11	7.2
12	7.7
13	7.6
14	5.7
15	5.8
16	7.0
17	4.4
18	5.8
19	5.5
20	6.9
21	6.9
22	5.7
23	7.3
24	6.8
25	7.7
26	6.7
27	5.1
28	7.7
29	6.7
30	7.7
31	5.8
32	5.7
33	3.9
34	6.1
35	7.7
36	7.7
37	7.7
38	7.2
39	7.7
40	6.6
41	5.6
42	4.3
43	7.3
44	7.0
45	5.2
46	4.5
47	7.3
48	6.5
49	4.9
50	6.0

Anexo 9 - 2: Volumen por iteración del Modelo DFN 4.

Iteración	Volume total [m ³]	Volumen Inestable [m ³]
1	4617	2591
2	6011	2179
3	4997	2571
4	6404	2067
5	7337	2110
6	5892	2332
7	7692	2981
8	5396	2466
9	7955	3328
10	5816	1577
11	8314	2419
12	5001	3043
13	6049	2538
14	7538	2222
15	4943	1446
16	9578	4067
17	6807	1960
18	6148	3275
19	8116	3111
20	7999	1820
21	4262	1327
22	5909	1943
23	6600	2256
24	7629	3248
25	4851	1654
26	5901	1903
27	10298	1868
28	10080	2847
29	8457	2693
30	6620	3062
31	8355	3977
32	6627	2636
33	6462	2490
34	6671	3455
35	5349	2174
36	4012	1745
37	8521	1895
38	6250	2422
39	4980	2292
40	6154	3284
41	9507	2406
42	7120	3782
43	8710	1733
44	3523	1449
45	5902	3300
46	8664	2074
47	7748	2939
48	8264	3389
49	7141	1786
50	6661	2946

Anexo 9 - 3: Relación porcentual volumen inestable sobre el total del Modelo DFN 4.

Iteración	V. Inestable / V. Total [%]
1	56%
2	36%
3	51%
4	32%
5	29%
6	40%
7	39%
8	46%
9	42%
10	27%
11	29%
12	61%
13	42%
14	29%
15	29%
16	42%
17	29%
18	53%
19	38%
20	23%
21	31%
22	33%
23	34%
24	43%
25	34%
26	32%
27	28%
28	28%
29	32%
30	46%
31	48%
32	40%
33	39%
34	52%
35	41%
36	43%
37	22%
38	39%
39	46%
40	53%
41	25%
42	53%
43	20%
44	41%
45	56%
46	24%
47	38%
48	41%
49	25%
50	44%

Anexo 9 - 4: Bloques totales e inestables por iteración del Modelo DFN 4.

Iteración	Bloques Totales	Bloques Inestables
1	2112	1092
2	2524	856
3	1849	950
4	3204	860
5	3479	1115
6	2777	1007
7	3396	1414
8	2146	962
9	3840	1398
10	3588	1123
11	4175	1400
12	2936	1247
13	2487	942
14	2901	982
15	2937	952
16	4118	2277
17	2645	1175
18	2495	1582
19	3916	1379
20	4108	974
21	2699	1045
22	2831	762
23	3284	1536
24	3055	1341
25	2511	867
26	1948	833
27	3158	1003
28	3264	961
29	4517	1445
30	2379	935
31	2857	1523
32	2543	1209
33	3796	1181
34	2978	1282
35	2637	841
36	2175	928
37	3760	1055
38	2624	1328
39	2854	1023
40	4011	1868
41	3636	1120
42	3532	1713
43	2694	896
44	1633	625
45	3215	1275
46	3110	965
47	2668	1251
48	5365	1861
49	2897	1125
50	3249	773

Anexo 9 - 5: Relación porcentual bloques inestables respecto al total por iteración del Modelo DFN 4.

Iteración	B. Inestable / B. Total [%]
1	52%
2	34%
3	51%
4	27%
5	32%
6	36%
7	42%
8	45%
9	36%
10	31%
11	34%
12	42%
13	38%
14	34%
15	32%
16	55%
17	44%
18	63%
19	35%
20	24%
21	39%
22	27%
23	47%
24	44%
25	35%
26	43%
27	32%
28	29%
29	32%
30	39%
31	53%
32	48%
33	31%
34	43%
35	32%
36	43%
37	28%
38	51%
39	36%
40	47%
41	31%
42	48%
43	33%
44	38%
45	40%
46	31%
47	47%
48	35%
49	39%
50	24%

Iteración	lume total [m ³]	Volumen Inestable [m ³]
1	801	322
2	995	394
3	541	412
4	508	226
5	630	376
6	645	426
7	462	360
8	643	473
9	888	313
10	225	51
11	667	446
12	1494	550
13	611	333
14	460	170
15	766	390
16	344	251
17	1169	425
18	493	237
19	661	494
20	1220	586
21	432	274
22	778	310
23	365	192
24	792	283
25	836	238
26	1022	380
27	559	263
28	840	375
29	891	598
30	1243	701
31	713	337
32	923	414
33	442	60
34	804	481
35	839	293
36	627	193
37	379	137
38	497	136
39	977	335
40	842	428
41	880	511
42	1071	853
43	416	293
44	571	136
45	651	575
46	782	389
47	584	207
48	810	402
49	568	263
50	781	494
51	36137	17790

Anexo 9 - 6: Distancia Backbreak por iteración del Modelo DFN 6.

Iteración	Distancia Backbreak [m]
1	2.6
2	4.8
3	6.1
4	3.7
5	4.8
6	5.1
7	4.3
8	3.4
9	3.3
10	3.7
11	3.7
12	3.9
13	5.3
14	4.8
15	2.5
16	4.2
17	3.5
18	3.3
19	3.7
20	4.5
21	4.3
22	6.4
23	4.2
24	5.0
25	4.4
26	3.3
27	3.8
28	3.1
29	3.3
30	4.0
31	3.3
32	3.1
33	4.6
34	5.4
35	3.2
36	4.0
37	3.3
38	3.2
39	4.1
40	2.8
41	4.6
42	3.3
43	2.9
44	2.0
45	3.1
46	3.9
47	3.4
48	3.5
49	4.6
50	3.5

Anexo 9 - 7: Volumen total e inestable por iteración del Modelo DFN 6.

Iteración	Volumen total [m³]	Volumen Inestable [m³]
1	801	322
2	995	394
3	541	412
4	508	226
5	630	376
6	645	426
7	462	360
8	643	473
9	888	313
10	225	51
11	667	446
12	1494	550
13	611	333
14	460	170
15	766	390
16	344	251
17	1169	425
18	493	237
19	661	494
20	1220	586
21	432	274
22	778	310
23	365	192
24	792	283
25	836	238
26	1022	380
27	559	263
28	840	375
29	891	598
30	1243	701
31	713	337
32	923	414
33	442	60
34	804	481
35	839	293
36	627	193
37	379	137
38	497	136
39	977	335
40	842	428
41	880	511
42	1071	853
43	416	293
44	571	136
45	651	575
46	782	389
47	584	207
48	810	402
49	568	263
50	781	494
51	36137	17790

Anexo 9 - 8: Relación volumen inestable sobre el total por iteración del Modelo DFN 6.

Iteración	V. Inestable / V. Total [%]
1	40%
2	40%
3	76%
4	45%
5	60%
6	66%
7	78%
8	74%
9	35%
10	23%
11	67%
12	37%
13	54%
14	37%
15	51%
16	73%
17	36%
18	48%
19	75%
20	48%
21	64%
22	40%
23	53%
24	36%
25	29%
26	37%
27	47%
28	45%
29	67%
30	56%
31	47%
32	45%
33	14%
34	60%
35	35%
36	31%
37	36%
38	27%
39	34%
40	51%
41	58%
42	80%
43	70%
44	24%
45	88%
46	50%
47	35%
48	50%
49	46%
50	63%

Anexo 9 - 9: Bloques totales e inestables por iteración del Modelo DFN 6.

Iteración	Bloques Totales	Bloques Inestables
1	140	43
2	138	67
3	111	71
4	204	105
5	155	86
6	105	71
7	69	43
8	182	106
9	178	83
10	130	43
11	128	79
12	159	102
13	143	81
14	150	62
15	120	52
16	126	86
17	298	184
18	142	94
19	109	77
20	186	128
21	94	53
22	164	79
23	105	54
24	129	78
25	120	67
26	131	65
27	152	97
28	191	96
29	141	91
30	199	113
31	176	81
32	157	98
33	129	59
34	249	118
35	118	74
36	67	38
37	153	49
38	105	59
39	176	79
40	160	108
41	111	71
42	150	95
43	125	53
44	105	52
45	135	99
46	161	94
47	146	88
48	158	94
49	126	75
50	250	125

Anexo 9 - 10: Relación de bloques inestables sobre el total por iteración del Modelo DFN 6.

Iteración	B. Inestable / B. Total [%]
1	31%
2	49%
3	64%
4	51%
5	55%
6	68%
7	62%
8	58%
9	47%
10	33%
11	62%
12	64%
13	57%
14	41%
15	43%
16	68%
17	62%
18	66%
19	71%
20	69%
21	56%
22	48%
23	51%
24	60%
25	56%
26	50%
27	64%
28	50%
29	65%
30	57%
31	46%
32	62%
33	46%
34	47%
35	63%
36	57%
37	32%
38	56%
39	45%
40	68%
41	64%
42	63%
43	42%
44	50%
45	73%
46	58%
47	60%
48	59%
49	60%
50	50%