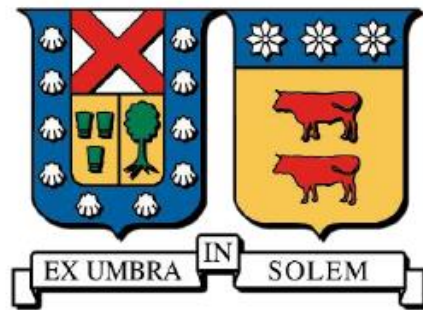


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO DE CHILE



EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE HERRAMIENTAS NUMÉRICAS PARA MODELAR EL COMPORTAMIENTO POST- PEAK DE UNA ROCA INTACTA

SERGIO ANDRES FRANJOLA ZUÑIGA

Memoria para optar al Título Profesional de
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía:

Dra. Kimie Suzuki

Profesor Co-Guía:

Dra. Adeline Delonca

SEPTIEMBRE 2023

Resumen

Uno de los principales usos de las herramientas numéricas es la modelación de fenómenos ingenieriles como el comportamiento de la roca intacta bajo esfuerzos mecánicos. Aquí es donde aparece el software de elementos discretos PFC3D3D, el cual permite simular la roca intacta mediante esferas rígidas unidas entre sí mediante modelos de contactos, cuyo comportamiento está definido por micro parámetros que controlan estos modelos.

El diseño minero se ha basado principalmente en métodos empíricos para la planificación del complejo minero, debido a que el estudio del comportamiento post peak de la roca no está bien estudiado en los distintos modelos de contacto, además de que la obtención de datos para la zona plástica de la roca no tiene un procedimiento estándar definido, y los modelos matemáticos necesitan datos de entrada para poder lograr los ajustes necesarios.

En base a lo anterior, el objetivo de este trabajo es estudiar la efectividad de dos modelos matemáticos (Soft Bonded Model y Flat Contact Model) para poder replicar el comportamiento post peak de la roca. Para esto, se busca una serie de datos experimentales de ensayos de Andesita, para así poder calibrar en su zona pre peak ambos modelos comparando los datos de las simulaciones con los datos experimentales. Luego de calibrar cada modelo, se realizan análisis de sensibilidad a los parámetros que definen a cada modelo para así poder determinar las variables más influyentes de estos, y luego se realizan simulaciones combinando estas variables y así poder comparar los resultados de las simulaciones con los datos de referencia y evaluar dicha efectividad.

Los resultados pre peak obtenidos para cada modelo se ajustan a los datos de referencia obteniendo errores menores al 5% para las propiedades mecánicas y elásticas de la roca, con excepción de la razón de Poisson para el SBM debido a limitantes del modelo. Los resultados post peak indican que ambos modelos son capaces de representar el comportamiento frágil de la roca en la zona plástica, aunque obteniendo un error del 102% para el SBM y 27% para el FCM, esto debido a que esta propiedad no fue calibrada. En el caso de los ensayos triaxiales, se tiene que ambos modelos logran representar de buena manera el comportamiento post peak a bajas presiones de confinamiento (≤ 5 [MPa]), pero conforme se sube la presión de confinamiento, ambos modelos no logran representar de correcta manera la transición frágil-dúctil, subestimando el módulo residual a confinamientos mayores a 30 [MPa].

Finalmente, este estudio busca contribuir al entendimiento del proceso post peak en los modelos numéricos, para así poder dejar de lado los métodos empíricos en minería y poder implementar el post peak a los distintos diseños mineros.

Dedicado a la base de mi ser
Mis padres y hermana
Gracias por estar siempre conmigo

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, ya que, sin su incondicional apoyo, yo no podría hacer nada de lo que hago, a mi papa Sergio que es mi ejemplo por seguir, a mi mama Yasna, que la amo y a mi hermanita Brisa que es mi soporte.

Como no también agradecer a mis amigos los mineros, donde con el Seba y el Jürgen hicimos el mismo grupo por casi toda la carrera. A mis amigos los eléctricos, que con solo preguntar quien acompañaba ya salían todos, simplemente los veganos.

También quiero agradecer a ITASCA por el convenio con la Universidad de Chile, ya que sin su software no era posible hacer este trabajo, también quiero agradecer al Advanced Mining Technology Center (AMTC) por prestarme sus instalaciones para poder trabajar, además de otorgarme un PC para poder trabajar en 2 dispositivos. Finalmente quiero agradecer a mis profesoras guías, Kimie y Adeline, por tenerme una gran paciencia y tener siempre una respuesta a la mano, además de aportar ideas para poder proseguir con este trabajo

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	OBJETIVOS.....	2
1.1.1.	<i>Objetivo General.....</i>	2
1.1.2.	<i>Objetivos Específicos</i>	2
1.2.	ALCANCES	2
2.	MARCO TEÓRICO.....	3
2.1.	ROCA INTACTA Y MACIZO ROCOSO	3
2.2.	ENSAYOS DE ROCA INTACTA.....	4
2.2.1.	<i>Ensayo de Tracción Directa.....</i>	4
2.2.2.	<i>Ensayo de Compresión Uniaxial.....</i>	5
2.2.3.	<i>Ensayo Triaxial Convencional</i>	6
2.2.4.	<i>Curvas Esfuerzo-Deformación.....</i>	7
2.2.5.	<i>Propiedades Mecánicas de la roca.....</i>	8
2.2.6.	<i>Propiedades Elásticas de la roca.....</i>	10
2.3.	MODELAMIENTO NUMÉRICO CON DEM	14
2.4.	PARTICLE FLOW CODE 3D (PFC3D).....	15
2.4.1.	<i>Soft Bonded Particle Model (SBM)</i>	17
2.4.2.	<i>Flat Contact Model (FCM)</i>	24
2.4.3.	<i>Ensayos Mecánicos en PFC3D</i>	28
2.5.	TRABAJOS REALIZADOS EN PFC3D.....	30
3.	METODOLOGÍA	32
3.1.	<i>Datos Experimentales.....</i>	32
3.2.	<i>Construcción Modelos.....</i>	35
3.2.1.	<i>Tasa de Deformación (ϵ_p)</i>	35
3.2.2.	<i>Resolución.....</i>	36
3.2.3.	<i>Razón Diámetro Máx y Mín de Partículas (R_{min}/R_{max}).....</i>	37
3.2.4.	<i>Multiplicador de Radios (λ)</i>	38
3.3.	<i>Obtención Macro Parámetros</i>	38
3.4.	<i>Estudio comportamiento Post Peak</i>	40
3.5.	<i>Calibración Modelos</i>	40
3.5.1.	<i>SBM.....</i>	41
3.5.2.	<i>FCM.....</i>	42
3.6.	<i>Análisis de Sensibilidad y Combinaciones.....</i>	43
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	45
4.1.	CALIBRACIÓN MACRO PARÁMETROS	46
4.1.1.	<i>Construcción Modelo</i>	46
4.1.2.	<i>Calibración SBM.....</i>	48

4.1.3.	<i>Calibración FCM</i>	53
4.2.	ENSAYOS TRIAXIALES CONVENCIONALES	62
4.2.1.	<i>Curvas Esfuerzo Deformación</i>	62
4.2.2.	<i>Módulo Residual</i>	64
4.3.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	65
4.3.1.	<i>SBM</i>	67
4.3.2.	<i>FCM</i>	72
4.4.	COMBINACIONES	77
4.4.1.	<i>Combinaciones SBM</i>	78
4.4.2.	<i>Combinaciones FCM</i>	90
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
6.	REFERENCIAS	106
7.	ANEXOS	110

Lista de Figuras

Figura 2.1: Diagrama de transición desde una condición de roca intacta a la de macizo rocoso muy fracturado (Hoek & Brown, 1997).	3
Figura 2.2: Muestra falla después de un ensayo de tracción (obtenido de internet).	5
Figura 2.3: Ensayo de Compresión Simple (Obtenido de internet).	6
Figura 2.4: Ensayo Triaxial (Obtenido de internet).	7
Figura 2.5: Curva esfuerzo deformación (curvas hipotéticas) (a) Deformación axial y radial en función de la carga axial. (b) Deformación volumétrica (dilatancia) en función de la deformación axial (Goodman, (1989)).	8
Figura 2.6: Comportamientos post-peak Clase I y Clase II (Wawersik y Fairhurst (1970)).	13
Figura 2.7: Ciclo de cálculo utilizado por el método de elementos discretos (Luengo, 2014).	15
Figura 2.8: Probeta sintética de roca en PFC3D3D con paredes para la aplicación de carga en ensayo triaxial convencional (Potyondy, 2010b).	16
Figura 2.9: Representación Parallel Bond (Potyondy & Cundall, 2004).	18
Figura 2.10: Comparación parámetros elásticos (Módulo de Young y Razón de Poisson) obtenidos con EBPM versus datos experimentales (Arteaga, 2015).	19
Figura 2.11: Representación de curva esfuerzo-deformación obtenida por ensayo triaxial con confinamiento de 5 [MPa] por EBPM (en amarillo) vs curva experimental (en verde) (Arteaga, 2015).	20
Figura 2.12: Esquema del Modelo Contact Bond (Potyondy & Cundall, 2004).	21
Figura 2.13: Tipos de falla Contact Bond Model (Cho et al., 2007).	21
Figura 2.14: Esquema del Modelo Parallel Bond (D. Potyondy & Cundall, 2004).	22
Figura 2.15: (a) Esquema de Flat Joint Contact. (b) Representación de Flat Joint Material. (Potyondy, 2013b).	25
Figura 2.16: Tipos de Estados de Flat Joint Contacts (Potyondy, 2014).	26
Figura 2.17: Cinemática Flat Joint Model (Potyondy, 2012).	27
Figura 2.18: Cinética Flat Joint Model (Potyondy, 2012).	27
Figura 2.19: Comparativa curvas obtenidas con modelos FCM y EBPM (Salinas, 2016).	28
Figura 2.20: (a) geometría de una probeta cilíndrica de diámetro 50 [mm] y alto de 100 [mm]. (b) Geometría de una probeta prismática de dimensiones 19x19x38 [mm] (Arteaga, 2015).	29
Figura 2.21: (a) Diferentes formas de aplicación de esfuerzos. (b) Curvas Esfuerzo-Deformación obtenidas con ambos métodos. (Mas Ivars, 2010).	29
Figura 3.1: Curvas de ensayos triaxiales en roca andesita obtenidos (Brzovic, 2020).	33
Figura 3.2: Envolvente de Falla para Andesita (Obtenido mediante RocLab).	34

Figura 3.3: Curvas esfuerzo deformación para distintos valores de tasa de deformación (Arteaga, 2015).....	36
Figura 3.4: (a) Resolución de 7 partículas. Diámetro probeta 50 [mm], altura 100 [mm]; (b) Resolución de 9 partículas. Diámetro probeta 50 [mm], altura 100 [mm] (Luengo 2014).....	36
Figura 3.5: Curvas esfuerzo deformación para distintos valores de resolución (Arteaga, 2015).	37
Figura 3.6: (a) Paredes ficticias que miden esfuerzo y deformación. (b) Esferas de medición usadas en PFC3D3D (Arteaga, 2015).	38
Figura 3.7: Ejemplo de criterio de término en un ensayo (Arteaga, 2015).	39
Figura 3.8: Gráfica explicativa de obtención del valor del Módulo Residual.....	40
Figura 3.9: Diagrama de calibración de micro parámetros SBM en PFC3D.	41
Figura 3.10: Diagrama de calibración de micro parámetros FCM en PFC3D.	42
Figura 3.11: Tipos de gráficas que se pueden obtener del gráfico de interacción (Navarro & Soler, 2022).	44
Figura 4.1: Gráfico de resultados de la calibración de la resistencia a la tracción para el modelo SBM.	49
Figura 4.2: Gráfico de resultados de la calibración del módulo de Young para el modelo SBM.	50
Figura 4.3: Gráfico de resultados de la calibración de la resistencia a la compresión simple para el modelo SBM.....	52
Figura 4.4: Calibración de la envolvente de falla del modelo SBM variando micro parámetro sb_fa	53
Figura 4.5: Resultados calibración Razón de Poisson para el modelo FCM.....	54
Figura 4.6: Gráfico de resultados de la calibración de la resistencia a la tracción para el modelo FCM.	55
Figura 4.7: Gráfico de resultados de la calibración del módulo de Young para el modelo FCM.....	56
Figura 4.8: Gráfico de resultados de la calibración del UCS para el modelo FCM.....	58
Figura 4.9: Calibración de la envolvente de falla del modelo FCM variando micro parámetro fj_fa	59
Figura 4.10: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para los modelos SBM (Azul) y FCM (Naranja).....	61
Figura 4.11: Curvas de ensayos triaxiales a distinto confinamiento usando modelo SBM.	62
Figura 4.12: Curvas de ensayos triaxiales a distinto confinamiento usando modelo FCM.	63
Figura 4.13: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro $soft$ SBM.	67
Figura 4.14: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro cut SBM.	68

Figura 4.15: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro kratio SBM.	70
Figura 4.16: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro sb_mcf SBM.....	71
Figura 4.17: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro kratio FCM.	73
Figura 4.18: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro fricb FCM.	74
Figura 4.19: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro fj_fric FCM.....	75
Figura 4.20: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro emod FCM.	76
Figura 4.21: Matriz de combinaciones para SBM.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4.22: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre soft y cut SBM.	79
Figura 4.23: Resultados de la interacción entre soft y cut SBM.	80
Figura 4.24: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre soft y kratio SBM.	81
Figura 4.25: Resultados de la interacción entre soft y kratio SBM.	82
Figura 4.26: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre soft y sb_mcf SBM.	83
Figura 4.27: Resultados de la interacción entre soft y sb_mcf SBM.	84
Figura 4.28: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre cut y kratio SBM.	85
Figura 4.29: Resultados de la interacción entre cut y kratio SBM.	85
Figura 4.30: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre cut y sb_mcf SBM.	87
Figura 4.31: Resultados de la interacción entre cut y sb_mcf SBM.	87
Figura 4.32: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre kratio y sb_mcf SBM.....	89
Figura 4.33: Resultados de la interacción entre kratio y sb_mcf SBM.	89
Figura 4.34: Matriz de combinaciones para FCM.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4.35: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre kratio y fricb - FCM.	91
Figura 4.36: Resultados de la interacción entre kratio y fricb FCM	92
Figura 4.37: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre kratio y fj_fric - FCM.	93
Figura 4.38: Resultados de la interacción entre kratio y fj_fric FCM.	94
Figura 4.39: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre kratio y emod - FCM.	95
Figura 4.40: Resultados de la interacción entre kratio y emod FCM.	96

Figura 4.41: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre fricb y fj_fric - FCM.	97
Figura 4.42: Resultados de la interacción entre fricb y fj_fric FCM.	98
Figura 4.43: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre fricb y emod - FCM.	99
Figura 4.44: Resultados de la interacción entre fricb y emod FCM.	100
Figura 4.45: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre fj_fric y emod - FCM.	101
Figura 4.46: Resultados de la interacción entre fj_fric y emod FCM.	102
Figura 7.1: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro sb_coh del modelo SBM.	110
Figura 7.2: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro sb_fric del modelo SBM.	111
Figura 7.3: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro emod del modelo SBM.	111
Figura 7.4: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro sb_ten del modelo SBM.	112
Figura 7.5: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro fj_coh del modelo FCM.	113
Figura 7.6: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro fj_ten del modelo FCM.	113
Figura 7.7: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro fj_fa del modelo FCM.	114
Figura 7.8: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro emodb del modelo FCM.	115
Figura 7.9: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro kratio del modelo FCM.	115
Figura 7.10: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro fricb del modelo FCM.	116
Figura 7.11: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro fj_fric del modelo FCM.	117
Figura 7.12: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro emod del modelo FCM.	117

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Micro parámetros Contact Bond - SBM.....	22
Tabla 2.2: Micro Parámetros Parallel Bond - SBM.....	23
Tabla 2.3: Micro Parámetros CB - FCM	27
Tabla 2.4: Micro Parámetros PB - FCM.	28
Tabla 3.1: Datos utilizados para crear la envolvente de falla de la roca Andesita (Brzovic, 2020).	33
Tabla 3.2: Parámetros de la envolvente de falla Hoek & Brown (H-C) y Mohr Coulomb (M-C) obtenidas del software Roclab.	34
Tabla 3.3: Parámetros Mecánicos y Elásticos de la roca obtenidos a partir de la data de Brzovic, 2020.....	35
Tabla 3.4: Micro parámetros seleccionados para el análisis de sensibilidad enfocado en el post peak y para las combinaciones para ver la interacción de estos parámetros.	43
Tabla 4.1: Micro parámetros del caso base del modelo SBM.	45
Tabla 4.2: Micro parámetros del caso base del modelo FCM.	46
Tabla 4.3: Geometría de los ensayos experimentales y simulados.....	47
Tabla 4.4: Valores iniciales de empaquetamiento para modelos SBM y FCM.	47
Tabla 4.5: Resultados de la razón de Poisson para el modelo SBM junto a su error asociado.....	48
Tabla 4.6: Resultados de la calibración de la resistencia a la tracción para el modelo SBM.	49
Tabla 4.7: Resultados finales de la resistencia a la tracción del modelo SBM.	49
Tabla 4.8: Resultados de la calibración del módulo de Young para el modelo SBM.	50
Tabla 4.9: Resultados del módulo de Young para el modelo SBM junto a su error asociado.....	51
Tabla 4.10: Resultados de calibración de la resistencia a la compresión simple del modelo SBM.....	51
Tabla 4.11: Resultados del UCS para el modelo SBM junto a su error asociado..	52
Tabla 4.12: Resultados del módulo de Young para el modelo SBM junto a su error asociado.....	53
Tabla 4.13: Resultados de la calibración de la razón de Poisson para el modelo FCM.	54
Tabla 4.14: Resultados de la razón de Poisson para el modelo FCM junto a su error asociado.....	54
Tabla 4.15: Resultados de calibración por modelo para la resistencia a la tracción de ambos modelos.....	55

Tabla 4.16: Resultados de la razón de Poisson para el modelo FCM junto a su error asociado.....	55
Tabla 4.17: Resultados calibración del módulo de Young para el modelo SBM. ..	56
Tabla 4.18: Resultados finales del módulo de Young para el modelo SBM y su error asociado.....	57
Tabla 4.19: Resultados de calibración por modelo para el UCS del modelo FCM.	57
Tabla 4.20: Resultados finales del UCS para el modelo FCM y su error asociado.....	58
Tabla 4.21: Resultados del módulo de Young para el modelo SBM junto a su error asociado.....	59
Tabla 4.22: Resultados finales de las simulaciones de ambos modelos y la comparación con los datos experimentales.	60
Tabla 4.23: Micro parámetro calibrados para el modelo SBM.....	60
Tabla 4.24: Micro parámetro calibrados para el modelo FCM.....	61
Tabla 4.25: Tabla comparativa de los distintos confinamientos para ambos modelos y la comparación del esfuerzo principal mayor obtenido para cada modelo con el valor experimental.	63
Tabla 4.26: Tabla comparativa de los distintos confinamientos para ambos modelos y la comparación del Módulo de Young obtenido para cada modelo con el valor experimental.....	64
Tabla 4.27: Resultados de Módulo Residual de los ensayos de tracción a distinto confinamiento para los datos experimentales y de cada modelo.	64
Tabla 4.28: Micro parámetros seleccionados para el análisis de sensibilidad y sus variaciones - SBM.	66
Tabla 4.29: Micro parámetros seleccionados para el análisis de sensibilidad y sus variaciones - FCM.	66
Tabla 4.30: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad del soft.	67
Tabla 4.31: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad del cut.	69
Tabla 4.32: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad del kratio.	70
Tabla 4.33: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad del sb_mcf.	71
Tabla 4.34: Máximas variaciones porcentuales de las propiedades de la roca para cada micro parámetro variado del modelo SBM.....	72
Tabla 4.35: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad del kratio - FCM.	73
Tabla 4.36: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad de fricb - FCM.....	74

Tabla 4.37: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad de fj_fric - FCM.	75
Tabla 4.38: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad de emod - FCM.....	77
Tabla 4.39: Máximas variaciones porcentuales de las propiedades de la roca para cada micro parámetro variado del modelo FCM.....	77
Tabla 4.40: Parámetros seleccionado y sus respectivos valores para las combinaciones SBM.....	79
Tabla 4.41: Resultados de la interacción entre soft y cut SBM.	79
Tabla 4.42: Combinaciones formadas por soft y cut con sus respectivas pendientes.	80
Tabla 4.43: Resultados de la interacción entre soft y kratio SBM.	81
Tabla 4.44: Combinaciones formadas por soft y kratio con sus respectivas pendientes.....	82
Tabla 4.45: Resultados de la interacción entre soft y sb_mcf SBM.....	83
Tabla 4.46: Combinaciones formadas por soft y sb_mcf con sus respectivas pendientes.....	84
Tabla 4.47: Resultados de la interacción entre cut y kratio SBM.	85
Tabla 4.48: Combinaciones formadas por cut y kratio con sus respectivas pendientes.....	86
Tabla 4.49: Resultados de la interacción entre cut y sb_mcf SBM.....	87
Tabla 4.50: Combinaciones formadas por cut y sb_mcf con sus respectivas pendientes.....	88
Tabla 4.51: Resultados de la interacción entre kratio y sb_mcf SBM.....	89
Tabla 4.52: Combinaciones formadas por kratio y sb_mcf con sus respectivas pendientes.....	90
Tabla 4.53: Parámetros seleccionado y sus respectivos valores para las combinaciones FCM.....	91
Tabla 4.54: Resultados de la interacción entre kratio y fricb FCM.	91
Tabla 4.55: Combinaciones formadas por kratio y fricb con sus respectivas pendientes.....	92
Tabla 4.56: Resultados de la interacción entre kratio y fj_fric FCM.....	93
Tabla 4.57: Combinaciones formadas por kratio y fj_fric con sus respectivas pendientes.....	94
Tabla 4.58: Resultados de la interacción entre kratio y emod FCM.	95
Tabla 4.59: Combinaciones formadas por kratio y emod con sus respectivas pendientes.....	96
Tabla 4.60: Resultados de la interacción entre fricb y fj_fric FCM.....	97
Tabla 4.61: Combinaciones formadas por fricb y fj_fric con sus respectivas pendientes.....	98
Tabla 4.62: Resultados de la interacción entre fricb y emod FCM.	99

Tabla 4.63: Combinaciones formadas por fricb y emod con sus respectivas pendientes.....	100
Tabla 4.64: Resultados de la interacción entre fj_fric y emod FCM.	101
Tabla 4.65: Combinaciones formadas por fricb y emod con sus respectivas pendientes.....	102
Tabla 7.1: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro sb_coh del modelo SBM.	110
Tabla 7.2: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro sb_fric del modelo SBM.	111
Tabla 7.3: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro emod del modelo SBM.....	112
Tabla 7.4: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro sb_ten del modelo SBM.	112
Tabla 7.5: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro fj_coh del modelo FCM.	113
Tabla 7.6: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro fj_ten del modelo FCM.	114
Tabla 7.7: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro fj_fa del modelo FCM.....	114
Tabla 7.8: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro emodb del modelo FCM.....	115
Tabla 7.9: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro kratio del modelo FCM.	116
Tabla 7.10: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro fricb del modelo FCM.	116
Tabla 7.11: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro fj_fric del modelo FCM.	117
Tabla 7.12: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro emod del modelo FCM.....	118

1. Introducción

Para introducirnos en los ensayos de roca, primero se debe saber qué es lo que se pone a prueba. En este caso es de interés ensayar una roca intacta, la cual corresponde a un material rocoso sano y sin discontinuidades, que se caracteriza mecánicamente por su resistencia y cohesión. Estos valores deben caracterizarse, y es ahí donde toman relevancia los ensayos de laboratorio. Algunos ensayos mecánicos son el ensayo de compresión simple, el cual se usa para medir la resistencia a la compresión simple o UCS; y los ensayos triaxiales, los cuales entregan una cohesión y ángulo de fricción interna. Estos ensayos de compresión, además, permiten medir el módulo residual de la muestra en caso de utilizar un equipo que permita hacer ensayos con obtención de curva completa, mejor conocida como máquina de ensayo servoasistida.

Luego de conocer las propiedades mecánicas de las rocas que se obtienen de laboratorio, estos valores se usan para hacer los diseños mineros correspondientes. Estas propiedades son parámetros de entrada son críticos tanto para estudiar la estabilidad de las excavaciones como para definir su rentabilidad. Pero, ocurre un problema relacionado en cómo se usan estos datos, ya que uno de los principales métodos de diseño en minería son los métodos empíricos que conllevan una incertidumbre considerable. La generación de nuevos métodos matemáticos de diseño y la evolución de estos es primordial para la industria, como por ejemplo la técnica del SRM (Synthetic Rock Mass), el cual puede simular el comportamiento de un macizo rocoso incorporando datos de las rocas intactas y las fracturas presentes en este.

Los fenómenos mecánicos que ocurren en los ensayos mecánicos se entienden de mejor manera que los fenómenos en otras aplicaciones ingenieriles debido a que se tienen condiciones controladas. Desde el último par de décadas, se están estudiando también mediante simulaciones numéricas. Sin embargo, a pesar de ser una idea prometedora, aún hay dificultades para simular este comportamiento de la roca en términos del post-peak. Una de las principales dificultades es debido a las limitaciones que presentan los modelos existentes en términos de la representatividad del comportamiento de la roca, sumado a la variabilidad de los resultados que se obtienen a partir de un mismo tipo de roca, que a pesar de ser el mismo, sus resultados pueden variar considerablemente debido a la heterogeneidad interna de la roca, también debido a la forma y disposición de los granos internos de la muestra, como también la distribución de las vetillas internas que puede tener esta.

Para realizar estas simulaciones una de las opciones es la técnica numérica de elementos discretos (DEM), la cual se ve representada en el software PFC3D3D (Potyondy & Cundall 2004). Esta resuelve la 2da ley de Newton para cada elemento del sistema. Este código permite poder representar una roca como un grupo de partículas esféricas, las cuales se unen a través de contactos. Existen distintos modelos de contacto actualmente en PFC3D3D, pero para este estudio se enfocará

en 2 modelos: Soft Bonded Modelo y Flat Contact Model, donde el primero es una variación del modelo EBPM (Itasca, 2023); y el segundo es un modelo relativamente nuevo que, en los distintos estudios sobre él, se han encontrado prometedores resultados (Salinas, 2016).

Finalmente, como bien fue mencionado, durante años se ha trabajado con los métodos empíricos los cuales han funcionado de gran manera durante todo este tiempo, pero los nuevos desafíos que plantea la industria en cuanto a seguridad y productividad hacen necesaria actualizar estos métodos por modelos numéricos, los cuales son más precisos en comparación a los métodos empíricos, con lo cual el desarrollo de la investigación sobre este tema es de gran importancia para el futuro de la industria.

1.1. Objetivos

A continuación, se presenta el objetivo general del estudio junto a 3 objetivos específicos de este.

1.1.1. Objetivo General

- Estudiar la efectividad de herramientas numéricas para modelar el comportamiento post-peak de una roca intacta.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Simular el comportamiento mecánico pre peak de una muestra de roca intacta mediante la implementación del método DEM.
- Estudiar la influencia de los micro parámetros de cada modelo en el comportamiento post peak de la roca.
- Comparar el comportamiento post peak de dos modelos de contacto calibrados con una misma roca,

1.2. Alcances

Para el desarrollo de este trabajo se utiliza el código PFC3D3D. Los modelos con los cuales se trabaja se calibran con resultados de ensayos de laboratorio (Ensayos de Tracción, Uniaxial y Triaxial Convencional) disponibles en la literatura para la roca Andesita. De esta forma se comparan cualitativa y cuantitativamente dos modelos de elementos discretos (Soft Bonded Particle Model y Flat Contact Model). Por otro lado, se espera llegar a ciertas conclusiones con respecto a los modelos y su comportamiento en el post peak, esperando encontrar buenos resultados, además de realizar la comparativa entre los dos modelos mencionados anteriormente, y realizar las conclusiones pertinentes.

2. Marco Teórico

El estudio del comportamiento de la roca es fundamental para la industria minera como bien fue mencionado en la introducción a este trabajo, principalmente debido a la implicancia que tiene esta en el diseño y planificación minera junto a la seguridad de estas. Con respecto al estudio del comportamiento post peak de las rocas, se tiene que su investigación lleva desde los años 50', teniendo una explosión en los años 70', pero dejando de lado su implementación en los diseños mineros (Pollak, 2022), con lo cual es de gran importancia el incrementar las investigaciones sobre este tema para los distintos modelos matemáticos que simulan el comportamiento de la roca intacta, para así lograr mejoras en aspectos económicos, de eficiencia y seguridad en los yacimientos.

Para efectos de este estudio se presenta a continuación una recopilación de los antecedentes necesarios para el desarrollo y comprensión de este.

2.1. Roca Intacta y Macizo Rocoso

La roca intacta se define como un material rocoso sin discontinuidades o bloques de roca intacta entre discontinuidades (muestra de mano o mayor), el cual es el componente básico del macizo rocoso. A pesar de considerarse continua es heterogénea y anisótropa, ligada a la fábrica, textura y estructura, mineral. Mecánicamente, la matriz rocosa se caracteriza por su densidad, resistencia y deformabilidad, dadas por parámetros de roca intacta: resistencia a la compresión simple y a la tracción, módulo de Young, razón de Poisson. (González de Vallejo, 2002). En la Figura 2.1 se observa de manera esquemática las diferencias de estado entre la roca intacta y el macizo rocoso (Hoek & Brown, 1997).

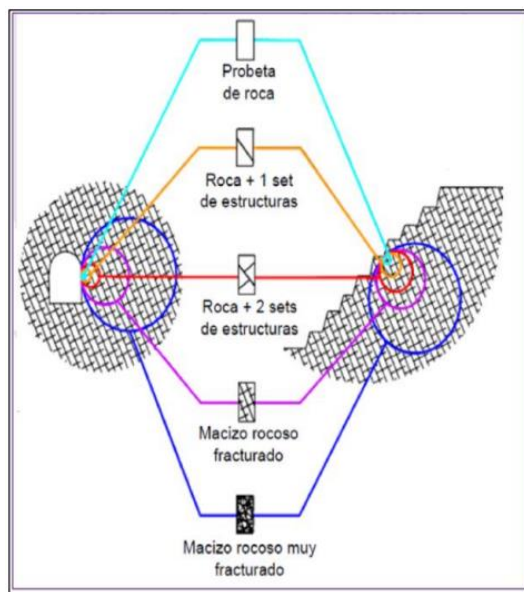


Figura 2.1: Diagrama de transición desde una condición de roca intacta a la de macizo rocoso muy fracturado (Hoek & Brown, 1997).

Por otro lado, el macizo rocoso se define como un volumen de roca anisótropo, no homogéneo, inelástico y que presenta en la mayoría de su estructura discontinuidades (DIANE) (Hudson and Harrison, 2000). Por otro lado, el macizo rocoso se puede definir mecánicamente escalando los parámetros que definen a la roca intacta (Hoek & Brown, 1997). Además, el macizo es el que soporta todas las cargas in situ que están presentes, y su comportamiento macro está definido principalmente por sus parámetros mecánicos, elásticos y por la presencia de discontinuidades en este.

2.2. Ensayos de Roca Intacta

La finalidad de los ensayos en roca intacta es identificar y clasificar la muestra ensayada, de tal manera que se obtienen una serie de resultados de la deformación y la carga que está sufriendo la muestra ensayada, la cual es visualizada en forma de curva (Curva Stress-Strain). A partir de los resultados anteriores se pueden extraer los parámetros mecánicos y elásticos de la roca, es decir parámetros de resistencia y rigideces que entregan una definición cuantitativa de la roca. (Ferrer, 2011). Por otro lado, se tiene que el uso de estos resultados se ve reflejado en el diseño minero, ya que se cuenta con la base cuantitativa necesaria para diseñar una mina segura para los trabajadores.

Finalmente, existe una variedad de ensayos de roca intacta que permite definir los parámetros mecánicos de la roca, tales como el ensayos de compresión, ensayo de carga puntual, ensayo de tracción brasileño, ensayo de tracción directa, ensayos triaxiales convencionales, ensayos triaxiales verdaderos, entre otros. A pesar de existir esta variedad de ensayos, para los efectos y el alcance de este trabajo se considerarán tres tipos de ensayo, ya que permiten definir los parámetros necesarios para la calibración, además de que son los que cuentan con mayor acceso a los datos experimentales:

- Ensayo de Tracción Directa: Ensayo el cual permite definir la Resistencia a la Tracción de la roca.
- Ensayo de Compresión Uniaxial: Ensayo el cual permite encontrar la Resistencia a la Compresión Uniaxial junto con los demás parámetros elásticos (Módulo de Young y Razón de Poisson).
- Ensayo Triaxial Convencional: Ensayo el cual permite obtener la envolvente de falla de la roca, al obtener la resistencia peak a distintos confinamientos.

2.2.1. Ensayo de Tracción Directa

En este tipo de ensayo, se aplica una carga de extensión de manera axial al testigo de roca, resultando lo que se ve en la Figura 2.2. Es muy difícil su realización principalmente por dos razones (Hudson & Harrison, 2000):

- Difícil de fijar los bordes de la muestra para aplicar la carga.
- Por la naturaleza frágil de muchos tipos de roca, se tienen bajas resistencias a la tracción.

Mediante este ensayo es posible obtener la resistencia a la tracción de la roca (σ_t), el cual sirve como dato de entrada para estimar la envolvente de falla. Con lo que respecta a las bases del ensayo, se tiene que (Vallejo y Ferrer, 2011):

- La relación largo/ancho de la probeta debe ser 2.5 a 3.
- El diámetro no menor a 54mm.
- Las bases del cilindro deben ser lisas y paralelas, y perpendiculares a la dimensión máxima.



Figura 2.2: Muestra falla después de un ensayo de tracción (obtenido de internet).

2.2.2. Ensayo de Compresión Uniaxial

Los ensayos de compresión uniaxial se llevan a cabo aplicando una carga a una muestra de roca cilíndrica a lo largo de su eje como se ve en la Figura 2.3, registrando de esta manera el desplazamiento producto del aumento de la carga axial (Hudson & Harrison, 2000). Este tipo de ensayo es el punto de partida para saber cómo se comporta la roca en un estado sin confinamiento ($\sigma_3=0$).

Mediante este ensayo es posible obtener ciertos parámetros elásticos tales como el Módulo de Young (E) y la Razón de Poisson (ν); y el parámetro mecánico de la resistencia a la compresión uniaxial (σ_{UCS}). Además, la relación de esfuerzos aplicados en el ensayo se establece como $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

Por otro lado, igualmente que, en el ensayo de tracción, este ensayo cuenta con su propia base estándar, la cual corresponde a (Hudson & Harrison, 2000):

- Razón Largo/Ancho de la probeta debe ser 2.5 a 3:1.
- Extremos deben ser paralelos y pulidos, sin grietas.
- Ancho de la muestra debe ser >10 veces el tamaño medio del grano



Figura 2.3: Ensayo de Compresión Simple (Obtenido de internet).

2.2.3. Ensayo Triaxial Convencional

En este tipo de ensayos se busca representar un estado triaxial de esfuerzos. Para esto se superponen una presión hidrostática con un esfuerzo uniaxial (Paterson & Wong, 2005). El estado de presión hidrostática (o presión de confinamiento) se puede expresar como la igualdad entre el esfuerzo principal intermedio y el esfuerzo principal mayor o menor. Para el caso en que el esfuerzo principal intermedio es igual al menor, corresponde a un ensayo triaxial convencional, el cual es que se realizara en las simulaciones, mientras que en el caso contrario (esfuerzo principal intermedio igual al mayor) representa un ensayo triaxial verdadero.

Este es un ensayo que permite determinar la envolvente de falla del material rocoso ensayado, a partir de esta se obtienen los valores de sus parámetros resistentes: cohesión (c) y ángulo de fricción (ϕ). Generalmente, el ensayo se realiza a distintas presiones, es decir distinto σ_3 , lo que permite generar la ya mencionada envolvente de falla.

Igualmente, que los otros dos ensayos, este cuenta con una base estándar para su realización, además, en la Figura 2.4 se ve el montaje de un ensayo triaxial.



Figura 2.4: Ensayo Triaxial (Obtenido de internet).

Mediante estudios experimentales, realizando ensayos triaxiales a distintas presiones de confinamiento, a diferentes tipos de roca, se ha concluido que la respuesta de las curvas esfuerzo-deformación tienden a un comportamiento dúctil a medida que aumenta el σ_3 (Paterson & Wong, 2005).

2.2.4. Curvas Esfuerzo-Deformación

Las curvas de esfuerzo-deformación son el resultado de los distintos ensayos de roca que hay, en donde como dice el nombre, se registra el esfuerzo que se le va aplicando a la probeta de roca junto a la deformación que va sufriendo esta. Como bien es sabido, la curva cuenta con una zona elástica, donde se registran los parámetros elásticos de la roca (E y ν), además de ser una zona en donde si se le quita el esfuerzo aplicado a la muestra, esta recupera su estado original precarga; la otra zona importante corresponde a la zona plástica, la cual se presenta cuando la muestra a sobrepasado su esfuerzo peak, y las deformaciones que sufre esta son permanentes, la cual denominamos zona post peak. En la siguiente Figura 2.5 se observa una curva típica de esfuerzo y deformación, en donde la zona pre peak corresponde a la parte de la curva que va desde el origen (O) hasta el esfuerzo máximo (D), mientras que la zona post peak va desde el esfuerzo máximo (D) en adelante.

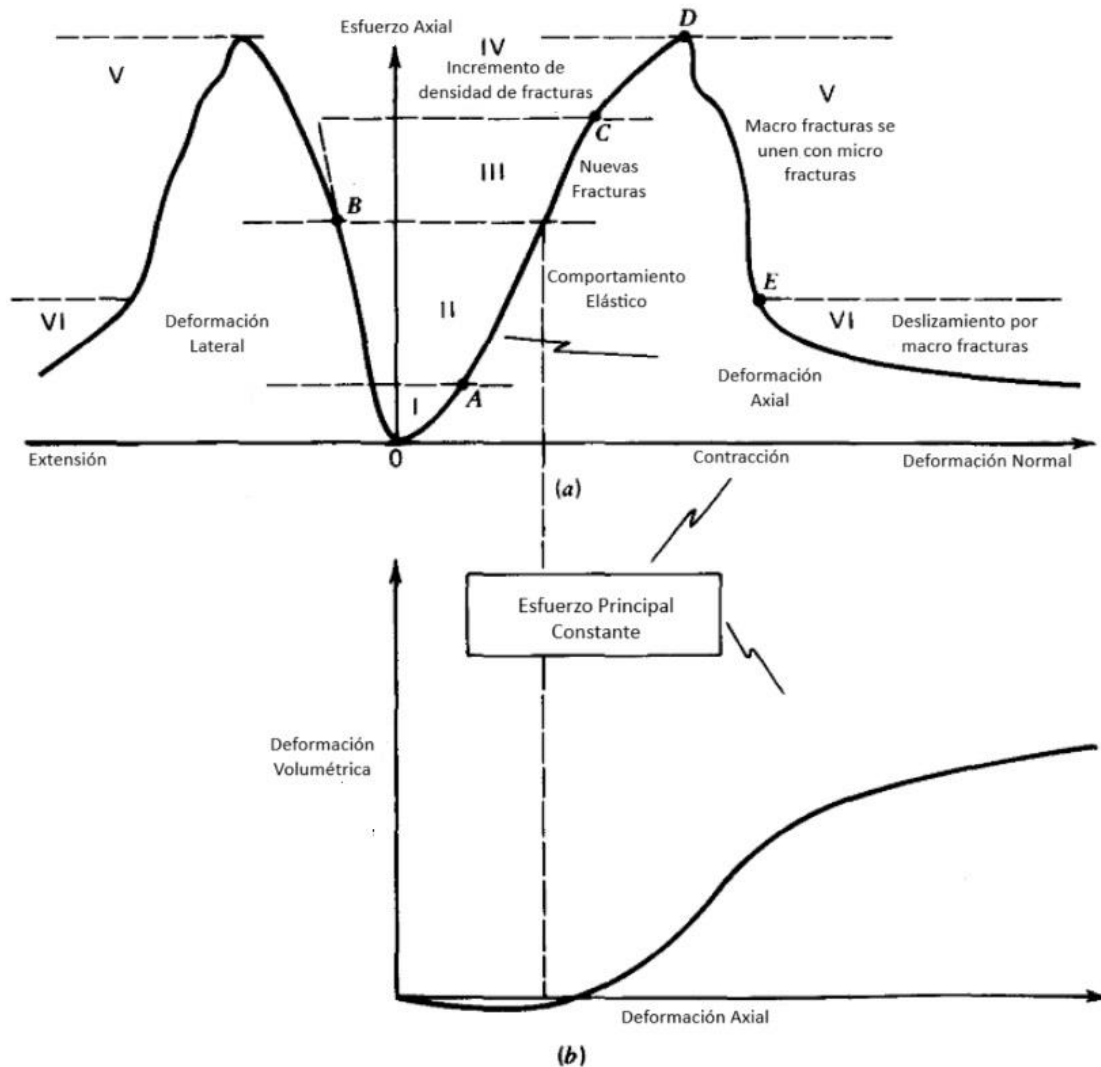


Figura 2.5: Curva esfuerzo deformación (curvas hipotéticas) (a) Deformación axial y radial en función de la carga axial. (b) Deformación volumétrica (dilatancia) en función de la deformación axial (Goodman, (1989)).

Del gráfico de esfuerzo deformación se tiene que en la zona V, comienza una propagación de fallas inestables que se intersectan entre ellas y alcanzan los bordes de la muestra. La pendiente de la curva se vuelve negativa indicando que la muestra pierde la capacidad de mantener una carga, asociada a un aumento en la deformación. El comportamiento en esta región es característico de una deformación frágil. Por último, en la zona VI, la deformación se mantiene a un nivel de esfuerzo constante, siendo este esfuerzo el esfuerzo residual (Velásquez, 2022).

Finalmente, el modo de obtener los resultados de la pendiente es realizando una regresión lineal a los datos del post peak de la figura anterior.

2.2.5. Propiedades Mecánicas de la roca

Como ya fue mencionado, los parámetros de resistencia y elasticidad de la roca con los que representan el comportamiento de las rocas, donde existe una

variabilidad de las propiedades que representan a una misma roca debido principalmente a la anisotropía y heterogeneidad que presentan las rocas y los macizos rocosos, además, también la presencia de las discontinuidades internas de las rocas produce esta variabilidad en los resultados (Callister, 2005). Esto significa que para una misma roca se puede tener una variación considerable de sus propiedades mecánicas.

La resistencia es función de las fuerzas cohesivas y friccionales del material, donde la cohesión (c) es la fuerza de unión entre las partículas minerales que forman la roca. El ángulo de fricción interna, (Φ), es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca; para la mayoría de las rocas este ángulo varía entre 25° y 45° . La fuerza friccional depende del ángulo de fricción y del esfuerzo normal (σ_n) actuando sobre el plano considerado. La resistencia de la roca no es un valor único, ya que además de los valores de c y Φ , depende de otras condiciones, como la magnitud de los esfuerzos confinantes, la presencia de agua en los poros o la velocidad de aplicación de la carga de rotura. También, incluso en rocas aparentemente isotropas y homogéneas, los valores de c y Φ pueden variar según el grado de cementación o variaciones en la composición mineralógica (González de Vallejo, 2002).

Finalmente, de los ensayos ya mencionados en los incisos anteriores, se obtienen los parámetros de resistencias (resistencia a la compresión simple, resistencia a la tracción); y los parámetros elásticos, siendo estos el Módulo de Young (E) y el Coeficiente de Poisson (ν) (Ofoegbu & Curran, 1992).

- Resistencia a la Compresión Simple (σ_{UCS})

La resistencia a la compresión simple de las rocas es el parámetro más común para definir los criterios de rotura y el comportamiento geomecánico de una roca intacta. Su obtención en ensayos de laboratorio requiere muestras cuidadosamente preparadas y de un tiempo considerable de ejecución del ensayo, lo que puede representar un alto costo (Burbano & García, 2016).

La forma de obtener este valor es mediante los datos experimentales y simulados, en donde el valor corresponde al valor del esfuerzo máximo obtenido en el experimento.

- Resistencia a la Tracción (σ_t)

La resistencia a la tracción es un valor característico para evaluar el comportamiento de resistencia de una roca, esta se define como el esfuerzo de tracción mecánico máximo, con el que se puede someter a carga una probeta. Si se supera la resistencia a la tracción, se produce la rotura del material.

La forma de obtener este valor es mediante la data obtenida de los datos experimentales y simulados, en donde el valor corresponde al valor del esfuerzo máximo obtenido en el experimento.

2.2.6. Propiedades Elásticas de la roca

- Módulo de Young (E)

El módulo de Young es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico. Se define como la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo.

Con respecto al comportamiento de la roca, esta presenta un comportamiento frágil cuando se tiene un mayor módulo de Young y menor coeficiente de Poisson que una roca blanda con comportamiento dúctil (González de Vallejo, 2002). Según (Wiebols & Cook, 1968), tener un valor alto de este módulo, nos dice que la roca tendrá un comportamiento frágil, es decir que tendrá una ruptura violenta al alcanzarse su resistencia peak, almacenando muy poca energía de deformación; mientras que un valor bajo para este módulo se traduce en un fracturamiento más controlado del material, ya que este almacenará una mayor energía de deformación.

La forma de obtener este valor consiste en obtener la pendiente de la parte elástica de la curva de esfuerzo y deformación, siendo esta la ecuación:

$$E = \frac{\sigma_{zz}}{\varepsilon_{zz}} [\text{Unidades de Esfuerzo}]$$

- Módulo Residual (E_{res})

El comportamiento post peak de la roca incluye la transición de la resistencia peak de la roca y la resistencia residual de esta. Dicho proceso se conoce como reblandecimiento, como se puede observar en la Figura 2.6. El comportamiento post peak de la roca se caracteriza por una pérdida de resistencia gradual de la roca entre los puntos de resistencia máxima y resistencia residual, lo que implica un paso gradual del criterio de rotura pico al residual. Los comportamientos extremos del proceso post peak son el elasto-plástico perfecto y el elasto-frágil (Figura 2.7a y Figura 2.7b). El primero se caracteriza por tener un criterio pico y residual iguales, mientras que el segundo difiere de gran manera (Alejano, 2012).

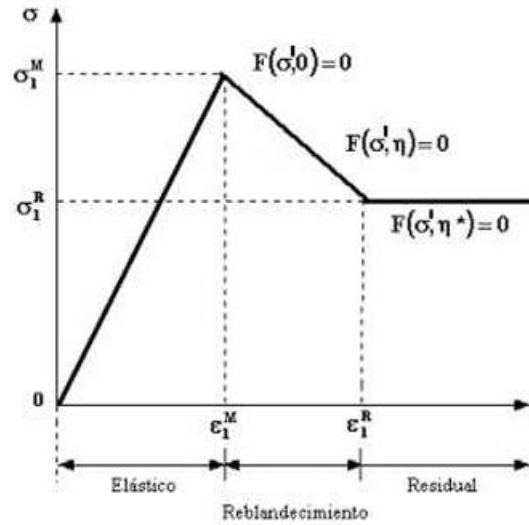


Figura 2.6: Comportamiento post pico de tipo elastoplástico con reblandecimiento (Alejano, (2012)).

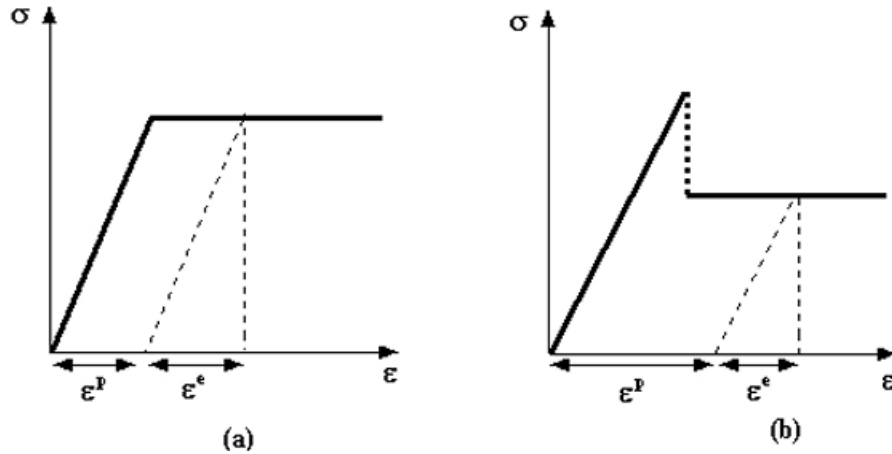


Figura 2.7: Comportamiento elasto-plástico perfecto (a) y comportamiento elasto-frágil (b) (Alejano, (2012)).

Se presentan 3 fases de deformación en el proceso de post peak de las rocas:

- $F(\sigma'_1, \sigma'_3, 0) = 0$ representa el criterio de rotura de la roca intacta.
- $F(\sigma'_1, \sigma'_3, \eta) = 0$ para $0 < \eta < \eta'$, representa el criterio evolutivo de la zona de reblandecimiento
- $F(\sigma'_1, \sigma'_3, \eta') = 0$ para $\eta \geq \eta'$, representa el criterio de rotura residual que se corresponde a un estado de plasticidad perfecta.

El comportamiento post-peak obtenido en laboratorio para muestras de rocas queda definido principalmente por: (1) los factores intrínsecos de la roca tales como sus propiedades mecánica y elásticas, discontinuidades, litología, entre otros. (2) la maquina utilizada para el ensayo (Pollak, 2022). Para este último, la correcta elección de la prensa permite la obtención completa de una curva de esfuerzo-deformación (incluyendo la región post peak), en donde el equipo debe ser más rígido que la probeta para poder lograr la correcta liberación de energía de la

muestra. En la Figura 2.8a se observa cuando la prensa es menos rígida que la muestra, supóngase que la probeta se encuentra en su punto de máxima resistencia y se comprime una pequeña cantidad ε_1 . Para experimentar esta compresión, la carga de la probeta se debe reducir de σ_A a σ_J . La energía necesaria para ello viene dada por el área ACDJ, sin embargo, para una máquina menos rígida que la probeta dicho desplazamiento le corresponde una menor pérdida de carga, y la energía que libera la prensa viene dada por el área ACDH. En este caso, la energía que absorbe la probeta es menor que la energía liberada por la máquina, y este exceso de energía da a lugar a un rompimiento explosivo de la muestra. Por otro lado, la Figura 2.8b muestra cuando la prensa es más rígida que la máquina, en este caso la energía liberada por la prensa es el área ACDL, siendo menor que la necesaria para seguir deformando la probeta, con lo cual, para seguir con la deformación, se debe suministrar energía externa para continuar con el ensayo, siendo este el mecanismo de control para el correcto desarrollo de la prueba.

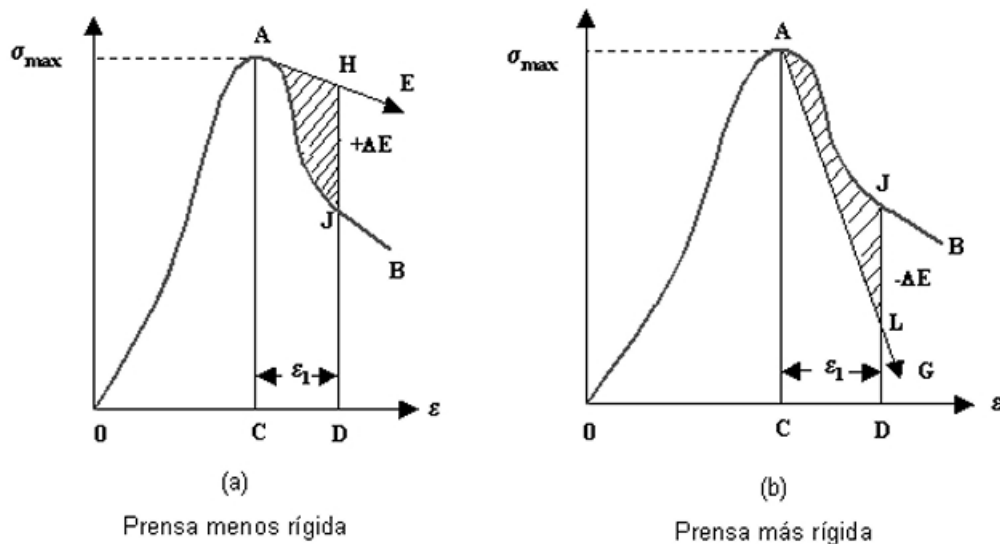


Figura 2.8: Influencia de la rigidez de la prensa en el comportamiento post peak de la roca (Alejano, (2012)).

Por otro lado, la región post peak, que se vio en la Figura 2.5 también es de gran importancia, sobre todo en minería, donde, a pesar de la aparición de fractura, la "roca fallada" sigue siendo capaz de soportar una carga considerable, especialmente cuando hay restricción lateral como son las minas subterráneas (Paterson & Wong 2005). De esta manera, es de gran importancia lograr una buena representación de la región post peak de las curvas esfuerzo-deformación para distintos confinamientos, esto debido a que cuando la roca ve sobrepasada su resistencia (comportamiento post peak), el macizo rocoso puede sufrir una súbita disminución de su capacidad de resistir esfuerzos (Salinas, 2016).

Por otro lado, Wawersik y Fairhurst (1970) realizaron ensayos uniaxiales y triaxiales con el objetivo de obtener por completo la curva esfuerzo-deformación, aplicando un control de deformación axial e intervalos de descarga rápidas para

distintos tipos de rocas. Distinguieron dos clases de comportamiento, basado en el estudio de la curva en la fase post-peak, como se observa en la Figura 2.9.

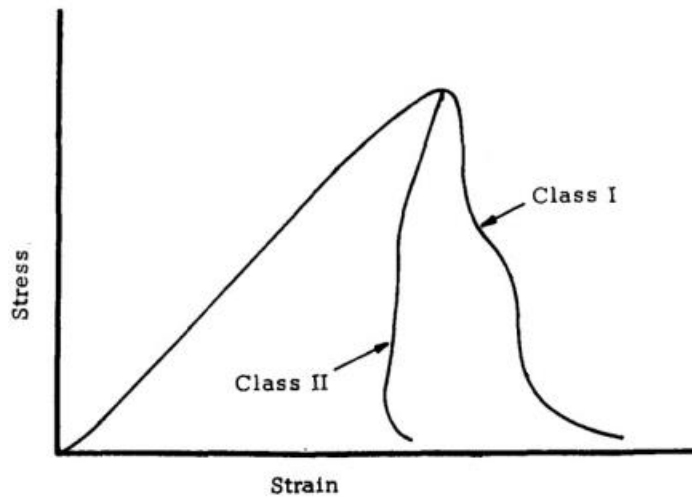


Figura 2.9: Comportamientos post-peak Clase I y Clase II (Wawersik y Fairhurst (1970)).

- Clase I: Representa un aumento monótono de la deformación axial en el proceso de falla.
- Clase II: La deformación axial no aumenta de modo monótono durante el proceso de falla. En el momento peak de resistencia, la probeta contiene una energía elástica mayor a la necesaria para continuar la falla, por lo que parte de la energía debe ser extraída mediante la reducción de la deformación axial para continuar con una falla progresiva no-violenta.

- Razón de Poisson (ν)

El coeficiente de Poisson es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo (Callister, 2005).

El coeficiente de Poisson define la relación entre la deformación transversal y axial pre peak, en la parte lineal de la curva, esto se traduce en:

$$\nu = \frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{axial}} [Adimensional]$$

- Fragilidad y Ductilidad

Al someter una probeta de roca a compresión, el comportamiento de ésta podrá ser dúctil, cuando puede mantener una deformación permanente sin perder su capacidad de carga; o frágil, cuando presenta pérdida abrupta de resistencia una vez alcanzada la condición de falla (Pollek, 2022). Una roca dura con

comportamiento frágil presenta mayor módulo de Young y menor coeficiente de Poisson que una roca blanda con comportamiento dúctil (González de Vallejo, 2002).

2.3. Modelamiento Numérico con DEM

Los fenómenos naturales pueden ser replicados mediante representaciones teóricas basadas en las leyes de la física e ingeniería que rigen el fenómeno en cuestión, esta técnica se conoce como modelamiento numérico. Dentro del modelamiento numérico, se tiene distintos métodos para aplicar, los cuales son:

- *Métodos Continuos:*
 - Método de diferencias finitas (DFM).
 - Método de elementos finitos (FEM).
 - Método de elementos de borde (BEM).
- *Métodos Discontinuos:*
 - Método de elementos discretos (DEM).
 - Métodos de redes de fractura discreta (DFN).
- *Modelos híbridos (continuo/discontinuo):*
 - Híbrido FEM/BEM.
 - Híbrido DEM/DEM.
 - híbrido FEM/DEM.
 - Otros modelos híbridos.

La elección del método dependerá de la naturaleza del fenómeno que se desee replicar (Jing, 2003), y para efectos de este trabajo se decide utilizar DEM.

Peter Cundall es quien introduce el método de elementos discretos (P. Cundall et al., 1971) para el análisis de problemas de mecánica de rocas. Se dice que un programa es de métodos discretos si cumple con (P. A. Cundall & Hart, 1992):

- Permitir desplazamientos finitos y rotaciones de cuerpos discretos, incluyendo su completa separación.
- Reconocer automáticamente nuevos contactos durante todo el tiempo de cálculo.

Los cálculos realizados en el DEM alternan entre la aplicación de la segunda ley de Newton a las partículas rígidas, y la ley de fuerza-desplazamiento a los contactos de los cuerpos, esto se ve representado en la Figura 2.10. La segunda ley de Newton es utilizada para determinar el movimiento, tanto de rotación como traslacional, de cada partícula producto de las fuerzas actuando sobre cada cuerpo, mientras que la ley de fuerza-desplazamiento es utilizada para actualizar las fuerzas de contacto que surgen del movimiento relativo de estos (Potyondy & Cundall, 2004).

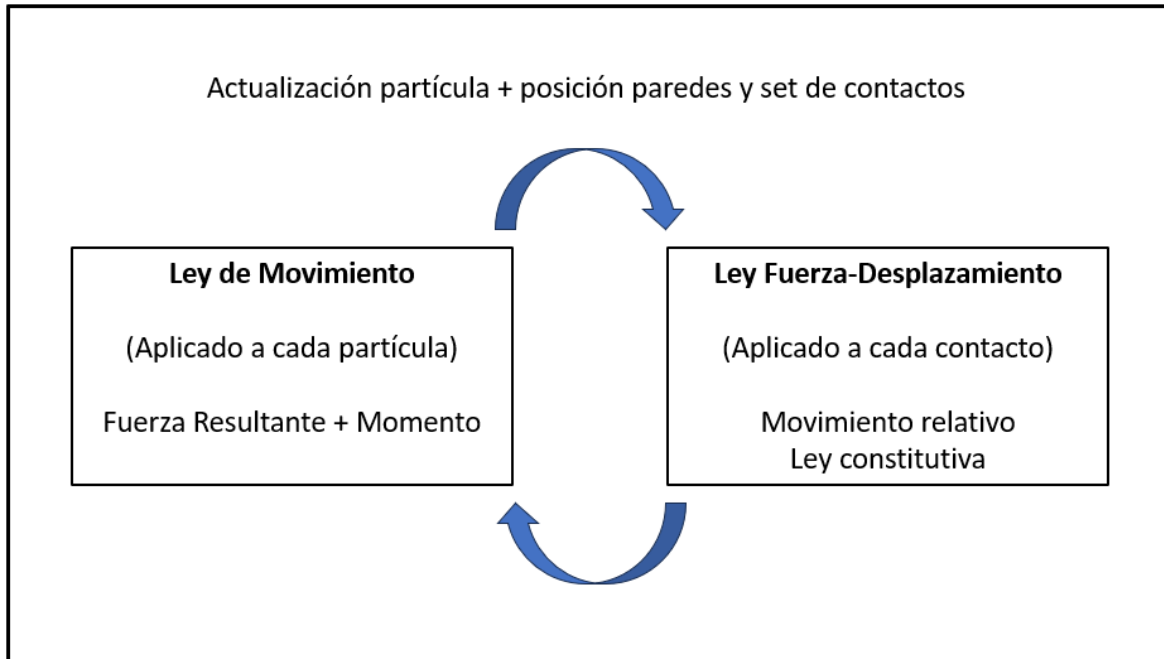


Figura 2.10: Ciclo de cálculo utilizado por el método de elementos discretos (Luengo, 2014).

El método de elementos discretos se basa en la idea de que el paso de tiempo escogido para la realización de los cálculos de interacción puede ser tan pequeño que, durante un solo paso de tiempo (time-step), las perturbaciones no pueden propagarse más allá de sus vecinos inmediatos.

La implementación de este método se realiza mediante un software, el cual corresponde a PFC3D3D (Particle Flow Code 3D) (Itasca, 2023), programa de elementos discretos utilizado en este trabajo para realizar la calibración, utiliza el DEM para modelar el movimiento e interacción de las partículas (esferas rígidas) y sus contactos.

2.4. Particle Flow Code 3D (PFC3D)

El software utilizado para el desarrollo de este trabajo proviene de la compañía Itasca Consulting Group Inc; siendo este el PFC3D, el cual implementa una serie de programas para el estudio y análisis geomecánicos.

PFC3D corresponde a un programa discontinuo que utiliza el método de elementos discretos (DEM) para simular el comportamiento mecánico de la roca, la cual está representada como un empaquetamiento denso de partículas rígidas de diámetros variables con forma circular (2D) o esférica (3D), que están unidas e interactúan entre sí en sus puntos de contacto. Las micro propiedades de este modelo consisten en parámetros de rigidez y de resistencia para las partículas y los vínculos.

Gracias a lo anterior, el software tiene la capacidad de conformar una representación de la roca, además de generar el ambiente para la realización de ensayos de roca, ya que además del arreglo de partículas que utiliza para generar a la probeta, también puede representar condiciones de borde al conjunto de esferas mediante paredes Figura 2.11, simulando así las condiciones y fenómenos de los distintos ensayos de roca que existen y que fueron mencionados en los incisos anteriores. Conjunto con esto, el software permite estimar los macro parámetros de roca necesarios para los estudios, ya de manera integrada, o trabajando con los datos entregados por este.

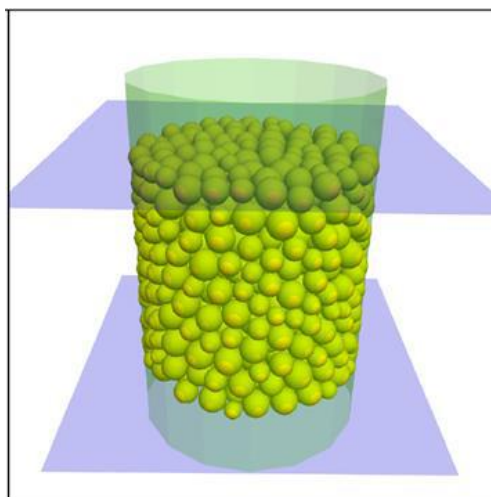


Figura 2.11: Probeta sintética de roca en PFC3D3D con paredes para la aplicación de carga en ensayo triaxial convencional (Potyondy, 2010b).

Para las distintas simulaciones que se pueden realizar en el software PFC3D, se tienen ciertos supuestos (Itasca, 2023):

1. Las partículas se comportan como cuerpos rígidos.
2. Los contactos ocurren sobre un área infinitamente pequeña (un punto).
3. El comportamiento entre los contactos usa una herramienta de contacto suave, en donde se permite a las partículas rígidas superponerse a otras en los puntos de contacto.

4. La magnitud de esta superposición se relaciona a la fuerza de contacto en función de la Ley de fuerza desplazamiento, y todas son pequeñas con relación al tamaño de las partículas.

5. Pueden existir contactos entre partículas.

6. Todas las partículas son esféricas. Sin embargo, los clumps permiten la creación de partículas de cualquier forma, generándose de la superposición de un grupo de éstas, los que actúan como un cuerpo rígido con un borde deformable.

La finalidad de realizar ensayos de roca con PFC3D es lograr una calibración para obtener una envolvente de falla similar a la experimental y propiedades elásticas y mecánicas de la roca. Para representar el daño durante un ensayo, PFC3D permite la formación, crecimiento e interacción de grietas, considerando para esto la falla de los vínculos entre las partículas (Suzuki, 2013). Para lograr la calibración de los modelos en PFC3D se deben variar micro parámetros, los cuales cambian las condiciones en las cuales interactúan las partículas entre sí.

Existen distintos modelos de contacto dentro del catálogo que ofrece PFC3D, dentro de los cuales destacan:

- Bonded Particle Model.
- Enhanced Bonded Particle Model.
- Flat Joint Contact Model.
- Soft Bonded Particle Model.
- Johnson-Kendall-Roberts Model.
- Edinburgh Elasto Plastic Adhesive Contact Model.

Los modelos para comparar en este trabajo son el Soft Bonded Particle Model (SBM) y el Flat Joint Contact Model (FCM), los cuales representan distintos tipos de contacto entre las partículas. Cabe destacar que cada modelo presenta sus propios micro parámetros y cinética interna, como también con sus propias limitaciones, con lo cual la respuesta de estos varía según sea el objetivo del comportamiento de roca que se desea lograr. La limitación de estas relaciones se debe a que este problema es multivariable, por lo que no es posible obtener la tendencia individual de un parámetro al fijar una sola variable, ya que no todas son independientes entre sí (Wang and Tonon 2009).

2.4.1. Soft Bonded Particle Model (SBM)

El Soft Bonded Particle Model corresponde a un modelo de partículas que representa al macizo rocoso utilizando el programa PFC3D. Este simula el comportamiento mecánico de una colección de granos (partículas esféricas) unidos

por cemento (Parallel Bond), como en contacto (Contact Bond) actuando ambos al mismo tiempo. El esquema del modelo se observa en la Figura 2.12.

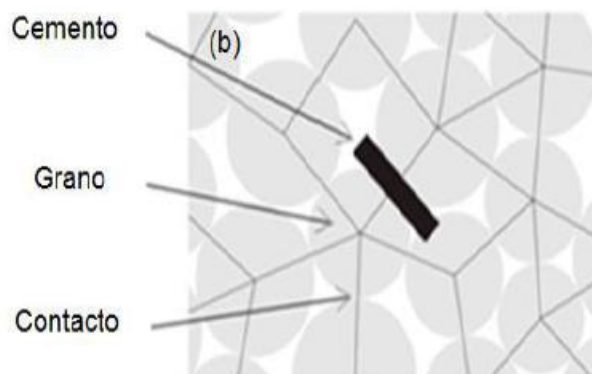


Figura 2.12: Representación Parallel Bond (Potyondy & Cundall, 2004).

El SBM se puede utilizar para simular sistemas tanto no enlazados como enlazados.

En estado no adherido, se comporta esencialmente de manera similar al modelo de contacto BPM (Jiang et al., 2015), proporcionando la capacidad de transmitir tanto una fuerza como un momento en el punto de contacto, con parámetros de resistencia a la fricción que limitan la fuerza de corte, el momento de flexión y el momento de torsión.

En su estado adherido, el comportamiento es similar al de un modelo Parallel Bond, con la posibilidad de que la ligadura falle si se excede la resistencia de la ligadura ya sea en corte o en tensión. Sin embargo, contrariamente al mencionado, el enlace no se elimina en caso de falla. En su lugar, puede entrar en un régimen de ablandamiento hasta que la tensión de la unión alcanza un valor umbral en el que la unión se elimina y se considera rota. En este modelo se puede especificar la pendiente y la resistencia a la rotura por tracción durante el ablandamiento (mediante el factor de ablandamiento (soft) y el factor de resistencia a la tracción por ablandamiento (cut), respectivamente). Otra diferencia con el modelo de Parallel Bond es que solo se utiliza un conjunto de rigideces para las formulaciones no enlazadas y enlazadas (aunque puede diferenciarse), y así generar un comportamiento que es esencialmente similar al propuesto por Ma, (2018), con la diferencia de que el alargamiento de enlace utilizado para actualizar la tensión normal en el régimen de reblandecimiento tiene en cuenta tanto el desplazamiento normal como los incrementos de flexión. Entonces, se puede decir que un enlace blando se puede imaginar como un conjunto de resortes elásticos con rigidez normal y de corte constante, distribuidos uniformemente sobre una: sección rectangular en 2D; y sección transversal circular en 3D situada en el plano de contacto y centrada en el punto de contacto. El movimiento relativo en el contacto provoca el desarrollo de una fuerza y un momento lineales que actúan sobre las dos piezas en contacto

Por otro lado, este modelo es una variación del modelo EBPM, en donde si se ajustan ciertos micro parámetros del SBM (soft, cut y sb_mcf), se espera un comportamiento similar al modelo anteriormente mencionado. En este caso, el modelo SBM hereda las limitaciones que tiene el EPBM, los cuales son principalmente la imposibilidad de ajustar la razón de Poisson, en donde Arteaga, (2015) realizo ensayos triaxiales con distinto confinamiento, en donde los resultados de la razón de Poisson se observan en la Figura 2.13; y por otro lado es la dificultad de poder simular de buena manera el comportamiento post peak de la roca (utilizando un factor de contribución del momento igual a cero), en donde se tiene un comportamiento más dúctil que el deseado, esto se observa en la Figura 2.14, donde Arteaga, (2015) realizo ensayos con un confinamiento de 5 [Mpa] obteniendo una respuesta comparativamente dúctil. En el caso de la contribución del momento (sb_mcf), se tiene que para replicar el modelo EBPM, la contribución del momento debiese ser 0, aunque el tener una contribución del momento 0 es bastante cuestionable (Suzuki, 2013), por lo cual, para diferenciarse de este modelo, se escogerá un valor distinto de cero para dicho micro parámetro.

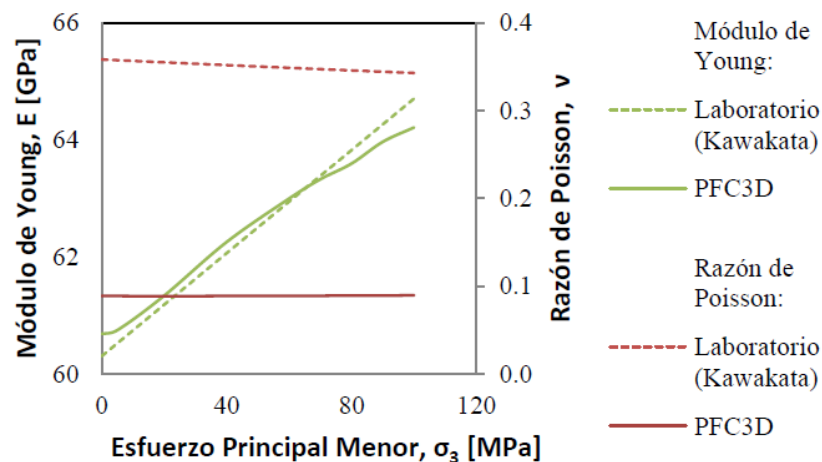


Figura 2.13: Comparación parámetros elásticos (Módulo de Young y Razón de Poisson) obtenidos con EBPM versus datos experimentales (Arteaga, 2015).

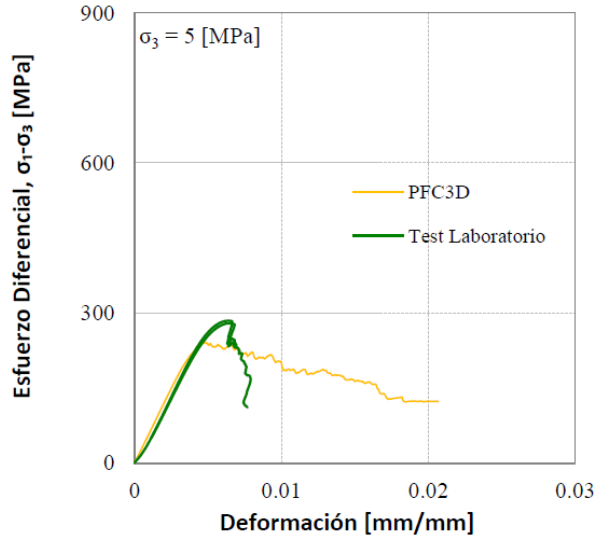


Figura 2.14: Representación de curva esfuerzo-deformación obtenida por ensayo triaxial con confinamiento de 5 [MPa] por EBPM (en amarillo) vs curva experimental (en verde) (Arteaga, 2015).

2.4.1.1. Contact Bond (CB)

El Contact Bond o CB corresponde al tipo de contacto que representa al punto donde interactúan las esferas en donde no existe cemento entre las partículas, con lo cual pueden moverse libremente unas de otras, incluyendo el movimiento de rotación ya que el CB no posee resistencia al momento, de manera que las esferas sólo interactuarán en dicho punto de contacto. Esta interacción se puede visualizar como un resorte, el cual posee una constante de rigidez normal (k_n) y otra de corte (k_s) como se observa en la Figura 2.15. Estas rigideces están dadas por:

$$k_n = 2DE$$

$$k_s = k_n / (k_n / k_s)$$

Donde:

- E es el módulo de Young de la partícula.
- D es el diámetro de la partícula.
- k_n/k_s es la razón entre las rigideces normal y de corte.

Entre dos partículas hay una fuerza de contacto (F_i). Esta fuerza corresponde a la acción de la partícula A sobre la B, y se descompone en una componente normal (F_N) y otra de corte (F_S).

Este tipo de contacto puede fallar por corte, en el caso de que las partículas están en cizalle o rotando, como también por tracción

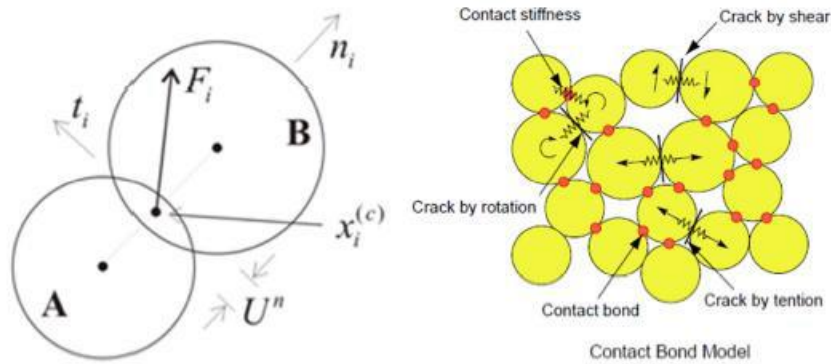


Figura 2.15: Esquema del Modelo Contact Bond (Potyondy & Cundall, 2004).

Con lo anterior, se puede definir un criterio de falla para el Contact Bond:

- Si la fuerza normal es igual o mayor a la resistencia a la tracción del CB ($F^n \geq F_c^n$), entonces este fallará. Luego las fuerzas normales y de corte serán nulas.
- Si la fuerza de corte es igual o mayor a la resistencia al corte del CB ($F^s \geq F_c^s$), entonces este fallará. Pero a diferencia del caso anterior, las fuerzas del contacto no cambian ya que no existe resistencia al momento.

En la Figura 2.16 se observa el comportamiento constitutivo del CB, donde se relacionan la componente normal y corte de la fuerza con el desplazamiento.

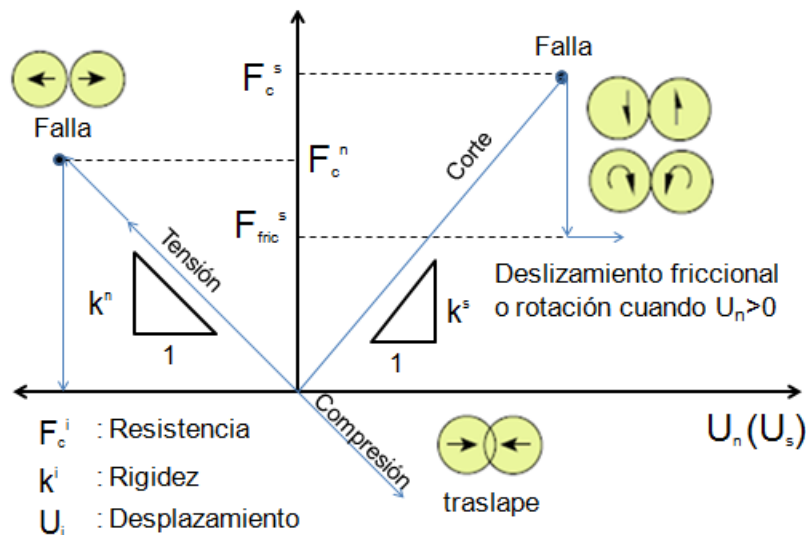


Figura 2.16: Tipos de falla Contact Bond Model (Cho et al., 2007).

Se tiene que un modelo de contacto se define mediante micro parámetros que le dan las propiedades a cada unión entre partículas, y todas estas al interactuar entre sí, entregan el resultado del ensayo que corresponden a los macro parámetros, tales como resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la tracción, módulo de Young, etc (Vallejos et al., 2016).

De esta manera los micro parámetros que controlan el modelo corresponden a los que se observan en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Micro parámetros Contact Bond - SBM.

Símbolo	Símbolo PFC3D	Descripción	Rango
E	emodb	Módulo de Young de las Partículas [Gpa]	$[0, \infty[$
μ	fricb	Coeficiente Fricción de las Partículas [-]	$[0, 1]$
k_n/k_s	kratiob	Razón de Rigideces de las Partículas [-]	$] - \infty, \infty[$
ρ	density	Densidad del Material $[\text{kg/m}^3]$	$[0, \infty[$
$D_{\text{máx}}/D_{\text{min}}$	dratio	Razón Diámetros Partículas [-]	$[0, \infty[$

2.4.1.2. Parallel Bond (PB)

El Parallel Bond o PB corresponde al cemento que une las partículas el cual establece una interacción elástica entre partículas funcionando en paralelo con el modelo CB. El modelo PB igualmente está definido por micro parámetros que definen la interacción anteriormente mencionada. Al inicio de este inciso se mencionó que el modelo CB y PB trabajan simultáneamente, pero de la siguiente manera: al inicio todos los esfuerzos son soportados por el PB, y cuando este falla, la carga se transfiere al CB. Los enlaces paralelos además de transmitir fuerzas de corte y normal, de igual manera que los enlaces de contacto pueden transmitir momento entre las partículas. La estructura del modelo se puede apreciar en la Figura 2.17:

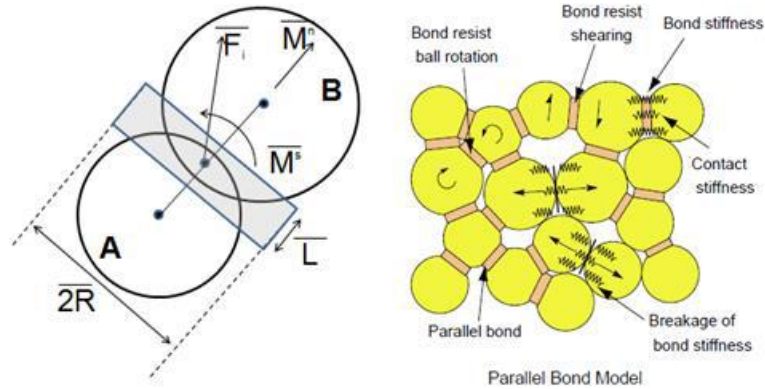


Figura 2.17: Esquema del Modelo Parallel Bond (D. Potyondy & Cundall, 2004).

Al igual que en el modelo de CB, el PB se puede idealizar como un set de resortes distribuidos uniformemente a lo largo de la sección transversal que representa al contacto. Estos resortes ideados poseen una rigidez normal ($\bar{k}_n$) y una de corte ($\bar{k}_s$) con respecto al plano de contacto entre las partículas. Estas rigideces se definen a continuación:

$$\bar{k}^n = \bar{E}_c / (R^{(A)} + R^{(B)}) \quad \bar{k}^s = \bar{k}^n / (\bar{k}^n / \bar{k}^s)$$

Donde:

- $\bar{E}_c$ es el módulo de Young del Parallel Bond.
- $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ es la razón de rigideces del Parallel Bond.
- $R^{(A)}$ y $R^{(B)}$ son los radios de las partículas que comparten el Parallel Bond.

Como se observa en la Figura 2.17, el PB corresponde a un “disco” de ancho L cercano a cero, que actúa como contacto entre las partículas. Para estimar el radio de este disco se utiliza la siguiente ecuación:

$$\bar{R} = \bar{\lambda}_{min}(R^{(A)}, R^{(B)})$$

Donde:

- $\bar{\lambda}$ es un factor que toma valores entre 0 y 1.
- $R^{(i)}$ es el radio de las partículas que comparten el PB.

Al igual que el CB, el PB tiene una resistencia a la tracción y compresión definidos por los micro parámetros σ_c y c , correspondientes a la resistencia a la tracción y la cohesión respectivamente, en donde el criterio de falla corresponde a:

$$\bar{\sigma}^{max} = \frac{\bar{F}_i^n}{A} \quad \bar{\tau}^{max} = \frac{\bar{F}_i^s}{A}$$

En donde si estos valores máximos superan a los micro parámetros, el componente fallara. Por otro lado, Siempre que dos partículas están en contacto, existe una rigidez asociada. En el caso de que falle el PB existente entre dos partículas se tendrá una reducción en la rigidez del cemento, debido a que ésta tiene una contribución de la rigidez del contacto (CBM) y del mismo cemento (PBM). La rigidez se elimina, aunque las partículas sigan en contacto.

De esta manera, los micro parámetros necesarios en este modelo de contacto se pueden observar en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2: Micro Parámetros Parallel Bond - SBM.

Símbolo	Símbolo PFC3D	Descripción	Rango
E	emod	Módulo de Young del enlace [Gpa]	[0,∞[
k_n/k_s	kratio	Razón de Rigideces del enlace [-]	[0,∞[
c	sb_coh	Cohesión [Mpa]	[0,∞[
σ_c	sb_ten	Resistencia a la Tracción [Mpa]	[0,∞[
Φ	sb_fa	Ángulo de Fricción [°]	[0,90]
soft	sb_soft	Factor de Ablandamiento [-]	[0,∞[
cut	sb_cut	Factor Reblandecimiento de resistencia a la tracción [-]	[0,1]
β	sb_mcf	Factor Contribución del Momento [-]	[0,1]

Se tiene que el micro parámetro sb_mcf corresponde al factor de contribución al momento, entonces, como se mencionó al inicio del inciso, si se usa un valor de 0, se estaría replicando el modelo EBPM, sumado a un valor de 0 y 1 para el soft y cut respectivamente como fue mencionado en el inicio del Inciso, con lo cual el ajuste de estos parámetros tendrá valores distintos a los mencionados. Aunque la elección de un factor de contribución de momento igual a 0 es cuestionable (Suzuki, 2013), la elección de un valor igual a 1 genera problemas en la ausencia de fallas por corte en ensayos de compresión (Potyondy, 2011).

Por otro lado, el comportamiento del modelo varía de gran manera según se escoja un valor para dichos micro parámetros, ya que en el caso del soft, se tiene que al momento de estar alcanzando el valor de la resistencia peak, el modelo entra en un régimen de ablandamiento del orden de 1 sobre el valor de soft ($1/soft$) (Itasca, 2023).

2.4.2. Flat Contact Model (FCM)

El Flat Joint Contact Model, al igual que el Soft Bonded Particle Model, corresponde a un modelo de partículas que representa al macizo rocoso utilizando PFC3D. La diferencia es que lo hace mediante otro tipo de contacto, el cual corresponde al FCM.

Un FCM replica el comportamiento entre dos superficies ideales planas de largo finito, representando el cemento que une a las partículas. La interfaz coincide con la superficie media que está centrado en el plano de contacto. Es así como la superficie efectiva de cada grano está definida por la esfera, como también por las “superficies ideales” adheridas a la partícula, las cuales interactúan en cada Flat Joint Contact con la superficie ideal de la partícula con la que está en contacto (Potyondy, 2013b). Esto se puede apreciar en la Figura 2.18:

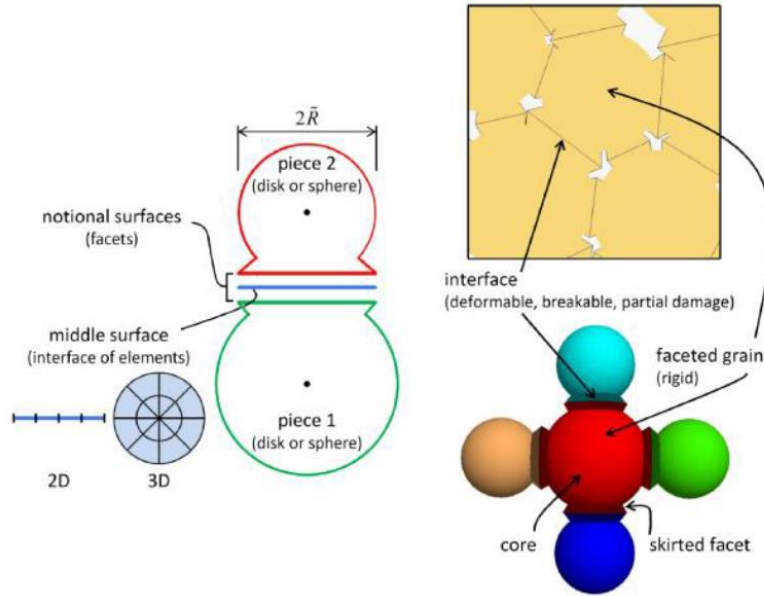


Figura 2.18: (a) Esquema de Flat Joint Contact. (b) Representación de Flat Joint Material. (Potyondy, 2013b).

A diferencia del SBM, el FCM realiza una discretización en el área del disco, teniendo cada sección las mismas características, pero pudiendo fallar por separado, es decir que el disco puede fallar por partes. De esta manera el comportamiento mecánico de la interfaz puede ser elástico, cuando todos elementos están activos, como friccional cuando estos han fallado, con lo cual el modelo puede representar un daño parcial dentro de sus enlaces.

Tanto en el SBM como en el FCM, se posee un disco de contacto de radio finito. La diferencia radica en que en el PB del SBM la interfaz se encuentra unida en todo su largo, por lo que, al fallar el contacto, el PB es removido no pudiendo resistir rotación, mientras que, en el FCM, la interfaz esta discretizada en elementos, pudiendo comportarse como un contacto completamente unido a uno completamente roto, pero al no ser removido, resiste la rotación.

Ahora, analizando la microestructura interna del modelo, se tiene que cada contacto posee un estado inicial. Este estado puede ser unido, fallado, o slit (transición). De esta manera cuando el material es creado, cada contacto es designado como un tipo B (unido), G (fallado) o S (slit) como lo muestra la Figura 2.19, en donde es posible observar que para un contacto tipo B las superficies de ambos granos en contacto se encuentran unidas, para un contacto tipo G las superficies se encuentran con una separación inicial ($g > 0$), y por ende el contacto fallado, y para un contacto tipo S las superficies de ambos granos en contacto se encuentran unidas, pero no cementadas, por lo que no reciben las características otorgadas por los micro parámetros del modelo.

Para cada uno de estos tipos de contacto, se tiene un micro parámetro del modelo que otorga el valor de la fracción inicial de cada uno de estos al momento

de ser creada la probeta. La relación entre estos micro parámetros está dada por la siguiente ecuación:

$$\phi_S = 1 - \phi_B - \phi_G$$

Donde:

- ϕ_S son la fracción de contactos en estado slit.
- ϕ_B son la fracción de contactos unidos.
- ϕ_G son la fracción de contactos fallados.

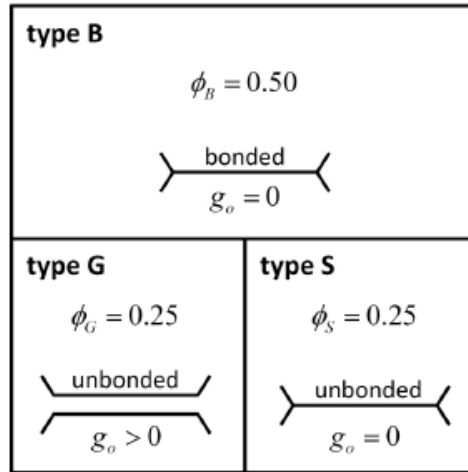


Figura 2.19: Tipos de Estados de Flat Joint Contacts (Potyondy, 2014).

Por otro lado, la cinemática considera el movimiento del sistema sin tener en cuenta el rol de las fuerzas que causan dicho movimiento. El movimiento relativo de las superficies ideales en el contacto es descrito por la velocidad de traslación y rotación (Potyondy, 2013a), representado por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{U} = \dot{X}_c^{(2)} - \dot{X}_c^{(1)} = \{\dot{X}^{(2)} + \omega^{(2)}x(X_c - X^{(2)})\} - \{\dot{X}^{(1)} + \omega^{(1)}x(X_c - X^{(1)})\}$$

$$\dot{\Theta} = \omega^{(2)} - \omega^{(1)}$$

Donde:

- X_c corresponde a la posición del centroide.
- $\dot{X}$ es la velocidad de traslación.
- Ω es la velocidad de rotación.
- $\dot{X}_c^{(i)}$ y $\dot{X}^{(i)}$ son las velocidades de traslación de la partícula (i) en la ubicación del contacto y en el centro de la partícula respectivamente.

El esquema del comportamiento cinemático del modelo se puede observar en la siguiente Figura 2.20:

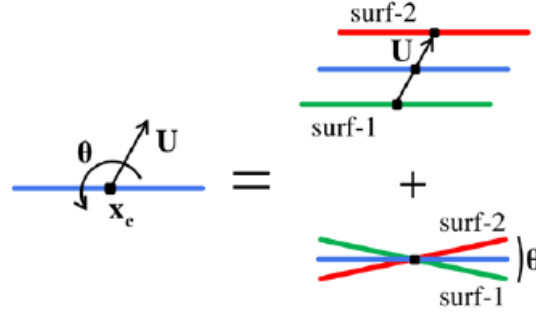


Figura 2.20: Cinemática Flat Joint Model (Potyondy, 2012).

En tanto para la cinética del modelo, se debe considerar el rol de las fuerzas que causan el movimiento. Cada contacto almacena una fuerza y un momento los cuales son actualizados basados en la ley de fuerza-desplazamiento. Estas fuerzas actúan en sentido opuesto en el par de superficies asociadas a la superficie del centroide donde interactúan.

Al ser discretizada la interfaz en N partes de igual largo genera que cada segmento carga con una fuerza $F_{(i)}$ y un momento $M_{(i)}$ que actúan en sentido contrario en el par de segmentos asociados como se observa en la Figura 2.21.

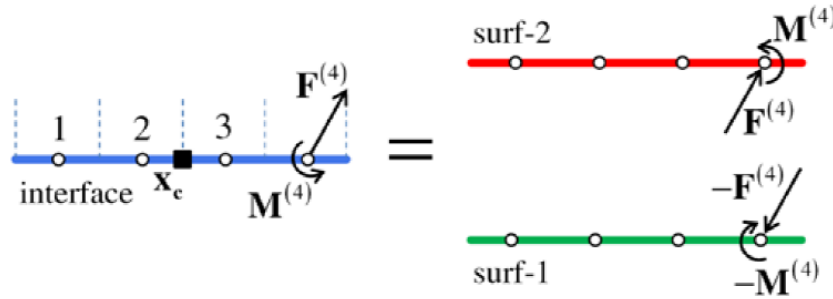


Figura 2.21: Cinética Flat Joint Model (Potyondy, 2012).

Finalmente, de esta manera los micro parámetros que controlan el modelo Flat Contact Model se pueden observar en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Micro Parámetros CB - FCM

Símbolo	Símbolo PFC3D	Descripción	Rango
E	emodb	Módulo de Young de las Partículas [Gpa]	$[0, \infty[$
μ	fricb	Coeficiente Fricción de las Partículas [-]	$[0, 1]$
k_n/k_s	kratiob	Razón de Rigideces de las Partículas [-]	$[0, \infty[$
ρ	density	Densidad del Material $[\text{kg}/\text{m}^3]$	$[0, \infty[$
$D_{\text{máx}}/D_{\text{min}}$	dratio	Razón Diámetros Partículas [-]	$[0, \infty[$

Estos valores corresponden a la parte lineal o empaquetamiento del modelo, mientras que los valores para definir el modelo FCM se ven en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4: Micro Parámetros PB - FCM.

Símbolo	Símbolo PFC3D	Descripción	Rango
E	emod	Módulo de Young del enlace [Gpa]	[0,∞[
k_n/k_s	kratio	Razón de Rigideces del enlace [-]	[0,∞[
c	fj_coh	Cohesión [Mpa]	[0,∞[
σ_c	fj_ten	Resistencia a la Tracción [Mpa]	[0,∞[
Φ	fj_fa	Ángulo de Fricción [°]	[0,90]
N_R	fj_nr	N° Elementos Radiales	[2,∞[
N_α	fj_nal	N° Elementos Circunferenciales	[2,∞[

Finalmente, al igual que el modelo SBM, el modelo FCM cuenta con sus propias limitantes, aunque en comparativa al modelo EBPM (SBM), se tiene una mejor respuesta en el comportamiento post peak para el FCM, como se observa en la Figura 2.22, donde son los resultados obtenidos por Salinas, 2016 en su tesis de grado.

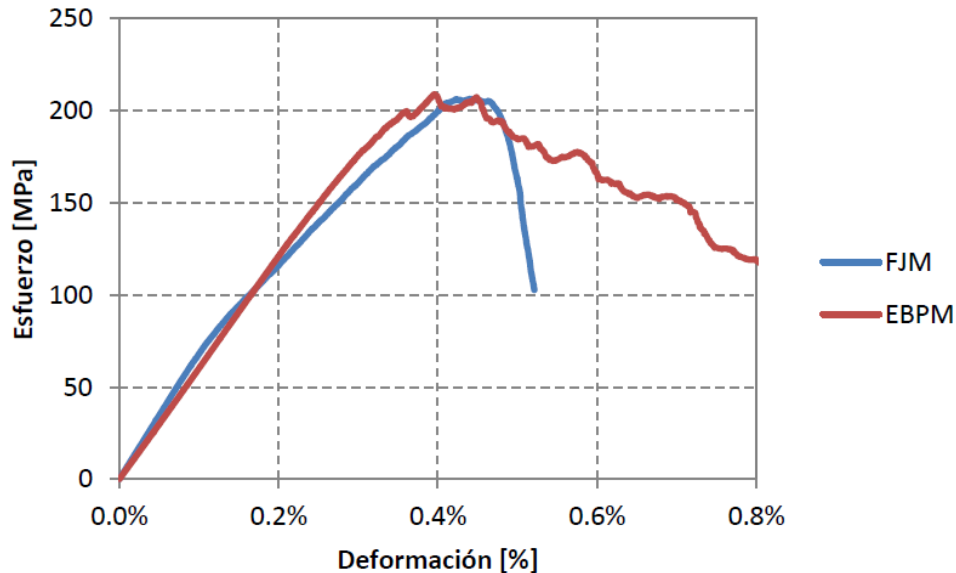


Figura 2.22: Comparativa curvas obtenidas con modelos FCM y EBPM (Salinas, 2016).

2.4.3. Ensayos Mecánicos en PFC3D

Como bien se ha mencionado en los incisos anteriores, el software con el cual se trabaja, PFC3D3D, tiene la capacidad de realizar ensayos de compresión uniaxial, ensayos de tracción, y ensayos triaxiales convencionales o verdaderos. Para poder realizar alguno de estos ensayos es necesario especificar la geometría de la probeta y partículas, en cuanto a las probetas estas pueden ser cilíndricas o prismáticas, como se ve en la Figura 2.23 respectivamente. Las especificaciones geométricas y de las partículas se especificarán más adelante en este documento, en la sección de Análisis y Resultados.

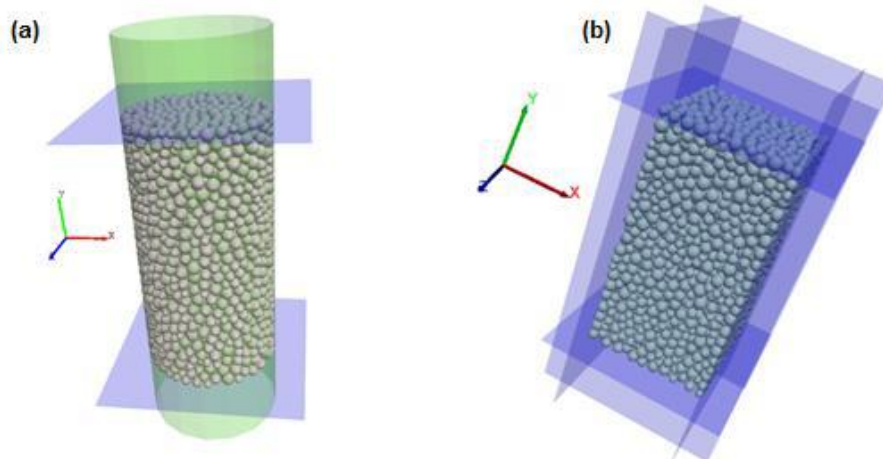


Figura 2.23: (a) geometría de una probeta cilíndrica de diámetro 50 [mm] y alto de 100 [mm]. (b) Geometría de una probeta prismática de dimensiones 19x19x38 [mm] (Arteaga, 2015).

Mientras que, por otro lado, cuando ya se tiene establecido la geometría del modelo y las partículas de este, se deben establecer como se aplicaran las deformaciones al momento de aplicar los esfuerzos provenientes de los ensayos. En PFC3D existen 2 mecanismos para lograrlo: (a) Wall Servo y (b) Full Strain, en donde para el primero se aplican las deformaciones en los extremos de la probeta mediante paredes; y para el segundo mediante la aplicación de un campo de deformaciones sobre todas las partículas con pequeños incrementos (Mas Ivars, 2010), como se ve en la Figura 2.24a, se ve el esquema de ambos métodos, mientras que en la Figura 2.24b se ven los resultados de ambos métodos. Para efectos de este trabajo, se busca asemejarse lo más posible a los ensayos de laboratorio, con lo cual se trabajará con el Wall Servo (Arteaga, 2015).

Finalmente, mediante estos ensayos ya mencionados, sumado a la calibración de los modelos ya mencionados, se busca replicar el comportamiento de la roca deseada, que se verá más en detalle en la sección de Análisis y Resultados.

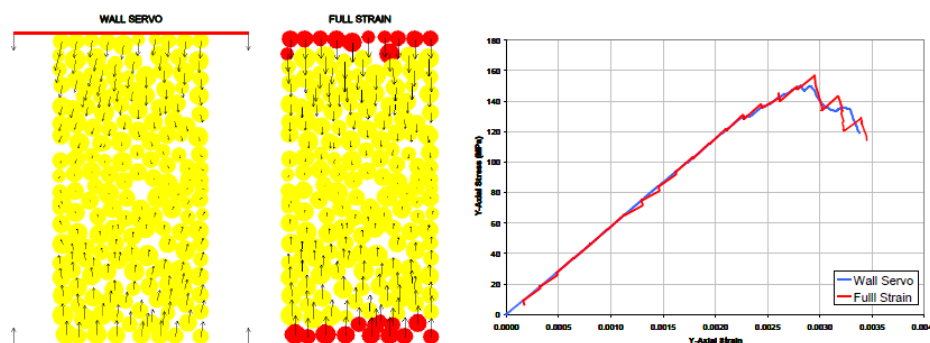


Figura 2.24: (a) Diferentes formas de aplicación de esfuerzos. (b) Curvas Esfuerzo-Deformación obtenidas con ambos métodos. (Mas Ivars, 2010).

- Ensayos de Compresión

Como se explicó anteriormente, el método del Wall Servo será el utilizado para aplicar las tasas de deformación sobre las muestras de roca creadas, en donde como bien se dijo, las fuerzas se aplicarán mediante paredes arriba y debajo de la muestra, mientras que, para el ensayo triaxial, se usan las paredes laterales para mantener el esfuerzo.

Durante la realización del ensayo, este se puede dividir en 2 etapas, la primera consiste en aplicar un esfuerzo axial y un confinamiento objetivo (el confinamiento para el ensayo de compresión uniaxial es 0), los cuales serán controlados mediante un mecanismo de servo control. Una vez alcanzados los esfuerzos objetivos, ambas paredes se mueven hacia la otra a una velocidad constante dada por la tasa de deformación (Arteaga, 2015).

- Ensayo de Tracción

Durante el ensayo de tracción la probeta es agarrada desde los extremos y separada lentamente mientras se monitorea la fuerza y desplazamiento axial, los cuales son transformados posteriormente a esfuerzo y deformación, dividiendo por el área de la sección y el largo respectivamente. Para realizar esto, se identifica una pequeña capa de partículas de agarre (grips grain) en los extremos de la probeta, a las cuales se les fijan velocidades en la dirección axial, con el fin de separar la parte inferior de la superior. A estas partículas de agarre no se les permite moverse o girar durante el ensayo, lo cual es equivalente a que las partes superior e inferior estuvieran pegadas a placas rígidas. La velocidad a la cual se mueven estas partículas de agarre depende del parámetro ε_p (Arteaga, 2015).

2.5 Trabajos realizados en PFC3D

En la actualidad se cuentan con distintas publicaciones de trabajos realizados en PFC3D, en donde gran parte de estos fueron realizados con los modelos más antiguos (BPM y EBPM), mientras que con el modelo FCM (más reciente que los otros dos) se han realizado nuevos trabajos en el último tiempo, tales como:

- David Potyondy, (2012): En este estudio se calibro una roca de Aspo Diorita mediante la calibración de los micro parámetros del FCM. Se realizaron ensayos de tracción directa, compresión siempre y triaxiales con confinamiento de 7 [MPa]. Se observan los micro parámetros más influyentes para las macro propiedades de la muestra de roca.
- David Potyondy, (2013): En este estudio se calibro una roca de Arenisca mediante la calibración de los micro parámetros del FCM. Se realizaron ensayos de tracción directa, compresión siempre y triaxiales con confinamiento de 350 [psi] (2.4 [MPa])

- José Salinas, (2016): En este estudio se calibro una roca Lac du Bonet Granite mediante la calibración de los micro parámetros del FCM. Los resultados fueron comparados con otro estudio de la misma roca que utilizo el modelo EBPM demostrando que para la zona post peak el FCM logra una mejor representación.
- Uxia Castro, (2019): En este estudio se calibro una roca Granito Blanco Mera mediante la calibración de los micro parámetros del FCM. Se realizo un análisis de sensibilidad a los micro parámetros para ver su comportamiento en el modelo, demostrando los micro parámetros más influyentes para la respuesta pre peak del modelo.

Por otro lado, el modelo SBM también es más reciente que el BPM y EBPM, aunque su funcionamiento es similar a estos, no se han realizado muchos estudios en este primer modelo con lo cual su entendimiento se basa en:

- Suzuki, (2013): En este estudio se analiza la técnica del SRM (Synthetic Rock Mass), donde se definió una metodología para la calibración del modelo BPM, además, a partir de esta se crea la metodología para la calibración del modelo SBM.
- Arteaga (2015): En este estudio se analizó el comportamiento del modelo BPM para ensayos triaxiales verdaderos a distintos confinamientos, mostrando cuales son las variables que controlan el modelo.

Finalmente, gracias a estos estudios realizados se tiene conocimiento de los micro parámetros que definen los modelos, y como estos afectan la respuesta de las propiedades elásticas y mecánicas de las rocas simuladas. A partir de estos estudios también se genera una metodología de calibración. Se debe tener en cuenta que este trabajo a diferencia de los demás se enfocara en la respuesta post peak de los modelos analizados.

3. Metodología

Para lograr realizar una correcta representación de la roca intacta, y realizar un estudio del comportamiento post peak de esta, se utilizará el software PFC3D3D de ITASCA el cual cuenta con distintos modelos que pueden representar a la roca en cuestión. Los modelos escogidos para este trabajo corresponden al SBM y FCM (explicados en los Incisos 2.4.1 y 2.4.2), los cuales tienen sus propios micro parámetros, y mediante la selección de estos se busca ajustar el comportamiento de roca deseado, logrando obtener el comportamiento esperado de los parámetros del Módulo de Young, la razón de Poisson, y las resistencias a la compresión y tracción similares a los datos experimentales de la roca objetivo. Una vez realizada la calibración, se efectúa el Análisis de Sensibilidad a cada modelo con el fin de observar el comportamiento de la zona post peak ante la variación de micro parámetros ya calibrados, y así poder ver la efectividad de ambos modelos al momento de calibrar la zona post peak. A modo de resumen, en la siguiente Figura se observa un diagrama con los pasos a seguir para esta metodología.

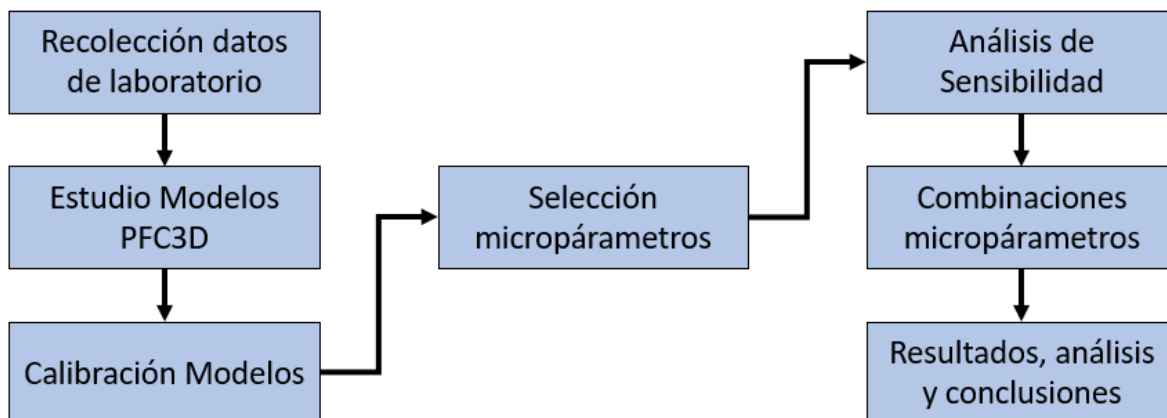


Figura 3.1: Diagrama de resumen de los pasos de la metodología.

3.1. Datos Experimentales

La roca utilizada para el estudio del presente trabajo corresponde a una Andesita. Este tipo de roca posee una baja porosidad, es de alta resistencia, isotrópica casi completa, con elasticidad lineal y homogénea. Se puede afirmar que es una roca frágil de alta resistencia (Chang and Haimson, 2000). La elección de la Andesita se debe a que los trabajos realizados se han enfocado en la representación de rocas tales como el mármol, granito y arenisca (Pollek, 2022). Además, esta roca es una de las más comunes en la cordillera de los andes (Salinas Riveros, 2018).

Para lograr la calibración de los micropárametros de ambos modelos, se debe contar necesariamente con un punto de referencia para poder comparar los resultados. Este punto de comparación corresponde a las propiedades mecánicas

y elásticas de la muestra de roca intacta que se obtienen a partir de ensayos mecánicos realizados en laboratorios, para así poder ir ajustando la calibración hasta que las simulaciones arrojen resultados similares a los obtenidos en los ensayos reales.

La base de datos utilizada para obtener la envolvente de falla se obtiene a partir de una serie de ensayos que se realizaron sobre una muestra de roca intacta de Andesita (Brzovic, 2020), los cuales se pueden ver en la Tabla 3.1 y las curvas de los distintos ensayos triaxiales se observan en la Figura 3.2.

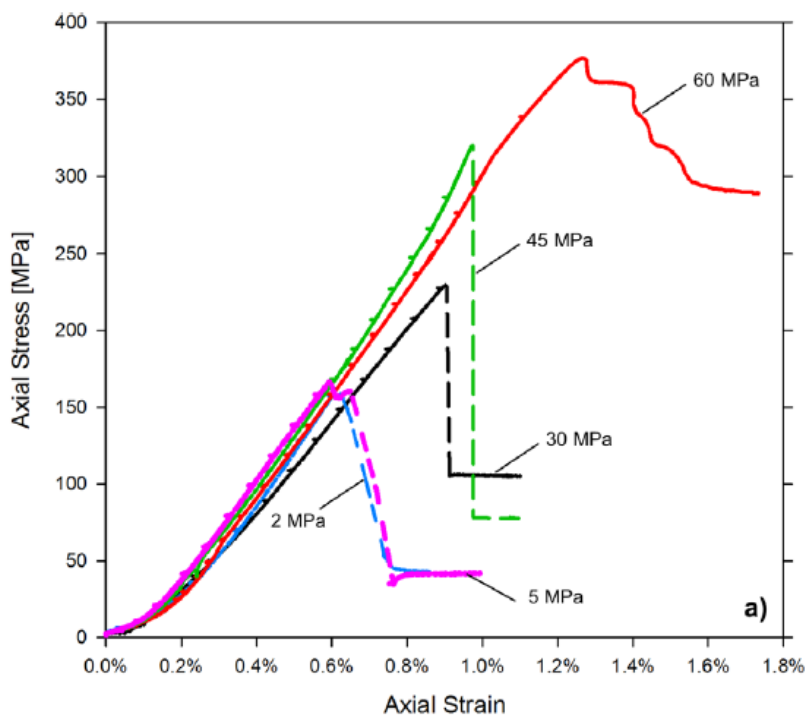


Figura 3.2: Curvas de ensayos triaxiales en roca andesita obtenidos (Brzovic, 2020).

Tabla 3.1: Datos utilizados para crear la envolvente de falla de la roca Andesita (Brzovic, 2020).

Autor	σ_1 [Mpa]	σ_3 [Mpa]
Brzovic (2020)	145.6	0
	162.5	2
	167.5	5
	229.6	30
	320.1	45
	377.1	60

Finalmente, mediante ayuda del software RockLab, se ingresan los datos disponible para ajustar la envolvente según el criterio de Hoek & Brown, como se ven en la Figura 3.3.

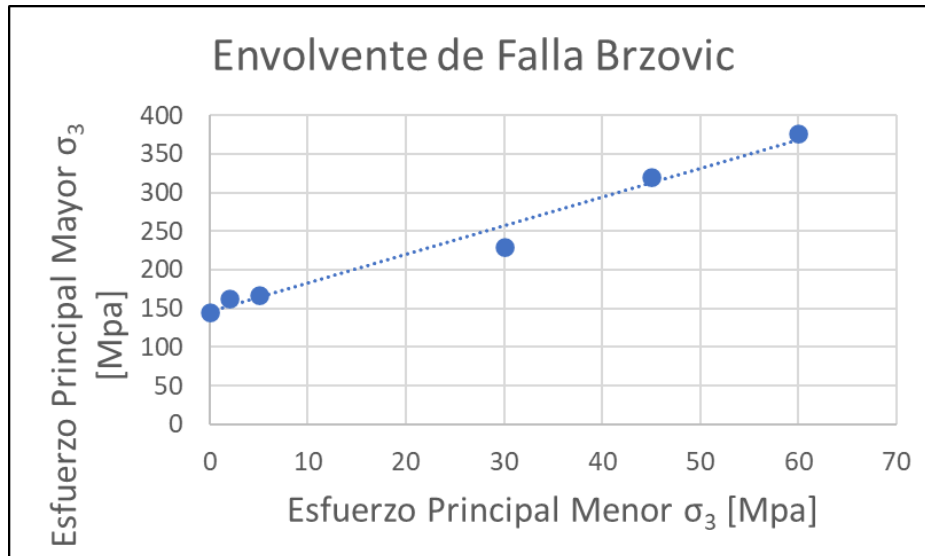


Figura 3.3: Envolvente de Falla para Andesita (Obtenido mediante RocLab).

Además de entregar la envolvente de falla, Roclab entrega los parámetros de resistencia de la roca tanto para el criterio Hoek & Brown, como los de Mohr-Coulomb, como se ve en la Tabla 3.2. Estos parámetros son el punto de partida para calibrar el modelo. Idealmente se busca obtener valores similares de los macroparámetros, para lograr una buena representación.

Tabla 3.2: Parámetros de la envolvente de falla Hoek & Brown (H-C) y Mohr Coulomb (M-C) obtenidas del software Roclab.

Criterio	Parámetros	Valores
H-B	Resistencia a la Tracción [Mpa]	-13.5
	UCS [Mpa]	132.9
	m_i [-]	37.8
M-C	Cohesión [Mpa]	24.7
	Ángulo de Fricción [°]	37.2

Finalmente, de esta misma base de datos se obtienen los parámetros elásticos de la roca (E y ν) y los parámetros mecánicos de la roca (σ_t y σ_{UCS}) a partir de los ensayos de compresión uniaxial realizados, teniendo los resultados que se ven en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Parámetros Mecánicos y Elásticos de la roca obtenidos a partir de la data de Brzovic, 2020.

Macro Parámetros Andesita	Valor
Resistencia a la Compresión Uniaxial [Mpa]	133.0
Coeficiente de Poisson [-]	0.25 ± 0.03
Resistencia a la Tracción [Mpa]	-13.6
Módulo de Young [Gpa]	33.8

3.2. Construcción Modelos

Se comienza a trabajar con modelos existentes, en donde gracias a trabajos previos en PFC3D (Suzuki, 2013; Salinas, 2016) se tiene conocimiento del comportamiento de los micro parámetros de cada modelo y como estos afectan la respuesta de las macro propiedades de la roca (Inciso -716289168.2.5). Por otro lado, se realizan simulaciones de prueba para comprobar estos comportamientos. Finalmente, se presentan las micro propiedades que se usan para controlar los ensayos en PFC3D para ambos modelos.

3.2.1. Tasa de Deformación (ϵ_p)

La tasa de deformación indica la velocidad con la que las placas (Wall Servo o Full Strain) se mueven para aplicar el esfuerzo en los ensayos de roca intacta. La velocidad de las placas está dada por la siguiente ecuación:

$$v_p = \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_p L_0$$

Dónde:

- v_p es la velocidad final de la placa.
- $\dot{\epsilon}_p$ es la tasa de deformación.
- L_0 es la longitud inicial de la probeta.

Entonces, así como en estudios (Suzuki, 2013; Luengo, 2014; Arteaga, 2015; Salinas, 2016), para una probeta de longitud inicial de 100 [mm], se decidió trabajar con un valor de 0,5 para parámetro, esto debido a que disminuye los tiempos de simulación, y entrega resultados coherentes con respecto a los experimentales, por lo que se decidió trabajar con el mismo valor tanto para el SBM y FCM.

En la Figura 3.4 se ve el comportamiento de un ensayo de compresión en el cual se varia la tasa de deformación, en donde se aprecia que para valores distintos de 0.5 se ven anomalías en el comportamiento, sustentando la elección del valor de 0.5 para este parámetro (Arteaga, 2015).

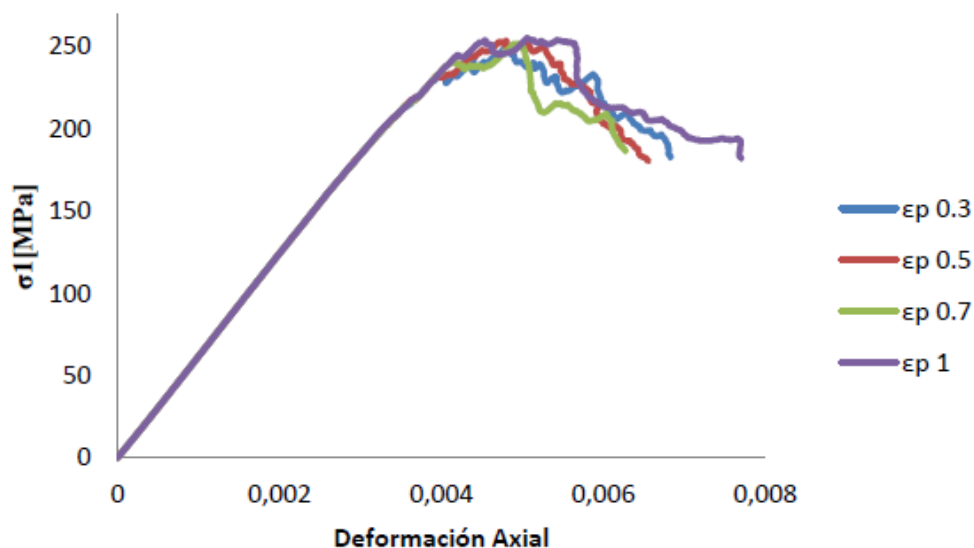


Figura 3.4: Curvas esfuerzo deformación para distintos valores de tasa de deformación (Arteaga, 2015).

3.2.2. Resolución

La resolución es una razón geométrica que corresponde al número de partículas que están contenidas en el diámetro de la probeta sintética, con el objetivo de cuantificar el número de partículas que están en la muestra, esto se observa en la Figura 3.5 que se ve a continuación.

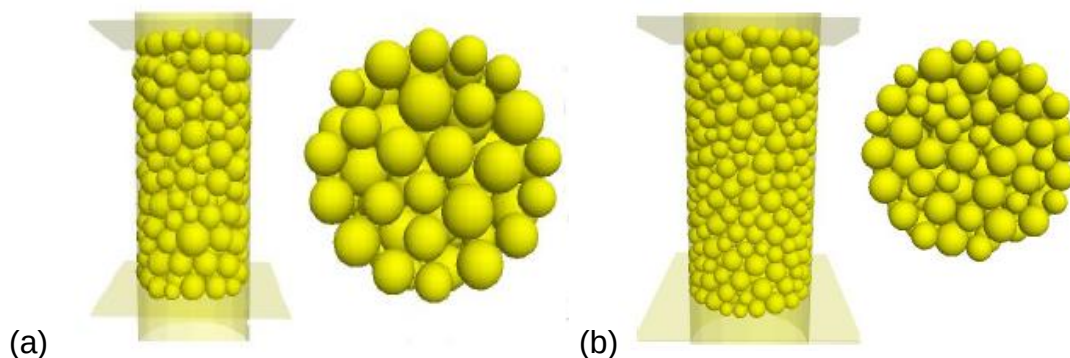


Figura 3.5: (a) Resolución de 7 partículas. Diámetro probeta 50 [mm], altura 100 [mm]; (b) Resolución de 9 partículas. Diámetro probeta 50 [mm], altura 100 [mm] (Luengo 2014).

PFC3D permite una resolución mínima de 5 partículas contenidas en el diámetro de la probeta; en cambio, no existe una resolución máxima de partículas. Un alto número de partículas genera un aumento en la duración de las simulaciones, pero permite representar de mejor manera la roca intacta en estudio (Salinas, 2016).

La resolución es determinada por el diámetro de la probeta, el radio mínimo de partículas y la relación entre radio máximo y mínimo. El diámetro de las partículas satisface una distribución uniforme dentro de los rangos $[D_{min}, D_{max}]$, (Potyondy and Cundall 2004).

Para determinar se ingresa el diámetro promedio de las partículas que satisfacen la resolución requerida. En la ecuación siguiente se detallan las expresiones utilizadas:

$$R_{min} = \frac{D_{promedio\ partículas}}{1 + \left(\frac{D_{max}}{D_{min}}\right)} \quad R_{max} = \left(\frac{D_{max}}{D_{min}}\right) * R_{min}$$

En PFC3D, el UCS y módulo de Young incrementa a medida que la resolución aumenta, en cambio la resistencia a la tracción directa disminuye. La razón de Poisson no se ve afectada al variar el número de partículas contenidas en el diámetro, (Mas Ivars 2010).

Con respecto al valor utilizado, se tiene que Arteaga, 2015 realizó un estudio en donde se ve el comportamiento pre peak del modelo variando la resolución de las partículas cuyos resultados se observan en la Figura 3.6.

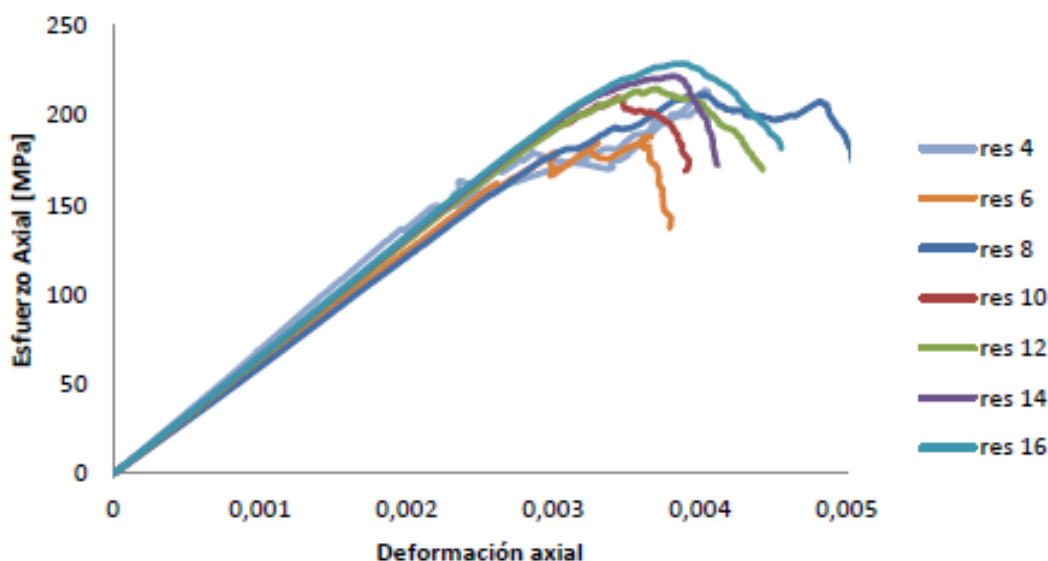


Figura 3.6: Curvas esfuerzo deformación para distintos valores de resolución (Arteaga, 2015).

En la figura anterior se observan los resultados obtenidos por Arteaga (2015), donde se enfoca en el comportamiento pre peak del modelo, utilizando un valor de 12 para la resolución

3.2.3. Razón Diámetro Máx y Mín de Partículas (R_{min}/R_{max})

Durante la revisión bibliográfica realizada anteriormente, se define esta razón con un valor de 1,66, de manera de aportar una representación frágil a la roca, esto

según estudios realizados por diversos autores (D. Potyondy & Cundall, 2004; Mas Ivars, 2010; Luengo 2014 y Salinas 2016).

3.2.4. Multiplicador de Radios (λ)

Este parámetro es aquel que le da cierto largo al contacto entre las partículas, es decir que extiende el radio real de la partícula generando con este nuevo espacio una especie de zona de influencia, en donde, si existe alguna interacción posible que hacer en esta zona, esta se realizara. Este parámetro presenta la siguiente ecuación.

$$\bar{R} = \lambda \min(R^{(A)}, R^{(B)})$$

El valor utilizado para este parámetro es igual a 1, por lo que el radio del contacto equivaldrá a radio de la partícula más pequeña que comparte el SBM y el FCM.

3.3. Obtención Macro Parámetros

Como se ha mencionado, los modelos están calibrados cuando son capaces de representar el comportamiento una roca replicando la respuesta de las propiedades mecánicas y elásticas de esta, con lo cual, la medición de las macro propiedades en el software es fundamental para lograr la calibración. El software puede medir deformaciones de 3 maneras:

- 1) Mediciones hechas en las paredes superiores e inferiores que ejercen las deformaciones y esfuerzos durante el ensayo.
- 2) Mediciones realizadas en partículas al interior de la probeta (gauge balls).
- 3) Mediante esferas de medición, las cuales consisten en esferas ficticias al interior de la probeta, en las cuales se monitorean todas las partículas dentro de estas y se obtiene un promedio de ellas (Figura 3.7).

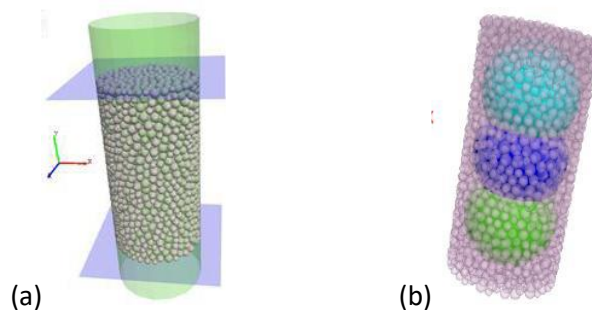


Figura 3.7: (a) Paredes ficticias que miden esfuerzo y deformación. (b) Esferas de medición usadas en PFC3D3D (Arteaga, 2015).

Se tiene que estas 3 mediciones otorgan valores similares, sin embargo, se utilizara la medición en las paredes dado que es lo que más se asemeja a los ensayos de laboratorio (Arteaga, 2015).

Finalmente, mediante el código utilizado en PFC3D, las propiedades mecánicas y elásticas son obtenidas como se menciona en el Inciso 2.2.5. Estos valores se calculan entre el inicio de los ensayos y el valor en donde se alcanza el 25% del esfuerzo peak, lo cual corresponde a la parte lineal de la curva, como se observa en la Figura 3.8:

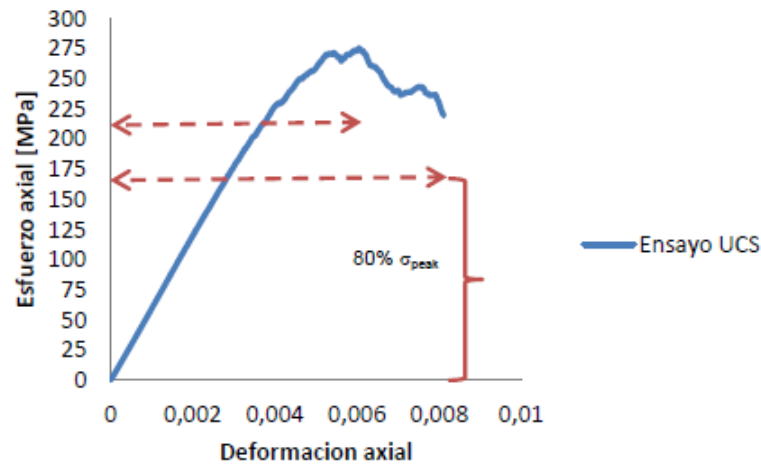


Figura 3.8: Ejemplo de criterio de término en un ensayo (Arteaga, 2015).

Para este caso el criterio de término usado corresponde a terminar cuando haya alcanzado un esfuerzo igual a 80% del peak, es decir, si el peak fue alcanzado en 275 [MPa], el ensayo terminara cuando el esfuerzo post peak sea 220 [MPa].

Ahora bien, en el caso de los valores post peak, como el Módulo Residual, se tiene el código utilizado en PFC3D no puede calcular directamente este valor, con lo cual este es calculado realizando una regresión lineal entre el valor máximo y el ultimo (Arteaga, 2015). Entonces, para la medición de este parámetro, se necesitan seleccionar los resultados de las simulaciones de ambos modelos en su post peak lo cual se realiza en la parte lineal de esta (al igual que el módulo de Young pre peak), aplicando después la misma ecuación que para el módulo de Young pre peak, como se aprecia en la Figura 3.9.

Cabe destacar que en la sección del post peak no siempre se obtiene un resultado perfectamente lineal, lo cual implica que en ocasiones se obtendrán resultados gráficos que no se asemejen a la siguiente figura.

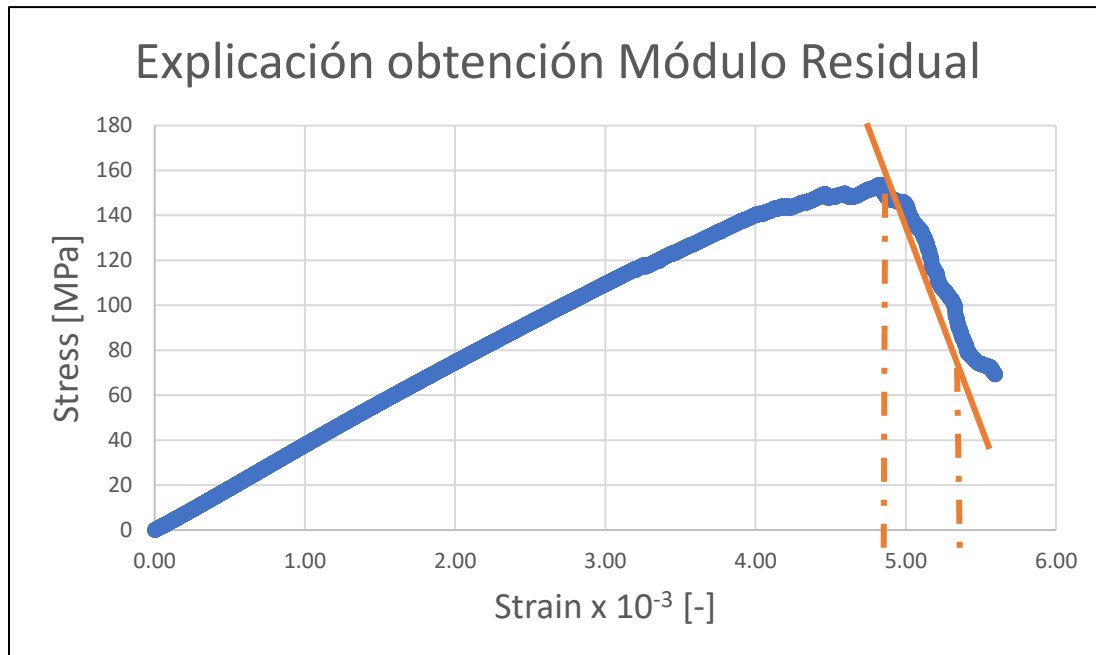


Figura 3.9: Gráfica explicativa de obtención del valor del Módulo Residual.

3.4. Estudio comportamiento Post Peak

Con el fin de comprender mejor los modelos, se realiza un estudio con el fin de encontrar las micro propiedades que más afectan al comportamiento post peak de los modelos, además de comprobar las influencias de los micro parámetros en el pre peak postulados en los trabajos anteriores (Inciso -716289168.2.5). Esto último se comprueba y se procede a realizar un plan metodológico para la calibración de los modelos. Cabe destacar que esta parte del estudio fue realizada con los micro parámetro sin calibrar.

Por otro lado, se cuantifica el efecto que tiene la variación de los micro parámetros en el módulo residual, para luego seleccionar los más influyentes y realizar un posterior análisis de sensibilidad de estas a cada modelo. Cabe destacar que esto aplica al modelo FCM, ya que para el modelo SBM, se seleccionan los factores de ablandamiento y ablandamiento de tracción (soft y cut respectivamente) debido a que son únicos en este modelo (Inciso 2.4.1), y los otros dos micro parámetros restantes se seleccionan según su influencia en comportamiento post peak. Los resultados de dicho estudio se observan en el ANEXO.

3.5. Calibración Modelos

Para la calibración de ambos modelos, se tomó en cuenta los trabajos anteriores realizados en PFC3D (Suzuki, 2013; Salinas, 2016) (Inciso -716289168.2.5), en donde fueron explicados que micro parámetros afectan a cada propiedad elástica y mecánica de la roca, con esto, se generan metodologías de

calibración (basadas en dichos trabajos) para la zona pre peak de cada modelo las cuales se observan en las Figura 3.10 y Figura 3.11.

Como se verá a continuación, se tiene que el orden de calibración es de gran importancia para lograr el objetivo, ya que estos modelos son multivariables. Lo cual significa que al variar un micro parámetro puede afectar a varios macro parámetros, retrocediendo así en las calibraciones ya logradas de las distintas propiedades. Además, cabe destacar que la calibración es realizada para el comportamiento pre peak de la muestra, y el estudio de sensibilidad posterior se enfocara en el post peak.

3.5.1. SBM

Este modelo es una variación del modelo EBPM, con lo cual su calibración sigue un procedimiento similar. Durante la investigación se encontraron metodologías de calibración para el modelo EBPM (Suzuki, 2013; Luengo, 2014; Arteaga, 2015), finalmente, se realiza una metodología similar a las propuestas para el modelo SBM como se observa en la Figura 3.10.

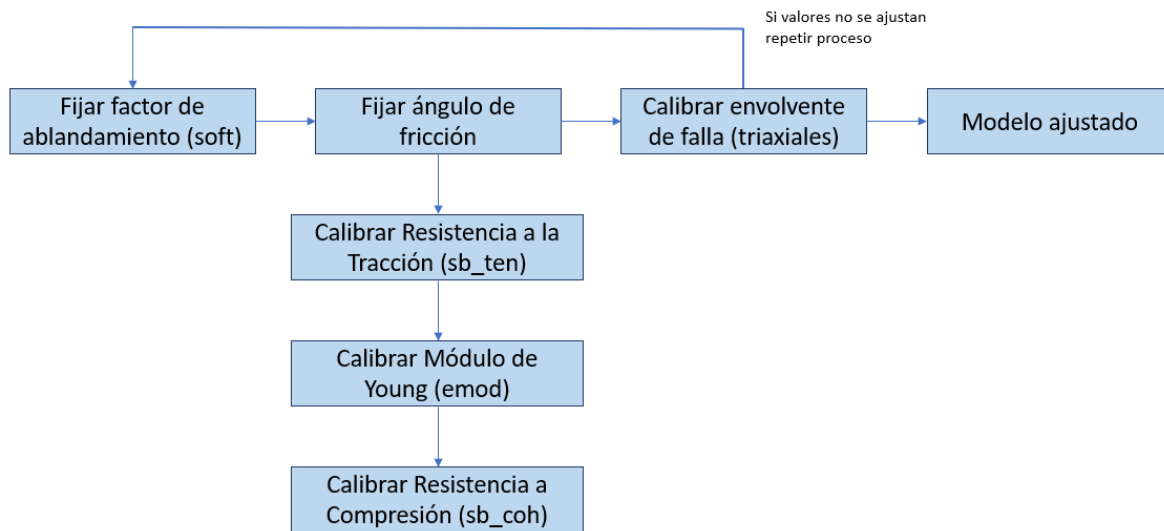


Figura 3.10: Diagrama de calibración de micro parámetros SBM en PFC3D.

La Figura anterior muestra el diagrama de pasos que se deben seguir para lograr la calibración de la roca, la cual consiste en los siguientes pasos:

1. Se debe fijar un factor de ablandamiento distinto de cero.
2. Se fija un valor de cut igual a 0,5.
3. Se fija un valor de kratio de 1,5.
4. Se debe fijar un ángulo de fricción igual a cero en un inicio (sb_fa).
5. Se calibra la Resistencia a la Tracción mediante el micro parámetro sb_ten y viendo la respuesta en los ensayos de tracción.
6. Se calibra el Módulo de Young mediante el micro parámetro emod y viendo la respuesta en los ensayos de compresión uniaxial.

7. Se calibra la Resistencia a la Compresión mediante el micro parámetro sb_coh y viendo la respuesta en los ensayos de compresión uniaxial.
8. Se calibra la Envolvente de Falla mediante el micro parámetro sb_fa y viendo su respuesta en los ensayos de compresión triaxiales.

Otra observación importante es que no se calibra la razón Poisson ya que no es posible calibrar de forma simultánea la razón de Poisson con las demás variables y al mismo tiempo tener el comportamiento deseado para la roca a calibrar (Potyondy and Cundall 2004). Esto debido a la similitud del modelo SBM con el modelo EBPM como se mencionó en el Inciso 2.4.1, por otro lado, Arteaga, (2015), realizó el estudio de la variable $kratio$, en donde a medida que la razón de Poisson se ajusta, la roca toma un comportamiento demasiado dúctil, impidiendo la calibración de los demás parámetros. Con lo cual, la razón de rigideces (k_ratio) del SBM tendrá un valor de 1,5.

3.5.2. FCM

En el caso de este modelo, sus micro parámetros se observan en las Tabla 2.3 y Tabla 2.4, en donde ese modelo es “propio”, es decir que no fue creado modificando otro modelo (como BPM, EBPM y SBM), con lo cual presenta otros micro parámetros en comparación al SBM. Para este caso, si se tiene metodologías claras, con lo cual la calibración de este modelo sigue estas recomendaciones (Salinas, 2016; Castro, 2019), la cual se observa en la Figura 3.11.

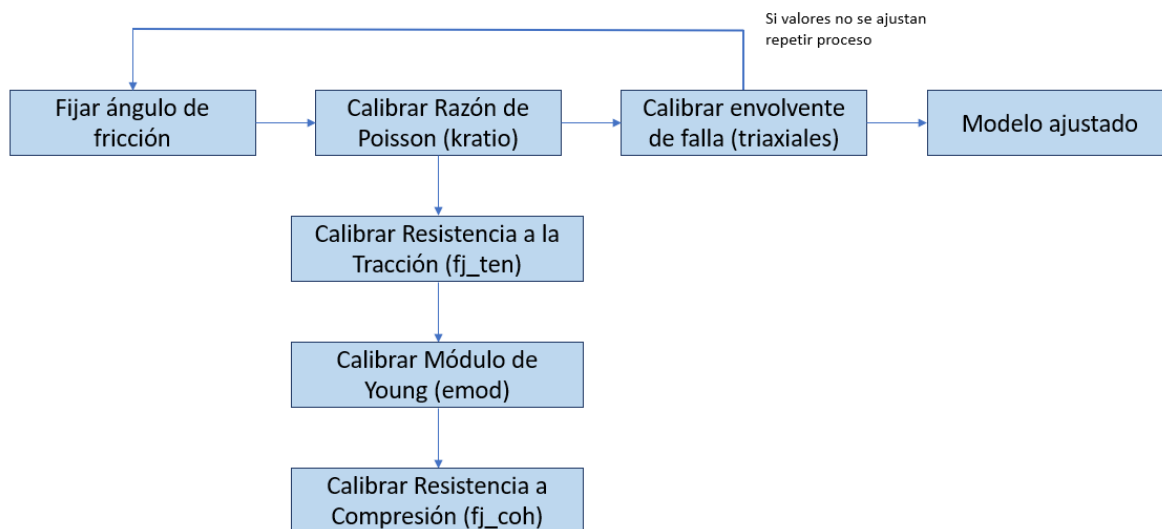


Figura 3.11: Diagrama de calibración de micro parámetros FCM en PFC3D.

La Figura anterior muestra el diagrama de pasos que se deben seguir para lograr la calibración de la roca, la cual consiste en los siguientes pasos:

1. Se debe fijar un ángulo de fricción igual a cero en un inicio (fj_fa).
2. Se calibra la Razón de Poisson mediante el micro parámetro $kratio$ y viendo la respuesta en los ensayos de compresión uniaxial.

3. Se calibra la Resistencia a la Tracción mediante el micro parámetro fj_ten y viendo la respuesta en los ensayos de tracción.
4. Se calibra el Módulo de Young mediante el micro parámetro $emod$ y viendo la respuesta en los ensayos de compresión uniaxial.
5. Se calibra la Resistencia a la Compresión mediante el micro parámetro fj_coh y viendo la respuesta en los ensayos de compresión uniaxial.
6. Se calibra la Envolvente de Falla mediante el micro parámetro fj_fa y viendo su respuesta en los ensayos de compresión triaxiales.

3.6. Análisis de Sensibilidad y Combinaciones

Posterior a la calibración de los modelos, se realiza un análisis de sensibilidad de los micro parámetros más influyentes en el comportamiento post peak encontrados en el Estudio Previo del comportamiento Post Peak (Inciso 3.4). A partir de este estudio, se seleccionan 4 variables por modelos las cuales son las que más afecten la respuesta post peak de los modelos, los cuales se observan en la Tabla 3.4. Los resultados obtenidos de este estudio se observan en el ANEXO.

Luego, los micro parámetros seleccionados se les realiza un análisis de sensibilidad para ver el comportamiento post peak del modelo con los parámetros calibrados junto a la variación que sufren las propiedades pre peak de la roca. Por otro lado, los micro parámetro seleccionado se combinarán entre ellos en sus valores extremos para analizar el grado de interacción de estos. Finalmente, se busca concluir al respecto del comportamiento del módulo post peak de ambos modelos para corroborar el cumplimiento del objetivo. Los micro parámetros seleccionados corresponden a los siguientes para cada modelo:

Tabla 3.4: Micro parámetros seleccionados para el análisis de sensibilidad enfocado en el post peak y para las combinaciones para ver la interacción de estos parámetros.

SBM	Soft	FCM	kratio
	Cut		fricb
	kratio		fj_fric
	sb_mcf		Emod

La elección de los parámetros depende de cada modelo, en el caso del SBM la elección de 2 parámetros (soft y cut) fue debido a que estos 2 parámetros son únicos del modelo. Por otro lado, el micro parámetro sb_mcf o factor de contribución del momento, junto con el $kratio$ o razón de rigideces del modelo SBM, se seleccionan debido a su influencia en el comportamiento post peak.

En el caso del FCM, los micro parámetros fueron seleccionados debido a que están dentro de los parámetros analizados, estos son los más influyentes para el comportamiento post peak modelo.

Como se mencionó anteriormente, se combinará cada valor extremo de los micro parámetros seleccionados, para luego mediante la técnica de análisis

estadístico de la Gráfica de Interacción ver la interacción de ambos parámetros para buscar alguno que solo modifique el módulo residual. Esta técnica consiste en evaluar la propiedad objetivo, en el eje Y, con la combinación de 2 micro parámetros, en este caso se evalúa uno en el eje X evaluando el punto según su combinación.

"Las líneas paralelas en una gráfica de interacción indican que no hay interacción. Mientras mayor sea la diferencia en la pendiente entre las líneas, mayor será el grado de interacción. Sin embargo, la gráfica de interacción no avisa si la interacción es estadísticamente significativa." Este efecto de interacción indica que la relación entre dos variables depende del valor de una tercera. Que intercepten no significan que se correlacionen, son conceptos distintos (MiniTab, 2023).

Finalmente, de las gráficas de combinaciones obtenidas, la interacción que sufren los micro parámetro pueden ser (Frías-navarro & Pascual-Soler, 2022):

- (i) No ordinal: Cuando el orden de superioridad entre los factores se cambia, no manteniéndose constante, es decir interactúan.
- (ii) Ordinal positiva: Cuando se observa un crecimiento en el grupo mayor y una disminución en el menor, hay cierto grado de interacción.
- (iii) Ordinal negativa: Cuando se produce un acercamiento entre los factores, lo contrario al ordinal positivo, existe un grado de interacción.
- (iv) Mixta: Cuando se comporta como ordinal, pero sus puntos están casi cruzados, existe interacción.
- (v) No Lineal: No existe interacción.
- (vi) Paralelas: conformado cuando las rectas obtenidas son paralelas, no existe interacción.

En la Figura 3.12 se pueden observar la forma de los gráficos que se pueden obtener de los gráficos de interacción.

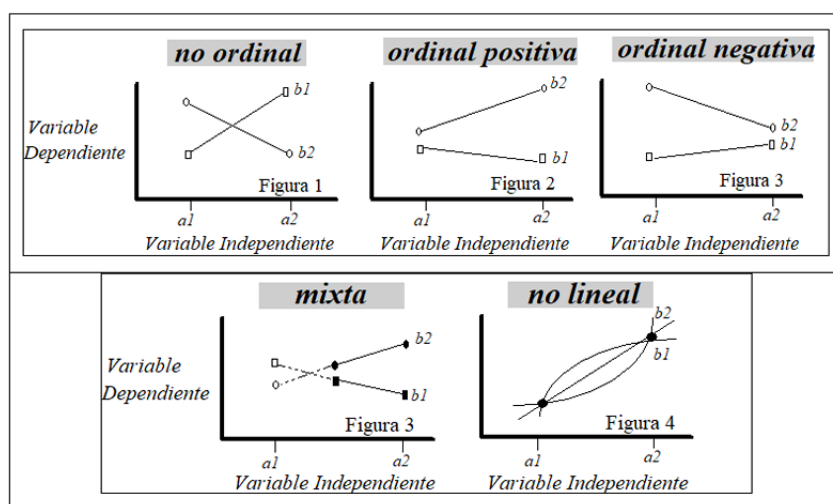


Figura 3.12: Tipos de gráficas que se pueden obtener del gráfico de interacción (Navarro & Soler, 2022).

4. Resultados y Análisis

En el siguiente capítulo se presentan los resultados de las calibraciones que se obtienen a partir de ambos modelos SBM y FCM junto con los resultados del análisis de sensibilidad realizado a los micropárametros de ambos modelos, como también la comparativa de los modelos con los datos experimentales. Primero se realiza la calibración de los micro parámetros, para lo cual mediante un caso base con sus respectivos micro parámetros, como se ven en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2.

Tabla 4.1: Micro parámetros del caso base del modelo SBM.

Simbología	Descripción SBM	Valor Inicial
Empaquetamiento		
R_{rat}	Razón de Radios (Max/min) [-]	1.66
R_{es}	Resolución [-]	10
ϵ_p	Tasa de Deformación [-]	0.5
λ	Multiplicador de Radios [-]	1
Propiedades Partículas		
ρ	Densidad [kg/m ³]	2800
E_{ba}/E_{FCM}	Razón Módulos Deformación [-]	1.5
E_{ba}	Módulo de Young Partículas [Mpa]	150.0
μ	Coeficiente de Fricción [-]	0.5
$kratio$	Razón de Rigideces Normales y Corte [-]	2.5
Propiedades SBM		
E_{FCM}	Módulo de Young Contactos [Mpa]	100.0
$kratio$	Razón de Rigideces Normales y Corte [-]	1.5
sb_ten	Esfuerzo Normal Promedio [Mpa]	50
sb_coh	Cohesión Promedio [Mpa]	150
sb_fa	Ángulo de Fricción [°]	32
$soft$	Factor de Ablandamiento [-]	20
cut	Factor de Ablandamiento por Res. A la tracción [-]	0.5

Tabla 4.2: Micro parámetros del caso base del modelo FCM.

Simbología	Descripción FCM	Valor Inicial
Empaquetamiento		
R_{rat}	Razón de Radios (max/min) [-]	1.66
Res	Resolución [-]	10
ε_p	Tasa de Deformación [-]	0.5
λ	Multiplicador de Radios [-]	1
Propiedades Partículas		
ρ	Densidad [kg/m ³]	2800
E_{ba}/E_{FCM}	Razón Módulos Deformación [-]	1.5
E_{ba}	Módulo de Young Partículas [Mpa]	75.0
μ	Coeficiente de Fricción [-]	0.5
$kratio$	Razón de Rigideces Normales y Corte [-]	2.5
Propiedades FCM		
E_{FCM}	Módulo de Young Contactos [Mpa]	50.0
$kratio$	Razón de Rigideces Normales y Corte [-]	2.5
fj_ten	Esfuerzo Normal Promedio [Mpa]	25.0
fj_coh	Cohesión Promedio [Mpa]	100.0
fj_fa	Ángulo de Fricción	0

Finalmente, a partir de cada caso base de cada modelo, se comienza el proceso de calibración para el modelo SBM y FCM.

4.1. Calibración Macro Parámetros

Como se mencionó anteriormente, se tienen los pasos a seguir para lograr la calibración de los macro parámetros de la roca, y se indicara la variación y selección de los micro parámetros utilizados para configurar el modelo. Como este trabajo es una comparativa entre 2 modelos y ambos tiene micro parámetros que son iguales para las partículas de ambos modelos, como lo son el multiplicador de radios (λ), la densidad del material (ρ), la razón entre el diámetro máximo y mínimo de las partículas (R_{max}/R_{min}), la razón entre el módulo de deformación de las partículas y el de los contactos ($emodb/emod$) y la tasa de deformación (ε_p). Los cuales, para este estudio, serán valores iguales para ambos modelos, los cuales serán explicados a continuación. Por otro lado, también se presenta la calibración de los macro parámetros de cada modelo.

4.1.1. Construcción Modelo

Corresponden a los parámetros que serán constantes en ambos modelos, principalmente consisten en valores que caracterizan a la roca, cómo lo es su densidad y su coeficiente de fricción, además de la definición de los parámetros que constituyen las partículas menores que contiene la muestra de roca.

- Geometría Modelo

Para representar un modelo de roca intacta, primero se deben establecer las geometrías que conformaran la probeta, es decir su radio y su altura, para los cuales se replican los mismos valores utilizados en los ensayos experimentales (Turischev, 2016), los cuales se ven en Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Geometría de los ensayos experimentales y simulados.

Geometría	Valor
Radio [mm]	50
Altura [mm]	125

- Densidad del Material (ρ)

Este parámetro, si bien no afecta la respuesta de los ensayos, se ingresa de manera de ser consistentes con el tipo de roca que se está ensayando. El valor utilizado es el de una Andesita típica igual a 2800 [gr/cm³].

- Coeficiente de Fricción (μ)

Para el coeficiente de fricción, al igual que los parámetros anteriores, este posee un valor determinado por ITASCA. El valor de este parámetro va a cambiar dependiendo de la forma en que se generen las deformaciones en los ensayos. Si la aplicación del esfuerzo es mediante Wall Servo, el valor de este factor es de 0.5, mientras que si es por Full Strain es de 2.5 (Salinas, 2016).

En la Tabla 4.4 se observa el resumen de las variables usadas.

Tabla 4.4: Valores iniciales de empaquetamiento para modelos SBM y FCM.

Simbología	Descripción FCM	Valor Inicial
R _{rat}	Razón de Radios (máx/min) [-]	1.66
Res	Resolución [-]	10
ϵ_p	Tasa de Deformación [-]	0.5
λ	Multiplicador de Radios [-]	1
ρ	Densidad [kg/m ³]	2800
μ	Coeficiente de Fricción [-]	0.5

- Parámetros Únicos SBM

Con respecto al modelo SBM, como fue mencionado en el Inciso 2.4.1, presenta parámetros únicos dentro de sí, los cuales están representados por los factores de ablandamiento y reblandecimiento de la tracción (soft y cut respectivamente). Para dichos micro parámetros se tienen pocos estudios, con lo cual se sigue el ejemplo mencionado anteriormente de ITASCA, en los cuales, si se toman valores de 0 y 1 respectivamente, el modelo se comporta como un EBPM, con lo cual para el parámetro soft se escoge un valor distinto de cero, y en este caso se escoge un valor 0.5 para el cut (ITASCA, 2023). Este último ya que es el punto

intermedio de los dos valores extremos, con lo cual en el Análisis de Sensibilidad se verá su comportamiento.

Para el caso del soft, se tiene que este valor afecta principalmente a σ_{UCS} , en donde limita este resultado hasta cierto valor, y para seguir aumentando esta propiedad mecánica se debe aumentar el valor de soft, lo cual se verá más adelante en el Análisis de Sensibilidad. Finalmente, dentro de la prueba y error se fija un valor de 40 para el soft.

Para el caso del factor de contribución del momento (sb_mcf), como se mencionó en el Inciso 2.4.1, se tiene que el modelo EBPM lo toma como 0, lo cual es cuestionable (Suzuki, 2013). Mientras que, con un valor de 1, el modelo no alcanza a llegar a los valores objetivos de las propiedades de la roca, con lo cual se escoge un valor intermedio de 0,5; además, así se evita el problema de la ausencia de la falla por corte en los ensayos de compresión

- **Parámetros Únicos FCM**

En el caso del modelo FCM, en donde igualmente fue mencionado en el Inciso 2.4.2, se tiene que poseen un par de micro parámetros únicos, en este caso corresponden a la discretización que se forma en el enlace paralelo de las partículas (N_R y N_d). Para dichos valores, se realizó un estudio para ver la influencia de estos valores en los resultados, donde se concluyó que los valores no tenían influencia en los resultados, solo en los tiempos de simulación (Salinas, 2016). Finalmente se escogen los valores predeterminados del modelo.

4.1.2. Calibración SBM

- **Calibración Razón de Poisson**

Como fue mencionado en el Inciso 3.5.1, no es posible calibrar simultáneamente la razón de Poisson con las demás macro propiedades debido a la multivariabilidad del modelo (Potyondy and Cundall 2004). Por otro lado, se sabe que la razón de rigideces (k_{ratio}) controla la fragilidad-ductilidad de la muestra simulada y la elección del valor será de 1,5 para poder representar la fragilidad de la muestra (Arteaga, 2015). Con lo anterior, se obtiene una razón de Poisson de 0,08 para el modelo SBM. En la Tabla 4.5 se observa los resultados del modelo.

Tabla 4.5: Resultados de la razón de Poisson para el modelo SBM junto a su error asociado.

Poisson Laboratorio [-]	Poisson SBM [-]	Error Poisson SBM
0.25	0.08	68.0%

- **Resistencia a la Tracción**

Para el caso de la Resistencia a la tracción, se tiene que el micro parámetro que controla su resultado corresponde al sb_ten (Resistencia a la Tracción). Se

prosigue con la calibración de esta propiedad variando este micro parámetro como se observa en la Tabla 4.6 y Figura 4.1.

Tabla 4.6: Resultados de la calibración de la resistencia a la tracción para el modelo SBM.

Simulación	Micro parámetro sb_ten [Mpa]	Desv. Std. Micro parámetro [Mpa]	Macro parámetro Res. Tracción [Mpa]
1	38.0	7.6	-11.5
2	39.0	7.8	-12.0
3	40.0	8.0	-13.5
4	41.0	8.2	-14.2
5	42.0	8.4	-15.3

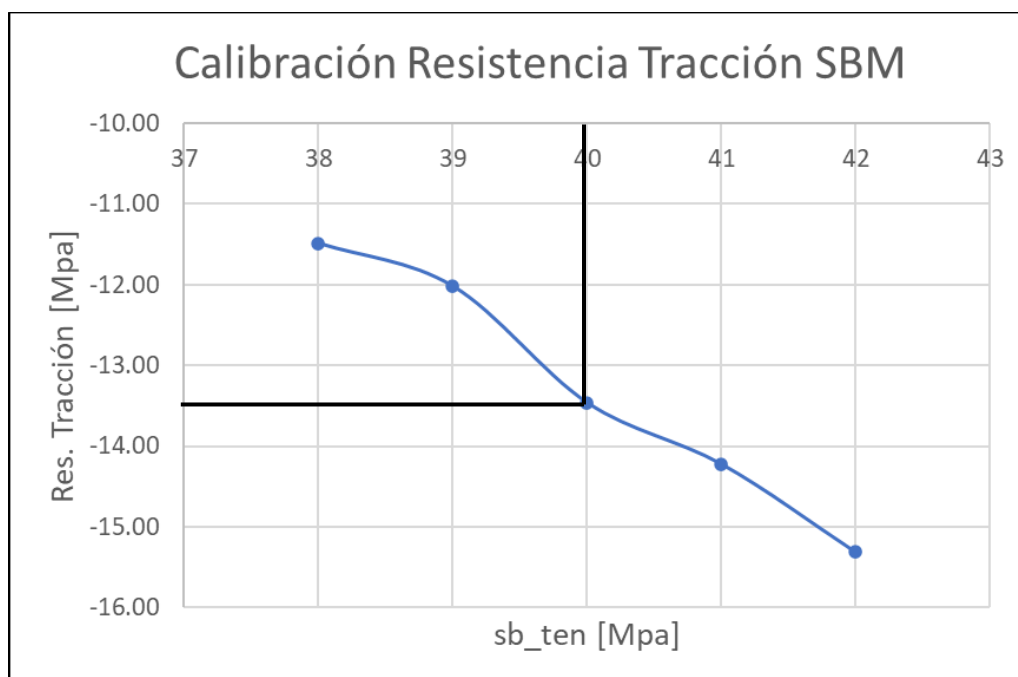


Figura 4.1: Gráfico de resultados de la calibración de la resistencia a la tracción para el modelo SBM.

Se observa en la figura y tabla anterior, con las razón de rigideces (kratio) fijada en 1.5 para el modelo SBM, se comienza el análisis con ensayos de tracción directa. Para esto se analizó la respuesta del ensayo para valores del micro parámetro sb_ten entre 38 [MPa] y 42 [MPa] para este modelo. De esta manera se logra obtener un valor simulado de la resistencia a la tracción de la roca de -13.5 [MPa] usando un valor de sb_ten de 40 [MPa] para el modelo SBM.

Finalmente, en la Tabla 4.7, se observa los resultados del modelo para la resistencia a la tracción.

Tabla 4.7: Resultados finales de la resistencia a la tracción del modelo SBM.

Res. Tracción Laboratorio [-]	Res. Tracción SBM [-]	Error Res. Tracción SBM
-13.6	-13.5	0.3%

- Módulo de Young

Para el caso del módulo de Young, gracias a los trabajos anteriores (Suzuki, 2013; Arteaga, 2015), se sabe que los micro parámetros que controlan esta propiedad elástica corresponden a la razón de rigideces del SBM (kratio) y al módulo de Young de las partículas y contacto (emod y emodb); en donde como el kratio está definido, le corresponde al segundo poder ajustar el valor del módulo de Young, en donde, como se mencionó anteriormente en el Inciso 3.5, se recomienda de estudios hechos anteriormente que la razón entre el módulo de Young de las partículas y el de los contactos debe tener un valor de 1.5 para poder replicar un comportamiento frágil de la roca (Potyondy & Cundall, 2004).

Finalmente, en la Tabla 4.8 y Figura 4.2 se puede observar los resultados de las simulaciones y su efecto en el módulo de Young.

Tabla 4.8: Resultados de la calibración del módulo de Young para el modelo SBM.

Nº	Micro parámetro Mod. Young Contactos [Gpa]	Micro parámetro Mod. Young Contactos [Gpa]	Macro parámetro Módulo de Young [Gpa]
1	138	207.0	30.7
2	139	208.5	32.0
3	140	210.0	33.5
4	141	211.5	36.7
5	142	213.0	37.5

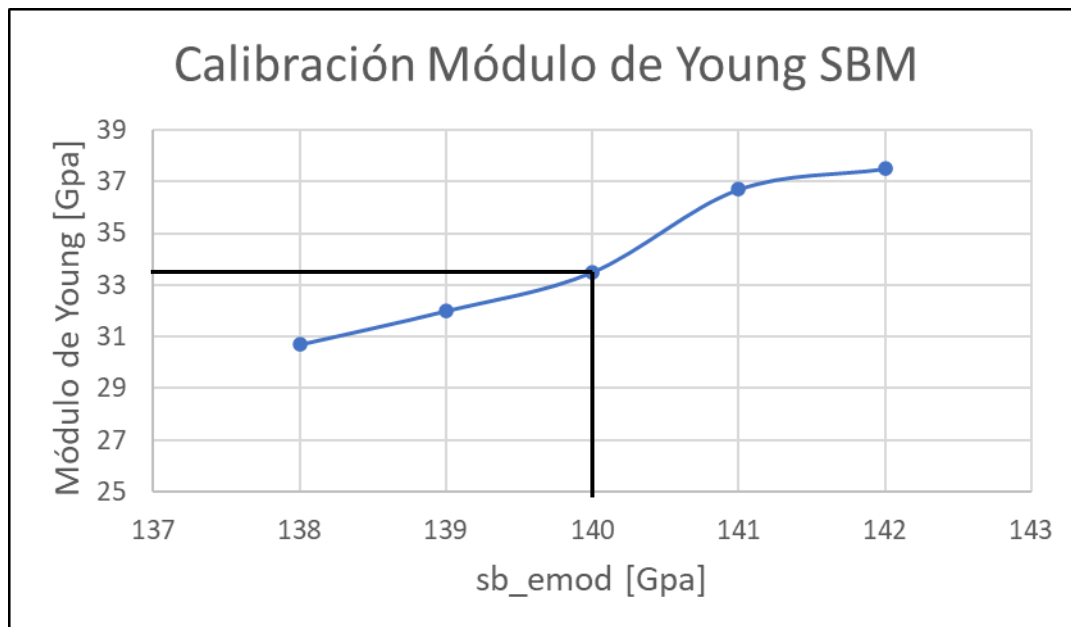


Figura 4.2: Gráfico de resultados de la calibración del módulo de Young para el modelo SBM.

Se observa en la figura y tabla anterior, con las razón de rigideces y resistencia a la tracción ya fijadas para el modelo SBM, se vuelve al análisis con ensayos de compresión. Para este análisis se varió el parámetro sb_emod con

valores entre 138 [GPa] y 142 [GPa], en donde conforme se aumenta el valor del módulo de Young del micro parámetro, se aumenta el módulo de Young obtenido de la simulación. Finalmente se seleccione un valor de 140 [GPa] para dicho micro parámetro; obteniéndose un valor de 33.5 [GPa] para el modelo FCM.

Finalmente, en la Tabla 4.9, se observa los resultados del modelo para el módulo de Young.

Tabla 4.9: Resultados del módulo de Young para el modelo SBM junto a su error asociado.

Mod. De Young Laboratorio [-]	Mod. De Young SBM [-]	Error Mod. De Young SBM
33.8	33.5	0.9%

- Resistencia a la Compresión Simple

El siguiente ajuste corresponde a la resistencia a la compresión simple. Para ajustar este valor se debe variar el micro parámetro de la cohesión de los contactos (sb_coh) y la resistencia a la tracción de los contactos (sb_ten) (Arteaga, 2015). Se tiene que el segundo micro parámetro mencionado ya se encuentra fijado, con lo cual se varia la cohesión de los contactos para lograr calibrar el UCS.

En la Tabla 4.10 y Figura 4.3 se puede observar los resultados de las simulaciones y su efecto en la resistencia a la compresión simple.

Tabla 4.10: Resultados de calibración de la resistencia a la compresión simple del modelo SBM.

N°	Micro parámetro cohesión contactos [Mpa]	Desv. Std. Micro parámetro [Mpa]	Macro parámetro UCS [Mpa]
1	350	70.0	131.8
2	351	70.2	132.0
3	352	70.4	132.9
4	353	70.6	134.1
5	354	70.8	135.0

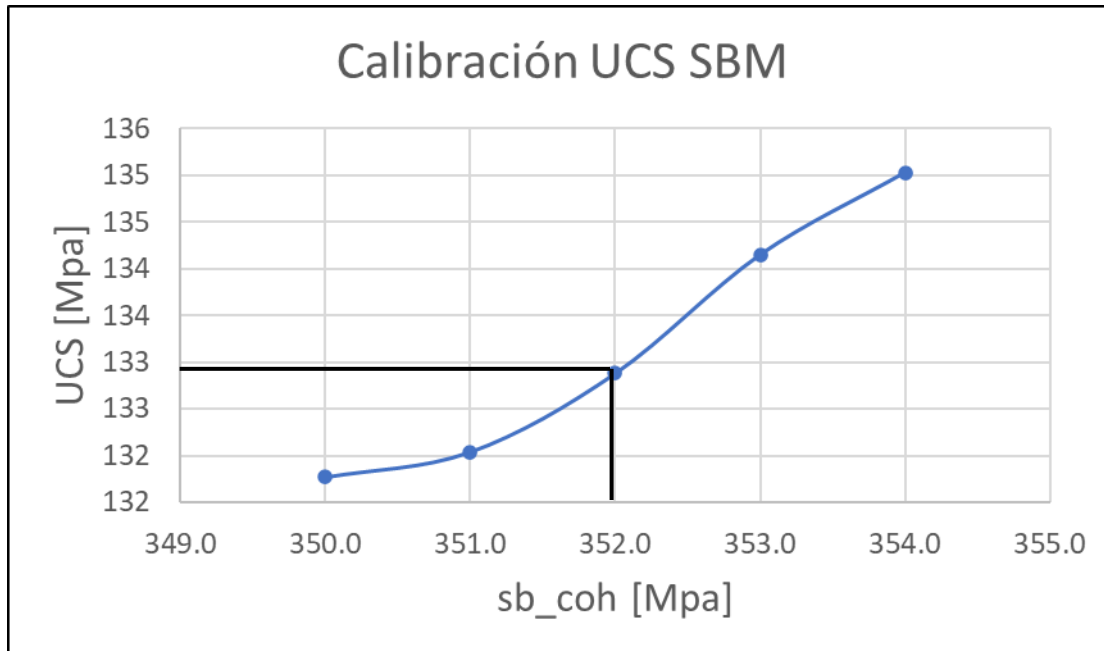


Figura 4.3: Gráfico de resultados de la calibración de la resistencia a la compresión simple para el modelo SBM.

Para esta calibración, se varió el parámetro sb_coh , dejando el resto de micro parámetros ya calibrados fijos. Esta variación fue entre 350 [Mpa] y 354 [Mpa], en donde finalmente se seleccionan los valores de 352 [Mpa] obteniéndose un valor de UCS de 132.9 [Mpa].

En la Tabla 4.11, se pueden observar los resultados del modelo para la resistencia a la compresión simple.

Tabla 4.11: Resultados del UCS para el modelo SBM junto a su error asociado.

UCS Laboratorio [-]	UCS SBM [-]	UCS SBM
133.0	132.9	0.1%

- **Envolvente de Falla**

Finalmente, para terminar con la calibración del modelo SBM, se debe ajustar la envolvente de falla obtenida por este. En este caso se busca obtener un parámetro m_i del criterio de falla de Hoek & Brown similar el experimental variando el ángulo de fricción interna del modelo (Arteaga, 2015). Los resultados obtenidos se observan en la Figura 4.4 y Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Resultados del módulo de Young para el modelo SBM junto a su error asociado.

Nº	Micro parámetro Ángulo de Fricción [°]	Macro parámetro m_i [-]	% Error
1	0	33.1	11.5%
2	10	29.7	20.6%
3	20	32.8	12.3%
4	30	35.9	4.0%
5	32	38.0	1.6%
6	40	43.3	15.8%
7	50	48.0	33.7%

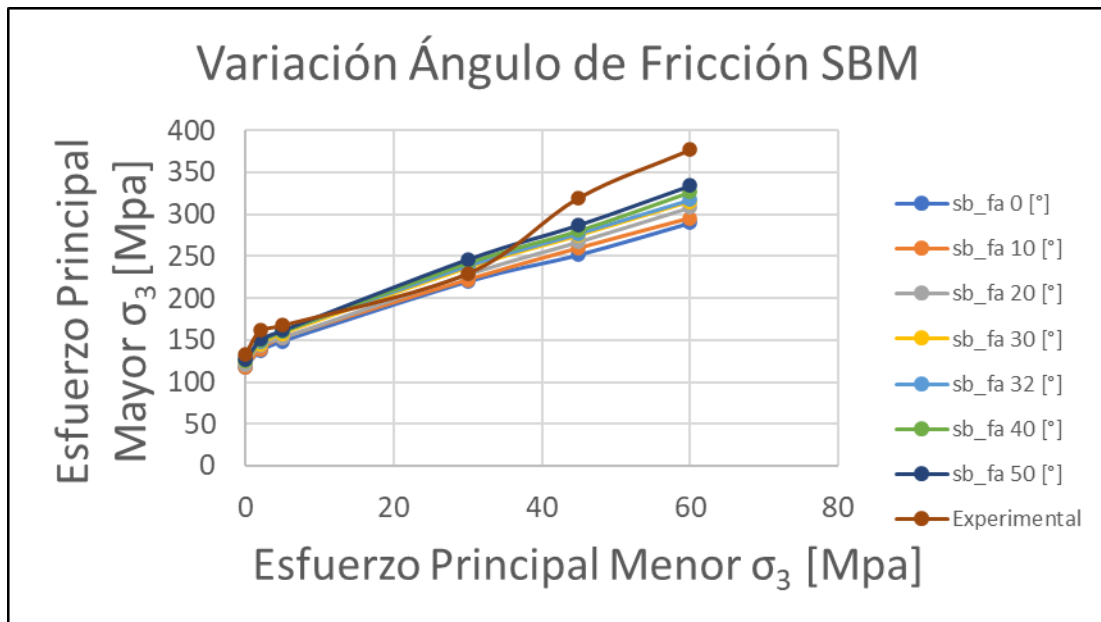


Figura 4.4: Calibración de la envolvente de falla del modelo SBM variando micro parámetro sb_fa .

Se observa que a medida que se aumenta el valor del ángulo de fricción, aumenta el valor del parámetro m_i aunque no de manera perfectamente lineal.

Finalmente, utilizando un valor de 32 [°] para el ángulo de fricción interna, se obtiene un m_i de 38.0 [-] con un error de 1.6%.

4.1.3. Calibración FCM

- Razón de Poisson

Como se mencionó en el Inciso 3.5, el único micro parámetro capaz de controlar la propiedad de la razón de Poisson corresponde a la razón de rigideces del modelo FCM (k_ratio). Para el caso del modelo FCM, Salinas (2016), demostró que se es posible ajustar la razón de Poisson para una roca de granito. En este caso se logra calibrar esta propiedad, obteniéndose los resultados que se observan en la Tabla 4.13 y Figura 4.5.

Tabla 4.13: Resultados de la calibración de la razón de Poisson para el modelo FCM.

Simulación	fj_kratio [-]	E _{PFC3D} [Gpa]	Coef. Poisson [-]	Error %
1	1.4	30.6	0.18	37.4%
2	1.5	30.1	0.22	11.6%
3	1.6	29.7	0.26	2.7%
4	1.7	29.3	0.27	7.1%
5	1.8	28.2	0.27	7.7%
Poisson Experimental		0.25		

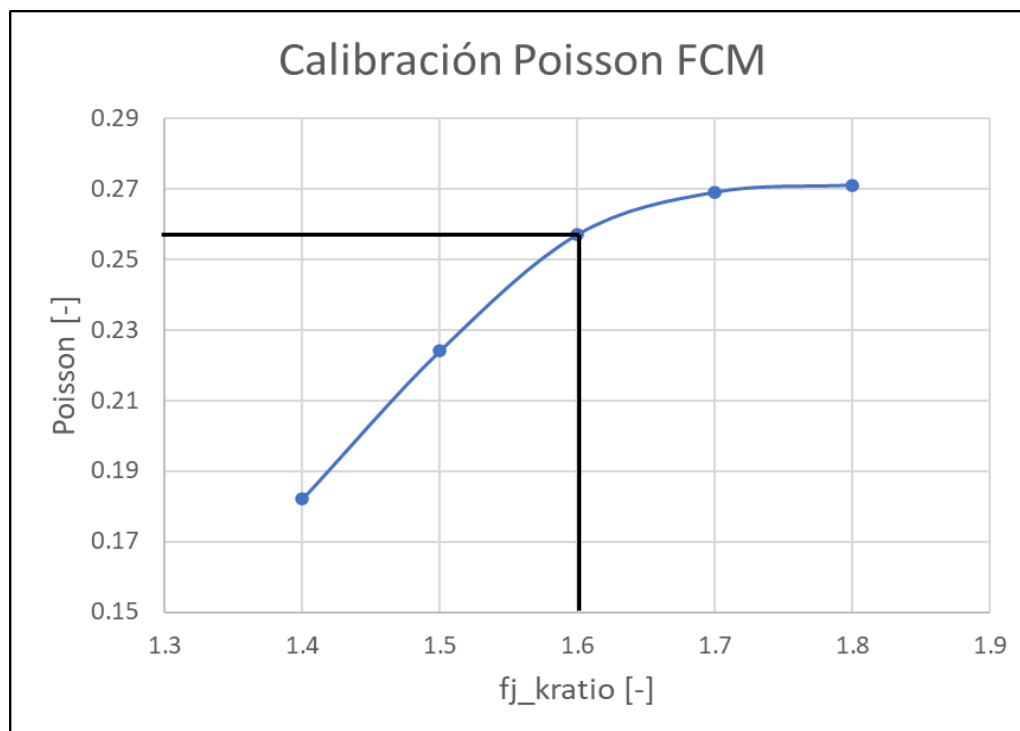


Figura 4.5: Resultados calibración Razón de Poisson para el modelo FCM.

Se observa que a medida que se aumenta el valor del kratio, aumenta la ductilidad del material, disminuyendo el módulo de Young, pero aumentando el valor de la razón de Poisson, lo que concuerda con las conclusiones de Salinas, (2016). Se escoge un valor menor de kratio, siendo este finalmente de 1,6 para FCM.

Finalmente, en la Tabla 4.14, se pueden observar los resultados del modelo para la razón de Poisson.

Tabla 4.14: Resultados de la razón de Poisson para el modelo FCM junto a su error asociado.

Poisson Laboratorio [-]	Poisson FCM [-]	Error Poisson FCM
0.25	0.26	2.8%

- Resistencia a la Tracción

Para el caso de la Resistencia a la tracción, se tiene que el micro parámetro que controla su resultado corresponde al fj_ten (Resistencia a la Tracción). Se

prosigue con la calibración de esta propiedad variando este micro parámetro como se observa en la Tabla 4.15 y Figura 4.6.

Tabla 4.15: Resultados de calibración por modelo para la resistencia a la tracción de ambos modelos.

Simulación	Micro parámetro fj_ten [Mpa]	Desv. Std. Micro parámetro [Mpa]	Macro parámetro Res. Tracción [Mpa]
1	79.0	15.8	-12.5
2	80.0	16.0	-13.1
3	81.0	16.2	-13.7
4	82.0	16.4	-14.73
5	83.0	16.6	-15.38

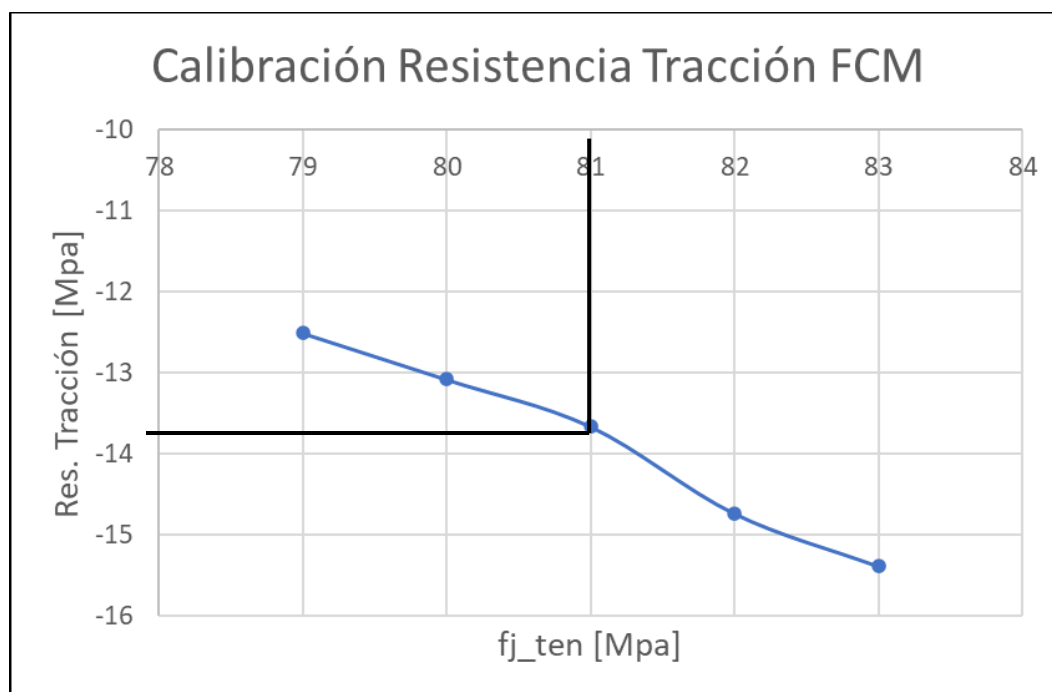


Figura 4.6: Gráfico de resultados de la calibración de la resistencia a la tracción para el modelo FCM.

Se observa en la figura y tabla anterior, con las razón de rigideces (k_{ratio}) fijada en 1,6 para el modelo FCM, se comienza el análisis con ensayos de tracción directa. Para esto se analizó la respuesta del ensayo para valores del micro parámetro fj_ten entre 79 [Mpa] y 83 [Mpa] para este modelo. De esta manera se logra obtener un valor simulado de la resistencia a la tracción de la roca de -13.7 [MPa] usando un valor de fj_ten de 81 [Mpa] para el modelo FCM.

En la Tabla 4.16, se pueden observar los resultados del modelo para la resistencia a la tracción.

Tabla 4.16: Resultados de la razón de Poisson para el modelo FCM junto a su error asociado.

Res. Tracción Laboratorio [-]	Res. Tracción FCM [-]	Error Res. Tracción FCM
-13.6	-13.7	1.2%

- Módulo de Young

Para el caso del módulo de Young, gracias a los trabajos anteriores (Salinas, 2016), se sabe que los micro parámetros que controlan esta propiedad elástica corresponden a la razón de rigideces del FCM (kratio) y al módulo de Young de las partículas y contacto (emod y emodb); en donde como el kratio está definido, le corresponde al segundo poder ajustar el valor del módulo de Young, en donde, como se mencionó anteriormente en el Inciso 3.5, se recomienda de estudios hechos anteriormente que la razón entre el módulo de Young de las partículas y el de los contactos debe tener un valor de 1.5 para poder replicar un comportamiento frágil de la roca (Potyondy & Cundall, 2004).

Finalmente, en la Tabla 4.17 y Figura 4.7 se puede observar los resultados de las simulaciones y su efecto en el módulo de Young.

Tabla 4.17: Resultados calibración del módulo de Young para el modelo FCM.

N°	Micro parámetro Mod. Young Contactos [Gpa]	Micro parámetro Mod. Young Contactos [Gpa]	Macro parámetro Módulo de Young [Gpa]
1	44	66.0	29.7
2	45	67.5	32.1
3	46	69.0	35.3
4	47	70.5	36.9
5	48	72.0	38.2

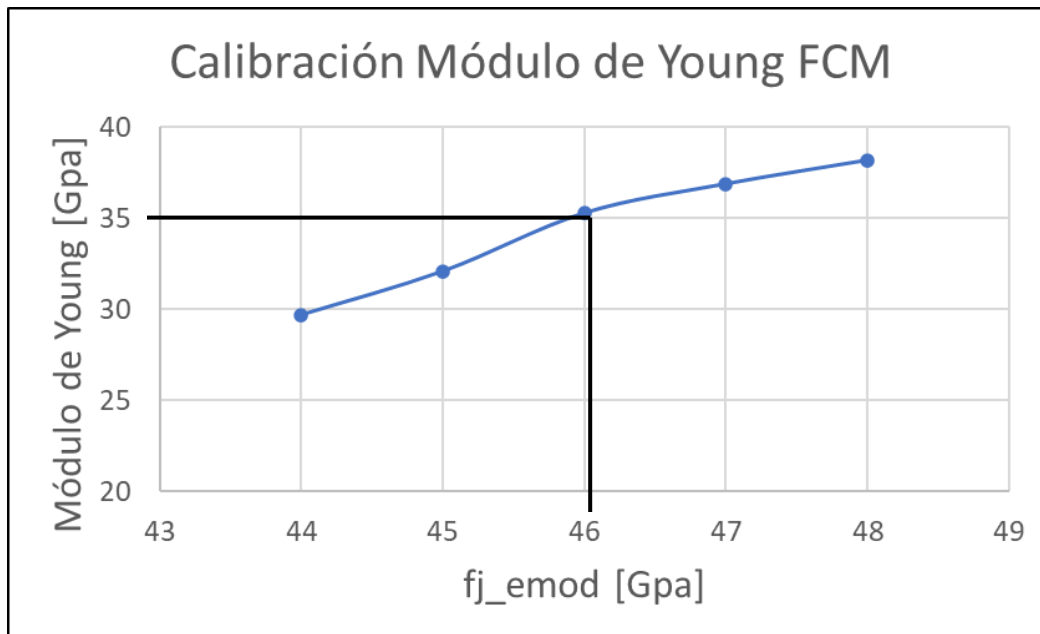


Figura 4.7: Gráfico de resultados de la calibración del módulo de Young para el modelo FCM.

Se observa en la figura y tabla anterior, con las razón de rigideces y resistencia a la tracción ya fijadas para el modelo FCM, se vuelve al análisis con ensayos de compresión. Para este análisis se varió el parámetro sb_emod con

valores entre 44 [GPa] y 48 [GPa], en donde conforme se aumenta el valor del módulo de Young del micro parámetro, se aumenta el módulo de Young obtenido de la simulación. Finalmente se seleccione un valor de 46 [GPa] para dicho micro parámetro; obteniéndose un valor de 33.5 [GPa] para el modelo FCM.

En la Tabla 4.18, se observa los resultados del módulo de Young para el modelo FCM.

Tabla 4.18: Resultados finales del módulo de Young para el modelo FCM y su error asociado.

Mod. De Young Laboratorio [-]	Mod. De Young FCM [-]	Error Mod. De Young FCM
33.8	35.3	4.4%

- Resistencia a la Compresión Simple

Para concluir con la calibración de los macro parámetros de ambos modelos, el siguiente ajuste corresponde a la resistencia a la compresión simple. Para ajustar este valor se debe variar el micro parámetro de la cohesión de los contactos (fj_coh) y la resistencia a la tracción de los contactos (fj_ten) (Castro, 2019). Se tiene que el segundo micro parámetro mencionado ya se encuentra fijado, con lo cual se varia la cohesión de los contactos para lograr calibrar el UCS.

En la Tabla 4.19 y Figura 4.8 se puede observar los resultados de las simulaciones y su efecto en el módulo de Young.

Tabla 4.19: Resultados de calibración por modelo para el UCS del modelo FCM.

N°	Micro parámetro cohesión contactos [Mpa]	Desv. Std. Micro parámetro [Mpa]	Macro parámetro UCS [Mpa]
1	153	30.60	128.6
2	154	30.80	131.0
3	155	31.00	132.9
4	156	31.20	134.0
5	157	31.40	135.4

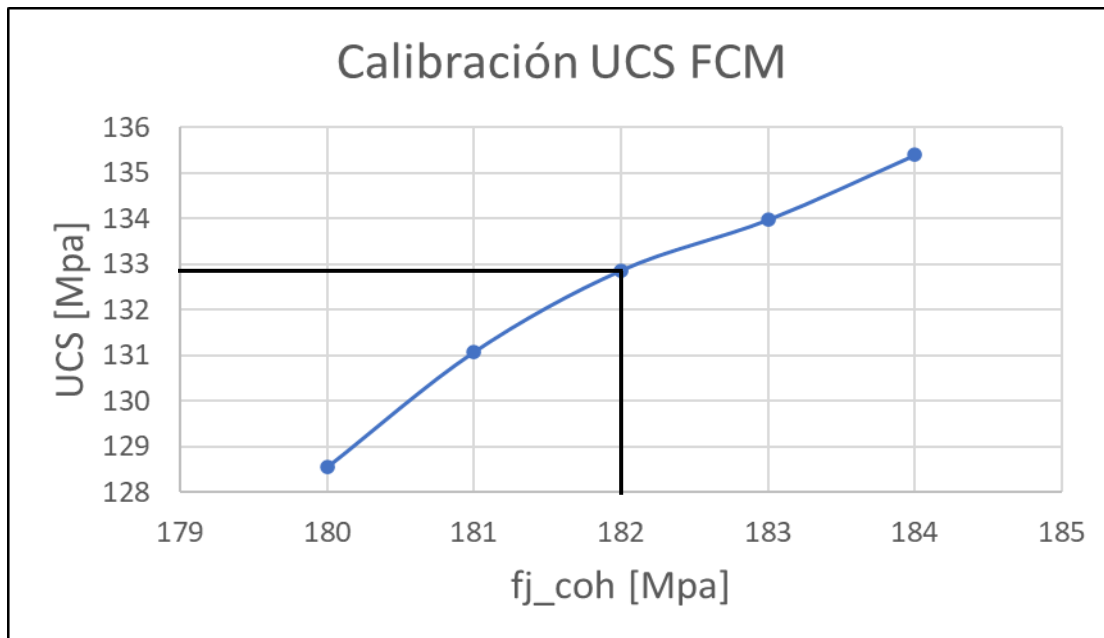


Figura 4.8: Gráfico de resultados de la calibración del UCS para el modelo FCM.

Para esta calibración, se varió el parámetro fj_coh , dejando el resto de micro parámetros ya calibrados fijos. Esta variación fue entre 153 [Mpa] y 157 [Mpa], en donde finalmente se seleccionan los valores de 155 [Mpa] obteniéndose un valor de UCS de 132.9 [Mpa].

En la Tabla 4.20, se pueden observar los resultados de ambos modelos para la calibración de UCS:

Tabla 4.20: Resultados finales del UCS para el modelo FCM y su error asociado.

UCS Laboratorio [-]	UCS SBM [-]	UCS SBM
133.0	132.9	0.1%

- Ángulo de Fricción

Finalmente, para terminar con la calibración del modelo FCM, se debe ajustar la envolvente de falla obtenida por este. En este caso se busca obtener un parámetro m_i del criterio de falla de Hoek & Brown similar el experimental variando el ángulo de fricción interna del modelo (Salinas, 2016). Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 4.21 y Figura 4.9.

Tabla 4.21: Resultados del módulo de Young para el modelo SBM junto a su error asociado.

Nº	Micro parámetro Ángulo de Fricción FCM [°]	Macro parámetro m_i [-]	Error m_i FCM
1	0	32.6	11.5%
2	10	29.1	20.6%
3	20	31.8	12.3%
4	28	37.1	4.0%
5	30	36.9	1.6%
6	40	49.0	15.8%
7	50	50.1	33.7%

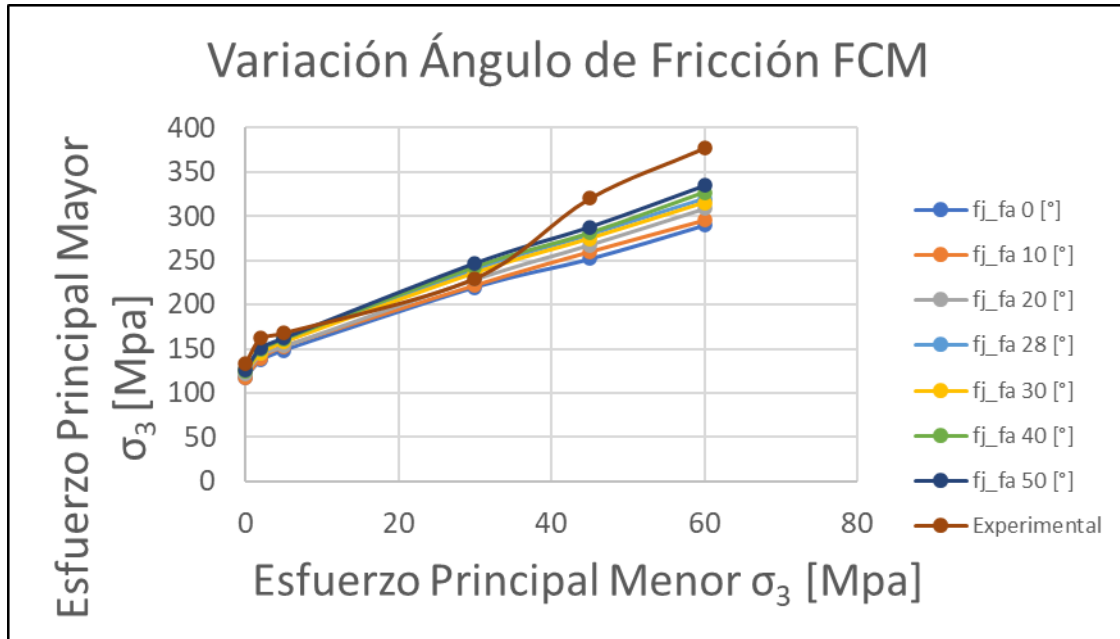


Figura 4.9: Calibración de la envolvente de falla del modelo FCM variando micro parámetro fj_fa .

Se observa que a medida que se aumenta el valor del ángulo de fricción, aumenta el valor del parámetro m_i aunque no de manera perfectamente lineal. Finalmente, utilizando un valor de 28 [°] para el ángulo de fricción interna, se obtiene un m_i de 37.1 [-] con un error de 4.0%.

Finalmente, en la Tabla 4.22, se observa los resultados de ambos modelos para todas las propiedades junto a sus errores asociados, a modo de comparación entre estos.

Tabla 4.22: Resultados finales de las simulaciones de ambos modelos y la comparación con los datos experimentales.

Macro Parámetro	Valor Referencial	Valor SBM	Valor FCM	Error SBM %	Error FCM %
σ_{UCS} [Mpa]	133.0	132.9	132.9	0.02%	0.02%
σ_t [Mpa]	-13.6	-13.5	-13.7	0.30%	1.17%
ν [-]	0.25	0.08	0.26	68.00%	2.72%
E [Gpa]	33.8	35.0	34.0	3.61%	0.50%
E _{res} [Gpa]	110.3	223.1	86.6	102.27%	27.37%

Se observa que ambos modelos son capaces de representar las propiedades mecánicas y elásticas de la roca simulada presentando un error muy bajo, a excepción de la razón de Poisson para el modelo SBM, lo cual era de esperarse como fue mencionado en el Inciso 2.4.1, ya que el modelo no es capaz de representar la razón de Poisson. Por otro lado, con respecto al comportamiento post peak, su actuar no se sabía cómo sería, ya que la calibración de los modelos se realiza para el comportamiento pre peak, con lo cual para la zona post peak no se esperaba un ajuste preciso, más bien el comportamiento de esta zona se analizará en el siguiente capítulo de Análisis de Sensibilidad para ver que parámetros afectan a esta propiedad. Finalmente, ya se tienen ambos modelos calibrados, en donde los micro parámetro seleccionados para cada modelo se ven en la Tabla 4.23 y Tabla 4.24, además, las curvas obtenidas se observan en la Figura 4.10.

Tabla 4.23: Micro parámetro calibrados para el modelo SBM.

Simbología	Descripción SBM	Valor Inicial
Empaquetamiento		
R _{rat}	Razón de Radios [-]	1.66
Res	Resolución [-]	10
ϵ_p	Strain Rate [-]	0.5
λ	Multip. de Radios [-]	1
Propiedades Partículas		
ρ	Densidad [kg/m ³]	2700
E _{ba} /E _{FCM}	Razón Módulos [-]	1.5
E _{ba}	E _{Partículas} [Mpa]	210
μ	Coeficiente Fricción [-]	0.5
kratiob	Razón de Rigideces Normales y Corte [-]	2.5
Propiedades SBM		
E _{SBM}	Módulo de Young Contactos [Mpa]	140
kratio	Razón de Rigideces Normales y Corte [-]	1.5
sb_ten	Esfuerzo Normal Promedio [Mpa]	40
sb_coh	Cohesión [Mpa]	353.2
sb_fa	Ángulo de Fricción [°]	32
soft	Factor Ablandamiento [-]	40
cut	Factor Ablandamiento Tracción [-]	0.5

Tabla 4.24: Micro parámetro calibrados para el modelo FCM.

Simbología	Descripción SBM	Valor Inicial
Empaquetamiento		
R_{rat}	Razón de Radios [-]	1.66
Res	Resolución [-]	10
ε_p	Strain Rate [-]	0.5
λ	Multip. de Radios [-]	1
Propiedades Partículas		
ρ	Densidad [kg/m ³]	2700
E_{ba}/E_{FCM}	Razón Módulos [-]	1.5
E_{ba}	$E_{Partículas}$ [Mpa]	69
μ	Coefficiente Fricción [-]	0.5
$kratiob$	Razón de Rigideces Normales y Corte [-]	2.5
Propiedades FCM		
E_{FCM}	Módulo de Young Contactos [Mpa]	46
$kratio$	Razón de Rigideces Normales y Corte [-]	1.6
fj_ten	Esfuerzo Normal Promedio [Mpa]	81
fj_coh	Cohesión [Mpa]	182
fj_fa	Ángulo de Fricción [°]	28

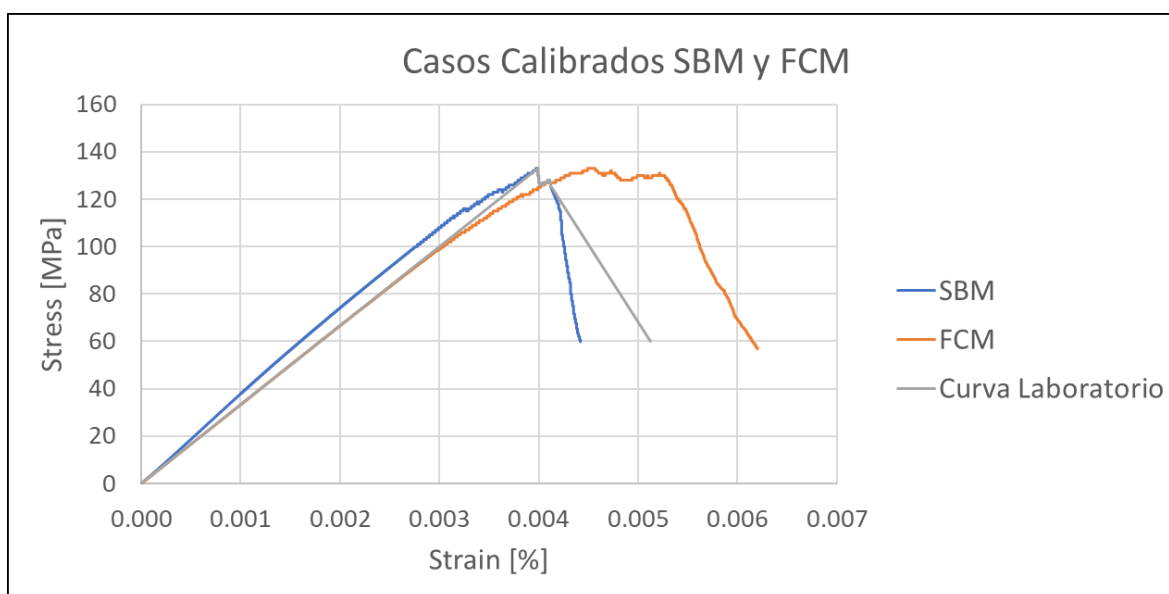


Figura 4.10: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para los modelos SBM (Azul), FCM (Naranja) y laboratorio (gris).

Finalmente, se tiene que los micro parámetros una vez que están calibrados para el modelo SBM y FCM, presentan una gran diferencia en sus valores, por ejemplo el valor calibrado de sb_coh [Mpa] es de 353.2, mientras que el fj_coh [Mpa] es de 182, para el caso del emod, se tiene que para el SBM se usa un valor de 140 [Gpa], mientras que el del FCM corresponde a 46 [Gpa], y por último el sb_ten [Mpa] tiene un valor de 40, mientras que el fj_ten tiene un valor de 81, lo cual nos indica

que para una misma roca, utilizando modelos distintos se tendrá una gran diferencia en el valor de estos, denotando la diferencia que tiene el SBM con el FCM.

4.2. Ensayos Triaxiales Convencionales

Una vez ajustada la envolvente de falla, la cual fue explicada en el Inciso 4.1, se da por terminada la calibración, ahora se presentan los resultados de los ensayos triaxiales obtenidos de los micro parámetros calibrados para cada modelo, cuyos valores fueron presentados en la Tabla 4.23 y Tabla 4.24.

4.2.1. Curvas Esfuerzo Deformación

En la Figura 4.11 y Figura 4.12 se observan los resultados de los ensayos triaxiales del modelo SBM y FCM respectivamente.

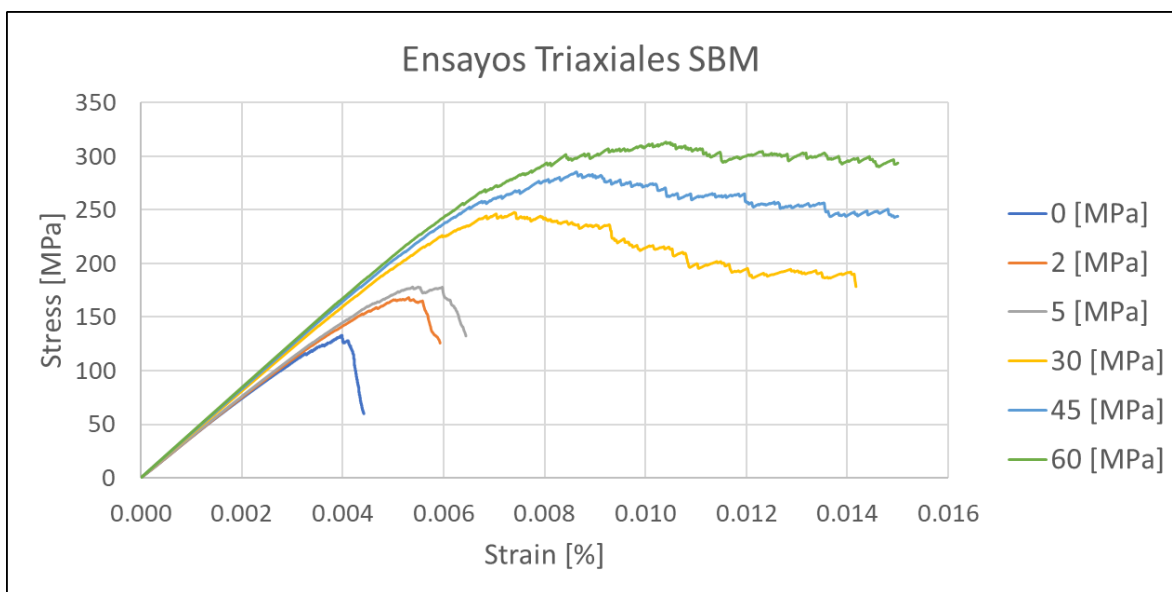


Figura 4.11: Curvas de ensayos triaxiales a distinto confinamiento usando modelo SBM.

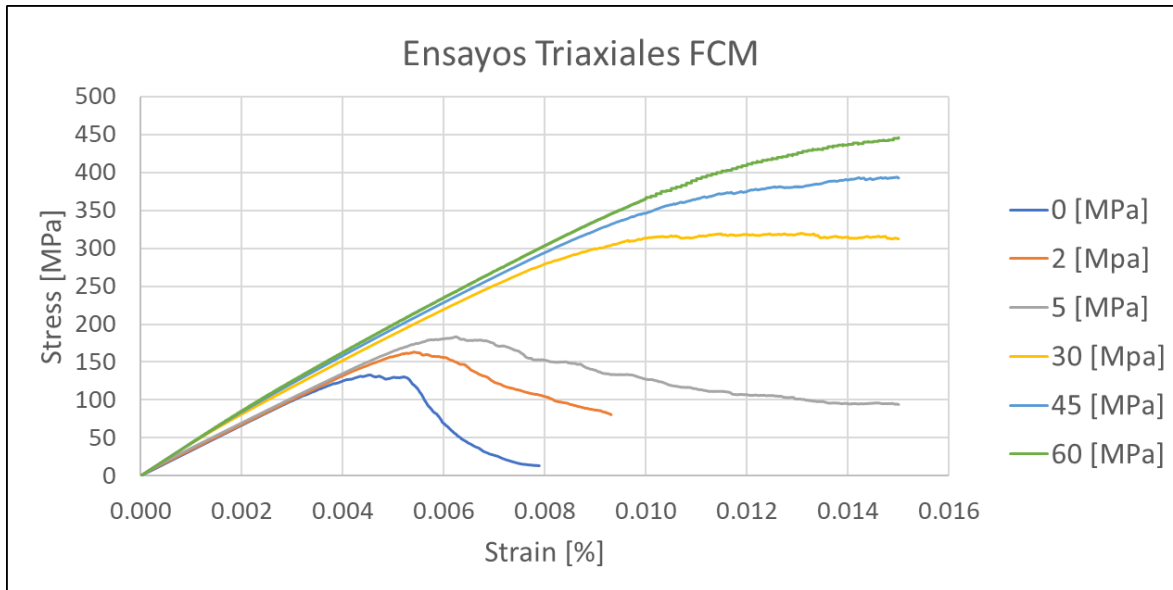


Figura 4.12: Curvas de ensayos triaxiales a distinto confinamiento usando modelo FCM.

A partir de los resultados obtenidos en los gráficos anteriores, se comparan los resultados de ambos modelos con respecto al esfuerzo principal mayor (σ_1), realizando esta comparación entre cada modelo y los resultados experimentales, los cuales se ven reflejados en la Tabla 4.25

Tabla 4.25: Tabla comparativa de los distintos confinamientos para ambos modelos y la comparación del esfuerzo principal mayor obtenido para cada modelo con el valor experimental.

σ_3 [Mpa]	σ_1 Ref [Mpa]	σ_1 SBM [Mpa]	σ_1 FCM [Mpa]	% Error σ_1 SBM	% Error σ_1 FCM
0	132.9	132.9	132.9	0.0%	0.0%
2	162.5	168.3	163.2	3.6%	0.4%
5	167.5	178.2	183.4	6.4%	9.5%
30	229.6	247.8	299.5	7.9%	30.4%
45	320.1	285.6	354.1	10.8%	10.6%
60	377.1	313.5	411	16.9%	9.0%

Se puede observar que ambos modelos representan bien el par σ_1 y σ_3 presentando errores menores al 10% para confinamientos bajos (0-5 [Mpa]), luego para el confinamiento de 30 [Mpa] ocurre lo mismo para el error del SBM, llegando a un 8%, pero para el FCM el error sube a 30%, esto puede deberse a factores internos del modelo, pero a pesar de este punto de comportamiento errático, con los siguientes confinamientos el modelo FCM nuevamente tiene un error máximo del 10%. Ahora, para confinamientos de 30 [Mpa] y más para el modelo SBM, se tiene que este sigue teniendo un error máximo del 10%, subiendo a un 17% para el confinamiento final de 60 [Mpa], donde hay un pequeño desajuste en comparación con los confinamientos anteriores.

Por otro lado, la teoría también nos dice que el Módulo de Young cambia conforme aumenta la presión de confinamiento (Kawata and Shimada, 2000), con lo cual se realiza una comparación para cada confinamiento en términos del valor experimental y el resultante de cada modelo sumado el porcentaje de error entre estos, en donde estos resultados se pueden observar en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26: Tabla comparativa de los distintos confinamientos para ambos modelos y la comparación del Módulo de Young obtenido para cada modelo con el valor experimental.

σ_3 [Mpa]	E_{Ref} [Gpa]	E_{SBM} [Gpa]	Error _{SBM}	E_{FCM} [Gpa]	Error _{FCM}
0	33.8	35.0	3.6%	33.9	0.5%
2	33.7	36.8	9.2%	34.5	2.6%
5	33.3	37.7	13.1%	35.1	5.5%
30	30.0	40.1	33.8%	37.5	25.0%
45	33.2	41.8	26.0%	38.4	15.9%
60	34.0	42.5	25.1%	39.6	16.7%

Finalmente, a partir de los mismos resultados de la tabla anterior se realiza una comparativa de ambos modelos con respecto al valor del Módulo de Young obtenido a cada presión de confinamiento y el respectivo obtenido de las simulaciones, donde se ve la diferencia entre ambos modelos van aumentando su valor de Módulo de Young conforme aumenta la presión de confinamiento, a pesar de que los datos van a la inversa, es decir que el aumento del confinamiento disminuye el Módulo de Young de los datos experimentales debido a las condiciones internas de las muestras de roca, ya que lo normal en los ensayos triaxiales es que el Módulo de elasticidad aumente conforme aumenta la presión de encierro, a pesar de esto, se puede comparar los dos modelos, en donde el modelo FCM se ajusta de mejor manera a los datos experimentales.

4.2.2. Módulo Residual

Con respecto al Módulo Residual, este se estima realizando una regresión lineal a la zona post peak de la curva esfuerzo deformación, como fue explicado en la Figura 3.9. En la Tabla 4.27 se observan los resultados obtenidos del Módulo Residual para ambos modelos.

Tabla 4.27: Resultados de Módulo Residual de los ensayos de tracción a distinto confinamiento para los datos experimentales y de cada modelo.

σ_3 [Mpa]	$E_{res Ref}$ [Gpa]	$E_{res SBM}$ [Gpa]	$E_{res FCM}$ [Gpa]	Error $E_{res SBM}$	Error $E_{res FCM}$
0	110.3	223.1	86.6	102.3%	21.5%
2	108.7	103.1	22.2	5.2%	79.6%
5	99.6	101.2	9.9	1.6%	90.1%
30	-	9.6	2.2	-	-
45	-	5.6	1.4	-	-
60	24.8	2.4	0.9	90.3%	96.4%

Como es de esperar, el comportamiento de esta curva debe ser decreciente debido a que al aumentar el confinamiento existe una transición frágil-dúctil lo que provoca una disminución en el módulo post-peak (Salinas, 2016). Lo cual se cumple para ambos modelos, pudiendo decir que los dos representan de manera lógica el comportamiento a mayor confinamiento.

Por otro lado, como bien fue mencionado en el Inciso 3.5, los modelos fueron ajustados para su comportamiento pre peak, con lo cual no se esperaba una respuesta precisa por parte de los modelos, pero se observa que ambos pueden representar un comportamiento frágil en el post peak.

En el caso del modelo SBM se tiene un error del 100% del módulo residual en el ensayo de compresión simple, pero a pesar de esto, se obtiene un comportamiento frágil de la zona post peak, logrando representar dicho comportamiento de la roca; para el caso de los distintos confinamientos, se observa que el modelo SBM logra errores menores al 6% para presiones de confinamiento bajas (2 y 5 [MPa]), mientras que, a mayores presiones de confinamiento, se sobre estima la transición frágil-dúctil de los ensayos triaxiales, arrojando errores del 90%.

En el caso del modelo FCM se tiene un error del 20% del módulo residual en el ensayo de compresión simple, siendo un error relativamente bajo para no ser una propiedad de la roca calibrada, mientras que conforme para presiones de confinamiento bajas (2 y 5 [MPa]) se obtienen errores ya mayores desde un 80%, y para mayores confinamientos se obtienen errores del 96%.

Ambos modelos logran representar de buena manera la fragilidad de la zona post peak de la curva esfuerzo-deformación, en el caso del SBM, este arroja un error del 100% comparado con el 20% del FCM para el ensayo de compresión simple, aunque cabe destacar que el módulo residual no fue calibrado; por otro lado, en los ensayos triaxiales, el modelo SBM logra representar de mejor manera la transición frágil-dúctil de la roca que el modelo FCM, aunque ambos tienen problemas para representar esta transición de manera correcta.

4.3. Análisis de Sensibilidad

Como fue mencionado en Inciso 3.6, luego de haberse calibrado ambos modelos, se prosigue con la realización de un análisis de sensibilidad de estos. Se seleccionan 4 micro parámetros para cada modelo según fue mencionado en el Inciso 3.4 y se mostró en Tabla 3.4, los cuales serán variados dentro de cierto rango para cada parámetro y se observara su comportamiento pre y post peak. A continuación, se presentan en la Tabla 4.28 y Tabla 4.29 los micro parámetros seleccionados por modelo para el análisis de sensibilidad, junto a la variación correspondiente de cada micro parámetro.

Tabla 4.28: Micro parámetros seleccionados para el análisis de sensibilidad y sus variaciones - SBM.

Micro Parámetro	Valor Calibrado	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
soft [-]	40	20	30	50	60
cut [-]	0.0	0.3	0.5	0.8	1.0
kratio [-]	1.5	0.8	1.1	1.9	2.3
sb_mcf [-]	0.5	0.3	0.4	0.7	0.8

Tabla 4.29: Micro parámetros seleccionados para el análisis de sensibilidad y sus variaciones - FCM.

Micro Parámetro	Valor Calibrado	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
kratio [-]	1.6	0.8	1.2	2.0	2.4
fricb [-]	0.5	0.3	0.4	0.7	0.8
fj_fric [-]	0.5	0.3	0.4	0.7	0.8
emod [GPa]	46	23.0	34.5	57.5	69.0

Cabe destacar que los valores mostrados de las variaciones de ambos modelo están en su correspondiente unidad de medida del micro parámetro.

La elección de los micro parámetros mostrados se debe a su influencia en el comportamiento post peak de los modelos, la cual fue encontrada en el estudio previo del comportamiento post peak (resultados en ANEXO), en donde se analiza la influencia de 8 parámetros por modelo y dentro de los cuales fueron seleccionados 4 para cada modelo.

Para el caso del modelo SBM, se analiza la respuesta de los micro parámetros de la cohesión de los contactos (sb_coh), la resistencia a la tracción de los contactos (sb_ten), la fricción de los contactos (sb_fric) y el módulo de Young de los contactos (emod), los cuales no presentaban mayores influencias en el comportamiento residual del modelo. Por otro lado, se seleccionaron los micro parámetros de los factores de ablandamiento y ablandamiento por tracción (soft y cut respectivamente) debido a que son exclusivos de este modelo, y finalmente se selecciona el factor de contribución del momento (sb_mcf) debido a que es el parámetro que más influye en el post peak de este modelo. Finalmente, el rango de variación aplicado para el kratio es usando un aumento y decremento del 25 y 50% del valor calibrado, mientras que, para el resto de micro parámetro, se busca abarcar la mayor parte del rango aplicable de la variable (ya que estas están definidas dentro de un rango finito).

Para el caso del modelo FCM, se analiza la respuesta de los micro parámetros de la cohesión de los contactos (fj_coh), la resistencia a la tracción de los contactos (fj_ten), el módulo de Young de las partículas (emodb) y el ángulo de fricción interna (fj_fa) los cuales no presentaban mayores influencias en el comportamiento residual del modelo. Por otro lado, se seleccionaron los micro parámetros de la razón de rigideces (kratio), la fricción de las partículas (fricb), la fricción de los contactos (fj_fric) y el módulo de Young de los contactos (emod), los cuales fueron los que más influyeron en la variación del módulo residual obtenido.

Finalmente, el rango de variación aplicado para todos los micro parámetros es de un aumento y decremento del 25 y 50% del valor calibrado.

4.3.1. SBM

- Soft (Factor de Ablandamiento)

La elección del micro parámetro Factor de Ablandamiento se debe a que es un parámetro exclusivo del modelo SBM como fue mencionado en el inciso anterior. Además, los valores seleccionados para el análisis buscan abarcar desde un valor de 0 para este micro parámetro hasta uno que aumenta en 20 puntos el valor calibrado. En la Figura 4.13 y en la Tabla 4.30 se presentan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad con el parámetro factor de ablandamiento (soft).

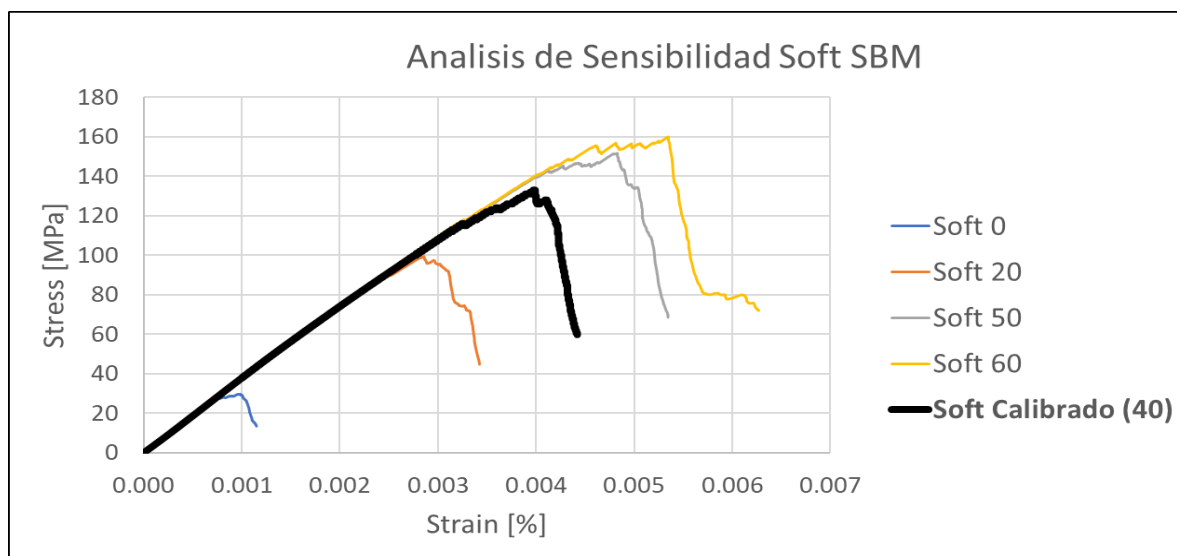


Figura 4.13: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro soft SBM.

Tabla 4.30: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad del soft.

Soft [-]	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]	Error Mod Residual SBM [%]	Error Mod. Young SBM [%]	Error UCS SBM [%]
0	123.2	33.5	29.7	11.7%	0.1%	77.7%
20	152.1	33.4	99.4	37.9%	0.2%	25.2%
50	219.8	33.4	151.0	99.3%	0.2%	13.5%
60	239.2	33.5	160.0	116.9%	0.1%	20.3%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

Para el análisis de micro parámetro del factor de ablandamiento (soft), se tiene que su valor calibrado corresponde a 40 [-], con lo cual la variación aplicada fue desde un valor de 0 hasta 60. Se observa que este micro parámetro tiene una

influencia directa sobre la resistencia a la compresión (UCS) y el módulo residual, en donde conforme se aumenta el valor de soft, también lo hacen los valores de las propiedades de la roca recién mencionadas, teniendo variaciones máximas del 77% y del 116% respectivamente. Por otro lado, se observa que el micro parámetro no tiene influencia sobre el módulo de Young, presentando una variación despreciable ($>1\%$). Finalmente, se observa que la variación del micro parámetro soft genera cambios en más de una propiedad de la roca, lo cual era de esperarse, por otro lado, se observa que el aumento del micro parámetro soft principalmente aumenta las propiedades mecánicas de la roca (el UCS principalmente) por sobre las propiedades elásticas en la zona pre peak y, por otro lado, el aumento del valor de soft genera curvas que van desde un comportamiento más dúctil hacia uno más frágil.

- **Cut (Factor de Ablandamiento Res. A la Tracción)**

La elección del micro parámetro Factor de Ablandamiento de resistencia a la tracción se debe a que es un parámetro exclusivo del modelo SBM como fue mencionado en el inciso anterior. Además, los valores seleccionados para el análisis buscan abarcar todo el rango aplicable del parámetro, desde un valor de 0 hasta 1. En la Figura 4.14 y la Tabla 4.31 se presentan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro factor ablandamiento res. a la tracción (cut).

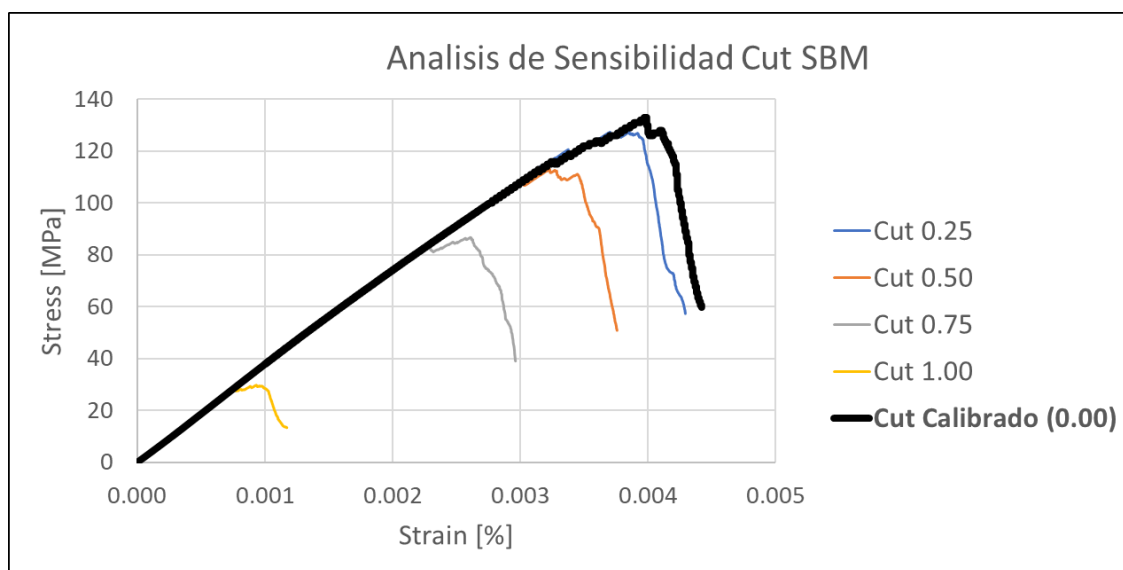


Figura 4.14: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro cut SBM.

Tabla 4.31: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad del cut.

Cut [-]	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]	Error Mod Residual SBM [%]	Error Mod. Young SBM [%]	Error UCS SBM [%]
0.25	213.5	33.5	127.5	93.6%	0.0%	4.1%
0.50	205.8	33.5	113.0	86.6%	0.0%	15.0%
0.75	142.8	33.5	86.7	29.5%	0.0%	34.8%
1.00	115.7	33.5	29.8	4.9%	0.0%	77.6%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

Para el análisis del micro parámetro del factor de ablandamiento por resistencia a la tracción (cut), se tiene que su valor calibrado corresponde a 0.0 [-], con lo cual su variación aplicada es para analizar su comportamiento en todo su rango aplicable (valores entre 0 y 1). Se observa que este micro parámetro tiene una influencia indirecta sobre el módulo residual, en donde conforme se aumente el valor de cut, se disminuye el módulo post peak variándolo hasta un 93%, por otro lado, el aumento de cut genera una transición frágil a dúctil en el módulo residual. En el caso del UCS, se tiene una relación indirecta, es decir que conforme aumente el valor de cut, se disminuye el valor del UCS hasta un 77%. En el caso del módulo de Young, se tiene que cut no tiene influencia sobre esta propiedad. Finalmente, al igual que el micro parámetro soft, el cambio de valor para el cut genera cambios en más de una propiedad de la roca, modificando principalmente las propiedades mecánicas de la roca en la zona pre peak, siendo el módulo UCS la propiedad más afectada, y, por otro lado, también modifica las propiedades elásticas en la zona post peak.

- Kratio (Razón de Rigideces)

La elección del micro parámetro Razón de Rigideces se debe a que es uno de los parámetros que más afectan al post peak del modelo SBM como fue mencionado en el inciso anterior. Además, los valores seleccionado para el análisis buscan aumentar y disminuir el valor calibrado en un 25 y 50%. En la Figura 4.15 y la Tabla 4.32 se presentan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro razón de rigideces de los contactos (kratio).

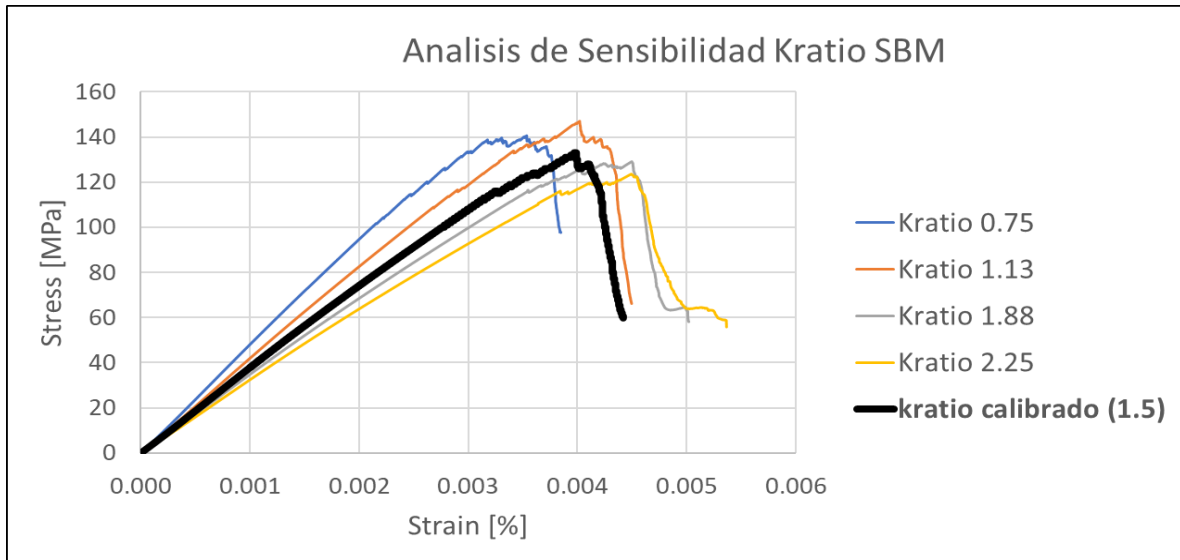


Figura 4.15: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro kratio SBM.

Tabla 4.32: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad del kratio.

Kratio [-]	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]	Error Mod Residual SBM [%]	Error Mod. Young SBM [%]	Error UCS SBM [%]
0.75	433.6	47.7	140.6	293.1%	42.4%	5.7%
1.13	393.5	41.7	147.0	256.8%	24.3%	10.5%
1.88	214.6	29.3	129.1	94.6%	12.4%	2.9%
2.25	139.1	24.6	123.6	26.1%	26.5%	7.1%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

Para el análisis del micro parámetro de razón de rigideces, se tiene que su valor calibrado corresponde a 1.5 [-], con lo cual su variación aplicada será un aumento y decremento de un 25 y 50% con respecto al valor calibrado. Se observa que este micro parámetro afecta a todas las propiedades de la roca, en donde el módulo de Young, el UCS y el módulo residual presentan una relación indirecta con el micro paramero kratio, es decir que el aumento de este último genera una disminución en todas las propiedades ya que este parámetro es el principal que controla la ductilidad y fragilidad de la muestra simulada. Para el caso del módulo residual, se obtiene una variación de un 290%, mientras que para el UCS de hasta un 10% y para el módulo de Young de hasta un 42%. Finalmente, se observa que el kratio genera un control sobre las propiedades elásticas de la roca.

- sb_mcf (Factor de contribución del momento)

La elección del micro parámetro factor de contribución del momento se debe a que es uno de los parámetros que más afectan al post peak del modelo SBM como

fue mencionado en el inciso anterior. Además, los valores seleccionados para el análisis buscan abarcar la totalidad del rango aplicable de este parámetro. En la Figura 4.16 y la Tabla 4.33 se presentan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del factor de contribución del momento (sb_mcf).

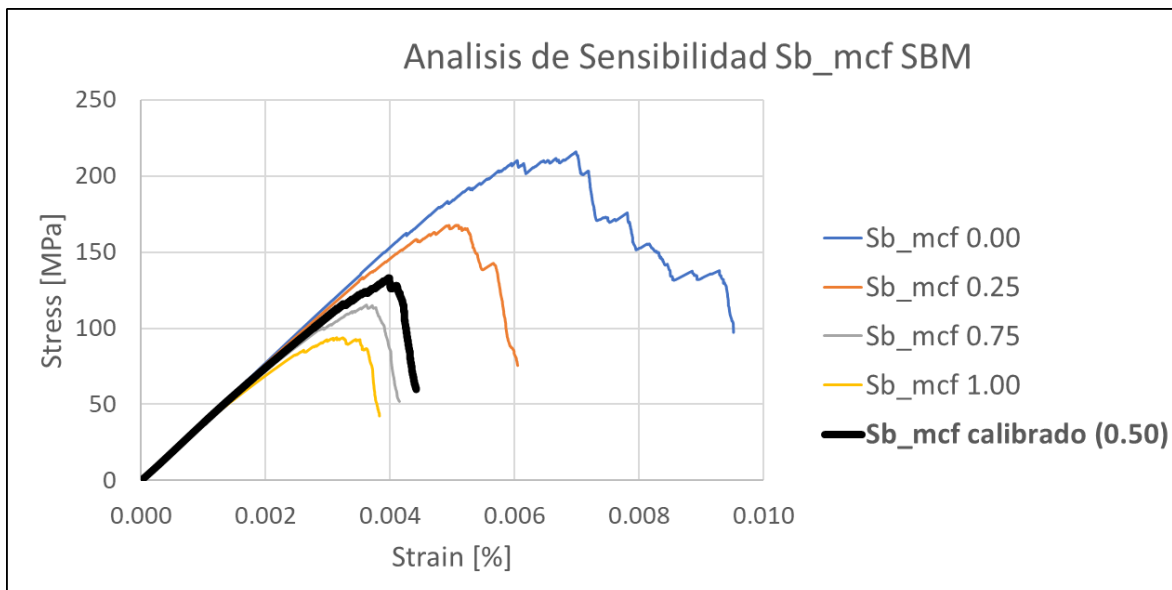


Figura 4.16: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro sb_mcf SBM.

Tabla 4.33: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad del sb_mcf .

Sb_mcf [-]	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]	Error Mod Residual SBM [%]	Error Mod. Young SBM [%]	Error UCS SBM [%]
0.00	30.4	35.2	215.9	72.4%	5.1%	62.4%
0.25	104.6	34.5	167.6	5.2%	3.0%	26.0%
0.75	196.3	32.5	115.3	78.0%	3.0%	13.3%
1.00	204.3	31.9	93.8	85.2%	4.7%	29.5%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

Para el análisis del micro parámetro del factor de contribución del momento, se tiene que su valor calibrado corresponde a 0.5 [-], esto debido a que se busca representar un punto intermedio entre los modelos BPM y SBM, ya que para el primero se considera un valor de 0 para el factor de contribución del momento, mientras que para el segundo su valor predeterminado es 1, pero se calibra con el valor intermedio para ver el comportamiento post peak del modelo SBM en su análisis de sensibilidad, además de así evitar el problema de la ausencia de la falla por corte en los ensayos de compresión (Potyondy, 2011), con lo cual, su variación aplicada es para analizar su comportamiento en todo su rango aplicable (valores entre 0 y 1). Se observa que este micro parámetro tiene una influencia directa sobre el módulo residual, en donde conforme se aumente el valor de sb_mcf , se aumenta

el módulo post peak, además, se genera una variación de hasta un 85%, por otro lado, el aumento de cut también genera una transición dúctil a frágil en el módulo residual. En el caso del UCS, se tiene una relación indirecta, es decir que conforme aumente el valor de cut, se disminuye el valor del UCS con una variación de hasta un 62%. Para el caso del módulo de Young, se tiene que este se ve afectando mínimamente por el micro parámetro, arrojando una variación máxima del 5% con respecto al valor de referencia. Finalmente, se observa que el sb_mcf genera un control principalmente sobre el UCS y el módulo residual.

A modo de resumen, en la Tabla 4.34 se muestran los máximos errores porcentuales de las propiedades de la roca para cada micro parámetro variado del modelo SBM.

Tabla 4.34: Máximas variaciones porcentuales de las propiedades de la roca para cada micro parámetro variado del modelo SBM.

Propiedad Roca	Soft [-]	Cut [-]	Kratio [-]	Sb_mcf [-]
σ_{UCS} [Mpa]	77.7%	77.6%	10.5%	62.4%
E [Gpa]	0.2%	0.0%	42.4%	5.1%
E_{res} [Gpa]	116.9%	93.6%	293.1%	85.2%

4.3.2. FCM

- Kratio (Razón de Rigideces)

La elección del micro parámetro Razón de Rigideces se debe a que es uno de los parámetros que más afectan al post peak del modelo FCM como fue mencionado en el inciso anterior. Además, los valores seleccionados para el análisis buscan aumentar y disminuir el valor calibrado en un 25 y 50%. En la Figura 4.17 y Tabla 4.35 se presentan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro razón de rigideces (kratio).

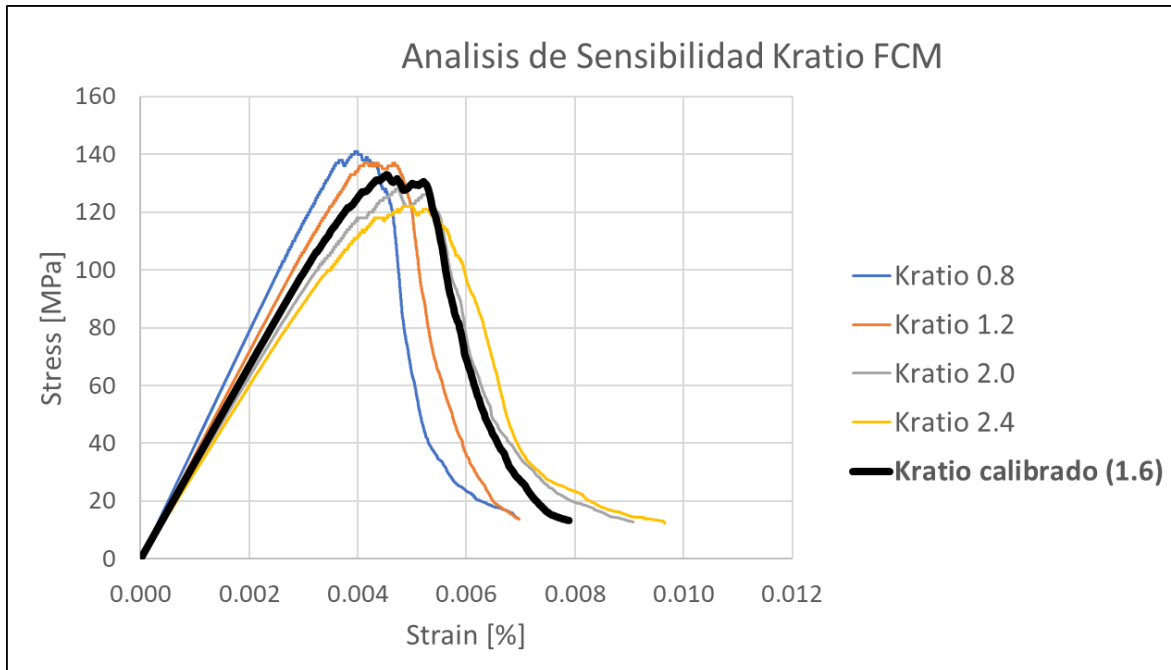


Figura 4.17: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro kratio FCM.

Tabla 4.35: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad del kratio - FCM.

Kratio [-]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]	Error Mod Residual FCM [%]	Error Mod. Young FCM [%]	Error UCS FCM [%]
0.8	151.2	39.0	141.5	37.1%	16.6%	6.4%
1.2	106.4	36.8	137.5	3.5%	10.0%	3.4%
2.0	81.6	31.3	128.3	26.0%	6.7%	3.5%
2.4	65.7	29.7	122.5	40.4%	11.4%	7.9%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

Para el análisis del micro parámetro de razón de rigideces, se tiene que su valor calibrado corresponde a 1.6 [-], con lo cual su variación aplicada será un aumento y decremento de un 25 y 50% con respecto al valor calibrado. Se observa que este micro parámetro afecta a todas las propiedades de la roca, en donde el módulo de Young, el UCS y el módulo residual presentan una relación indirecta con el micro paramero kratio, es decir que el aumento de este último genera una disminución en todas las propiedades ya que este parámetro es el principal que controla la ductilidad y fragilidad de la muestra simulada. Para el caso del módulo residual, se obtiene una variación de un 40%, mientras que para el UCS de hasta un 8% y para el módulo de Young de hasta un 17%. Finalmente, se observa que el kratio genera un control principalmente sobre las propiedades elásticas de la roca en su zona pre y post peak.

- Fricb (Fricción Partículas)

La elección del micro parámetro de la fricción de las partículas se debe a que es uno de los parámetros que más afectan al post peak del modelo FCM como fue mencionado en el inciso anterior. Además, los valores seleccionados para el análisis buscan abarcar la totalidad del rango aplicable de este parámetro. En la Figura 4.18 y Tabla 4.36 se presentan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro fricción de las partículas (fricb).

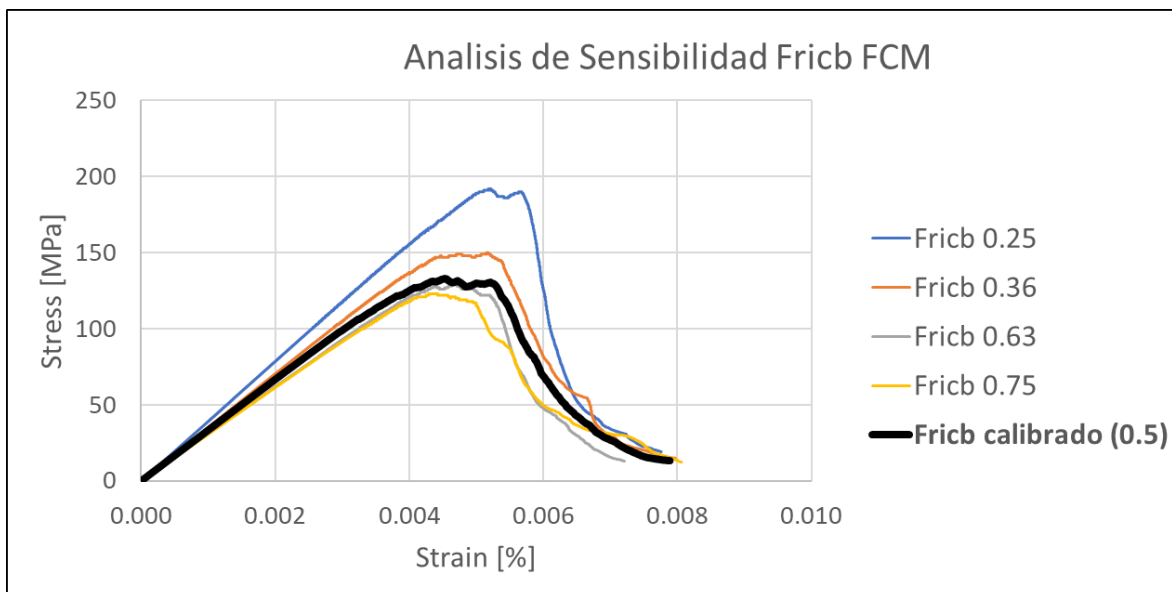


Figura 4.18: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro fricb FCM.

Tabla 4.36: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad de fricb - FCM.

Fricb [-]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]	Error Mod Residual FCM [%]	Error Mod. Young FCM [%]	Error UCS FCM [%]
0.25	170.2	39.1	192.5	54.3%	16.7%	44.7%
0.36	91.6	37.2	150.4	17.0%	11.2%	13.1%
0.63	101.7	30.9	130.4	7.8%	7.7%	2.0%
0.75	65.6	29.2	123.2	40.5%	13.0%	7.4%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

Para el análisis del micro parámetro de fricción de las partículas, se tiene que su valor calibrado es de 0.5 [-], con lo cual su variación aplicada es para analizar su comportamiento en todo su rango aplicable (valores entre 0 y 1). Se observa que este micro parámetro aparentemente tiene una influencia indirecta con el módulo residual, ya que al aumentar el valor de fricb, disminuye el valor de esta propiedad (con excepción de un punto), teniendo errores de hasta un 54%. El módulo de Young también tiene una relación indirecta con el fricb, ya que, si aumenta su valor,

disminuye el módulo post peak hasta un 16.7%, mientras que el UCS también tiene una influencia indirecta con el fricb, si aumenta este último, baja la resistencia a la compresión hasta un 44%. Finalmente, se observa que el micro parámetro fricb no tiene una tendencia clara en el comportamiento post peak, esto se puede deber a que conforme el fricb toma valores cercanos a sus extremos (0 y 1) se pierde el sentido físico de la fricción de la roca, ya que no son valores representativos de esta.

- Fj_fric (Fricción Contactos)

La elección del micro parámetro de la fricción de los contactos se debe a que es uno de los parámetros que más afectan al post peak del modelo FCM como fue mencionado en el inciso anterior. Además, los valores seleccionados para el análisis buscan abarcar la totalidad del rango aplicable de este parámetro. En la Figura 4.19 y Tabla 4.37 se presentan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro fricción de los contactos (fj_fric).

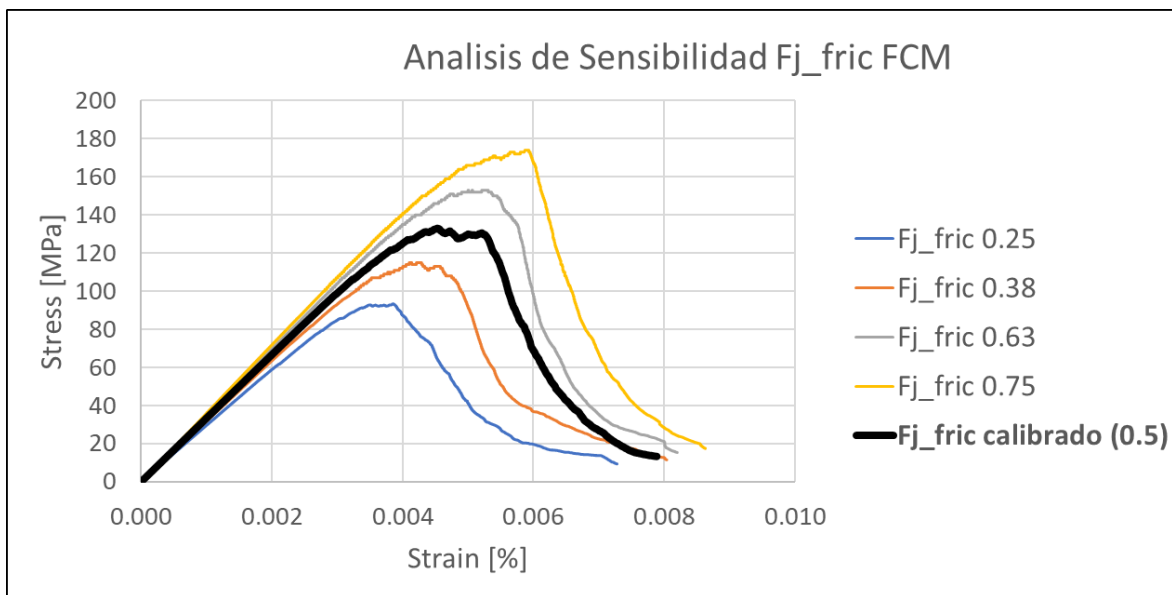


Figura 4.19: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro fj_fric FCM.

Tabla 4.37: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad de fj_fric - FCM.

Fj_fric [-]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]	Error Mod Residual FCM [%]	Error Mod. Young FCM [%]	Error UCS FCM [%]
0.25	49.1	30.7	93.4	55.5%	8.5%	29.8%
0.38	82.4	31.5	115.3	25.3%	6.1%	13.3%
0.63	108.2	36.1	153.5	1.9%	7.9%	15.4%
0.75	106.7	37.5	174.9	3.3%	11.8%	31.5%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

Para el análisis del micro parámetro de fricción de los contactos, se tiene que su valor calibrado es de 0.5 [-], con lo cual su variación aplicada es para analizar su comportamiento en todo su rango aplicable (valores entre 0 y 1). Se observa que este micro parámetro aparentemente tiene una influencia directa con el módulo residual, módulo de Young y UCS ya que al aumentar el valor de μ , aumenta el valor de estas propiedades, teniendo errores de hasta un 55% para el módulo residual, un 12% para el módulo de Young, y un 32% para el UCS. Finalmente, se observa que la modificación de este parámetro afecta a más de una propiedad de la roca, principalmente a las propiedades mecánicas pre peak y las propiedades elásticas post peak.

- Emod (Módulo de Young contactos)

La elección del micro parámetro del módulo de Young de los contactos se debe a que es uno de los parámetros que más afectan al post peak del modelo FCM como fue mencionado en el inciso anterior. Además, los valores seleccionados para el análisis buscan aumentar y disminuir el valor calibrado en un 25 y 50%. En la Figura 4.20 y Tabla 4.38 se presentan los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad del parámetro del módulo de Young de los contactos (emod).

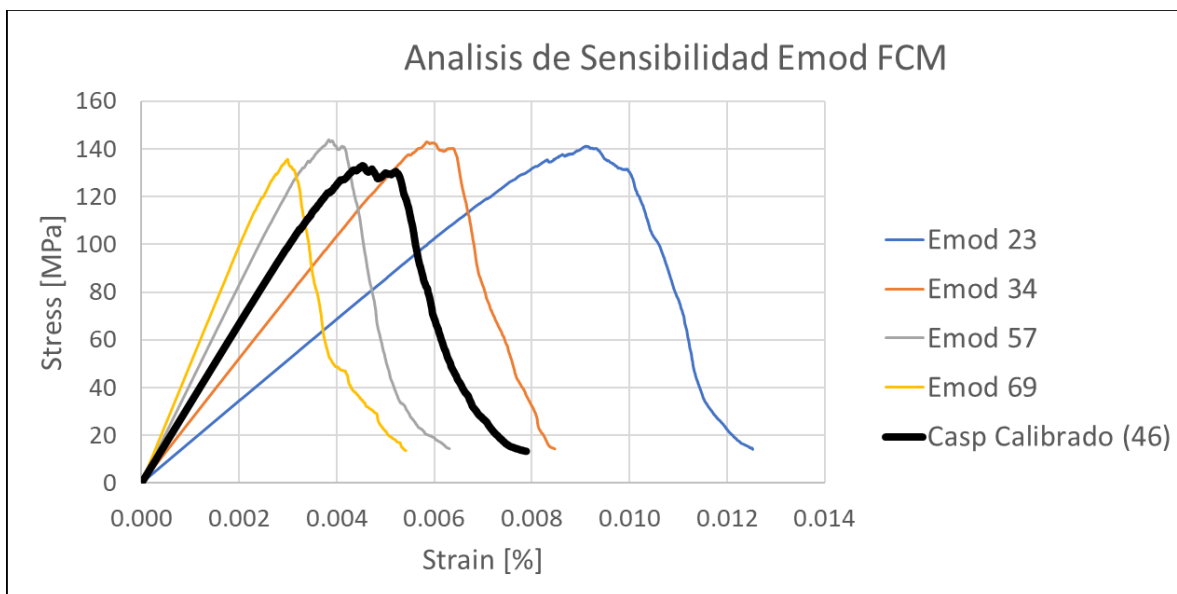


Figura 4.20: Curvas obtenidas a partir del análisis de sensibilidad del micro parámetro emod FCM.

Tabla 4.38: Resultados del módulo residual obtenido a partir del análisis de sensibilidad de emod - FCM.

Emod [GPa]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]	Error Mod Residual FCM [%]	Error Mod. Young FCM [%]	Error UCS FCM [%]
23.0	32.4	25.1	136.4	70.6%	25.1%	2.6%
34.5	62.4	22.8	140.4	43.4%	32.1%	5.6%
57.5	89.5	37.9	141.2	18.9%	13.2%	6.2%
69.0	94.8	42.0	139.4	14.1%	25.3%	4.8%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

Para el análisis del micro parámetro del módulo de Young de los Contactos, se tiene que su valor calibrado es de 46 [GPa], con lo cual su variación aplicada es de un aumento y decremento del 25% y 50%, por otro lado, cabe destacar que esta variación se hizo manteniendo la relación de $emod = 1.5 \cdot emodb$. Se observa que esta micro propiedad tiene una influencia directa sobre el módulo residual y el módulo de Young, en donde conforme se aumenta el valor de emod, aumenta el valor de estas propiedades, mientras que, para el UCS no hay una influencia presente, resultando en variaciones de hasta un 5%. Finalmente, se observa el fj_fric controla principalmente las propiedades elásticas pre y post peak de la roca.

A modo de resumen, en la Tabla 4.39 se muestran los máximos errores porcentuales de las propiedades de la roca para cada micro parámetro variado del modelo FCM.

Tabla 4.39: Máximas variaciones porcentuales de las propiedades de la roca para cada micro parámetro variado del modelo FCM.

Propiedad Roca	Kratio [-]	Fricb [-]	Fj_fric [-]	Emod [GPa]
σ_{UCS} [Mpa]	7.9%	44.7%	31.5%	5.6%
E [Gpa]	16.6%	16.7%	11.8%	32.1%
E_{res} [Gpa]	40.4%	54.3%	55.5%	70.6%

Finalmente, se tiene que ambos modelos pueden modificar su respuesta en el post peak, aunque dicha modificación también se hace presente en las propiedades pre peak del modelo, esto era de esperarse ya que como se mencionó en el Inciso 2.4, los modelos matemáticos que simulan la roca son multivariantes, lo que implica que una parámetro que defina el modelo, puede modificar más de una respuesta de este. Aunque, para cada modelo se pudo definir cierto micro parámetros que influyen de mayor manera en su comportamiento post peak.

4.4. Combinaciones

Luego de haber realizado en análisis de sensibilidad de ambos modelos, se prosigue con las combinaciones de micro parámetros de cada modelo como fue

mencionado en el Inciso 3.6, en donde se analizará la respuesta de los modelos ante la variación de dos parámetros (los seleccionados en el análisis de sensibilidad Tabla 3.4). El objetivo de realizar estas combinaciones es encontrar algún parámetro que no tenga interacción con otro con respecto a resultados que se obtienen del módulo residual. La forma de lograr esto es con la ya mencionada gráfica de interacción (Inciso 3.6), en donde se grafican los resultados de las combinaciones de dos micro parámetros, en donde uno de los parámetros se deja fijo mientras el otro se varía 2 veces, y luego se realiza a la inversa, dejando el otro parámetro fijo y variando el primero, luego se grafica el módulo residual vs uno de los parámetros (A), mientras el otro parámetro (B) no va en ningún eje del gráfico, luego quedan 4 puntos en el gráfico, posteriormente se unen los puntos en donde el valor de A cambia y se mantiene constante el parámetro B, quedando 2 rectas, además de realizar la misma recta pero con el valor de referencia. Cabe destacar que se utilizarán los valores extremos de cada variación realizada en el análisis de sensibilidad, es decir que se usarán los aumentos y decrementos del 50% con respecto al valor calibrado del micro parámetro correspondiente (ya que el aumento y decremento del 25% está contenido en este resultado). Finalmente, se combinarán todos los parámetros seleccionados entre sí con los valores anteriormente mencionados, obteniendo 24 simulaciones divididas en 6 distintas combinaciones para cada modelo.

4.4.1. Combinaciones SBM

Como ya fue mencionado, se combinan todos los micro parámetros seleccionados dentro del modelo SBM, en donde se usan el valor mínimo y máximo de cada micro parámetro, obteniendo 24 distintas simulaciones, divididas en 6 combinaciones de micro parámetros (4 simulaciones por combinación). Los micro parámetros seleccionados junto con sus valores a usar se observan en la Tabla 4.41 (los demás micro parámetros usarán su valor calibrado), además en la Tabla 4.40 se pueden observar como son las combinaciones a realizar gracias al código que identifica a cada variable, es decir que la Combinación 1-5 corresponde a soft con un valor de 0 [-] junto a cut con un valor de 0.5 [-], y la Combinación 1-9 corresponde a la combinación de soft con un valor de 0 [-] y kratio con un valor de 0.75 [-], la combinación 1-13 es soft con valor 0 [-] y sb_mcf de 0 [-]; mientras que la combinación 4-5 es soft con valor de 60 [-] y cut con valor de 1 [-]; combinación 4-9 es soft con valor de 60 y kratio con valor de 2.25; combinación 4-13 es soft con valor de 60 [-] y sb_mcf de 1 [-]; esto se sigue análogamente para el resto de las combinaciones. Cabe destacar que se usan los 2 decimales de los valores para así representar el valor de manera precisa del valor variado en su porcentaje correspondiente.

Tabla 4.40: Matriz de combinaciones para SBM.

1-5	4-5	5-9	8-9	9-13	12-13
1-8	4-8	5-12	8-12	9-16	12-16
1-9	4-9	5-13	8-13	-	-
1-12	4-12	5-16	8-16	-	-
1-13	4-13	-	-	-	-
1-16	4-16	-	-	-	-

Tabla 4.41: Parámetros seleccionado y sus respectivos valores para las combinaciones SBM.

1	soft	0	4	soft	60
5	cut	0.25	8	cut	1.00
9	kratio	0.75	12	kratio	2.25
13	sb_mcf	0.0	16	sb_ten	1.0

- Combinación Soft-cut

En la Figura 4.21 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre soft y cut correspondientes a 1-5 (soft 0 y cut 0.25), 1-8 (soft 0 y cut 1), 4-5 (soft 60 y cut 0) y 4-8 (soft 60 y cut 1) y los resultados en la Tabla 4.42. En la Figura 4.22 y Tabla 4.43 se presentan los resultados obtenidos del módulo residual.

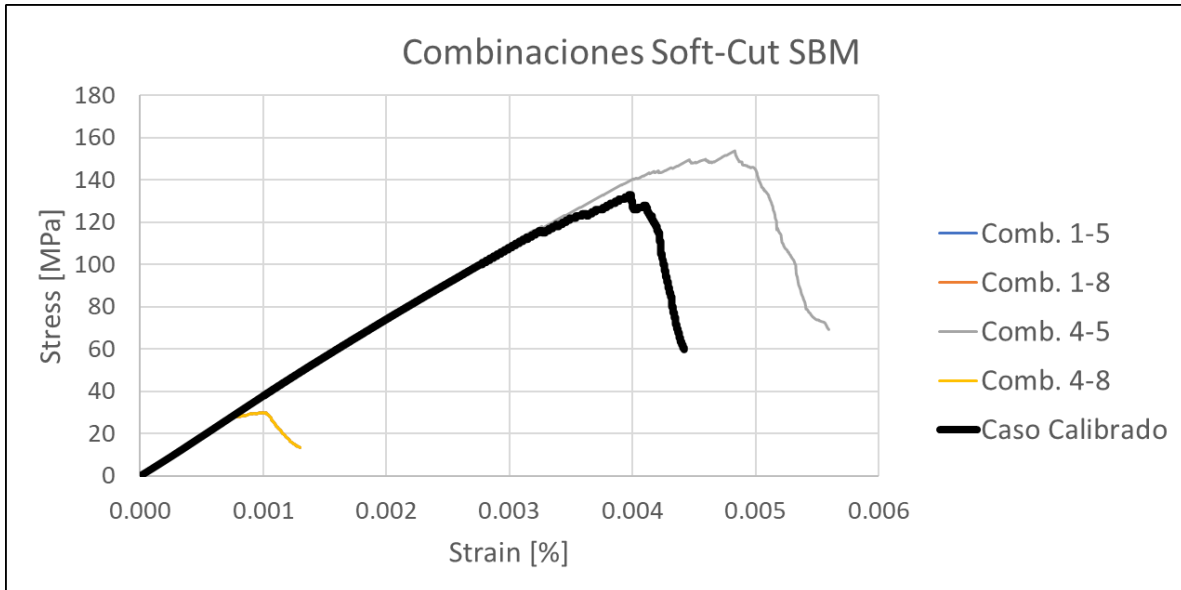


Figura 4.21: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre soft y cut SBM.

Tabla 4.42: Resultados de la interacción entre soft y cut SBM.

Comb.	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]	Error Mod Residual SBM [%]	Error Mod. Young SBM [%]	Error UCS SBM [%]
1-5	167.7	36.7	155.4	52.0%	9.6%	16.9%
1-8	69.7	37.6	30.5	36.8%	12.3%	77.1%
4-5	167.7	36.7	155.4	52.0%	9.6%	16.9%
4-8	69.7	37.6	30.5	36.8%	12.3%	77.1%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

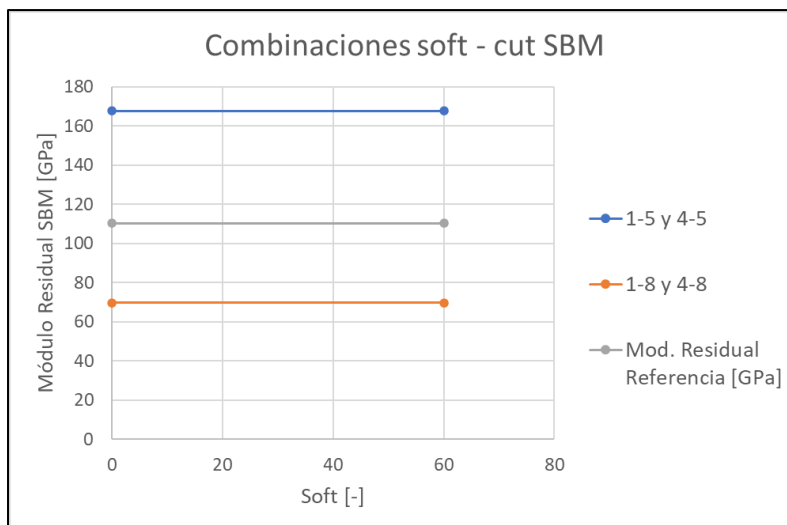


Figura 4.22: Resultados de la interacción entre soft y cut SBM.

Tabla 4.43: Combinaciones formadas por soft y cut con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro soft SBM [-]	Micro parámetro cut SBM [-]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
1-5	0	0.25	167.7	0.0
4-5	60	0.25	167.7	
1-8	0	1.00	69.7	0.0
4-8	60	1.00	68.7	

Se puede observar que la combinación 1-5 (soft 0 y cut 0) y combinación 4-5 (soft 60 y cut 0) entregan resultados iguales entre sí; y la combinación 1-8 (soft 0 y cut 1) y combinación 4-8 (soft 60 y cut 1) igualmente entregan resultados similares entre sí, con lo cual en la Figura 22 están superpuestas entre sí.

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre el factor de ablandamiento (soft) y el factor de ablandamiento por resistencia a la tracción (cut) son paralelas entre sí, ya que poseen la misma pendiente, esto indica que las variables de soft y cut no presentan un grado de interacción entre ellas. Las combinaciones de soft y cut también modifican las propiedades pre peak de la muestra, principalmente el UCS, ya que como se observa en el análisis de sensibilidad, esto dos micro parámetros controlan principalmente la respuesta de la resistencia a la compresión de la roca. Finalmente, se observa que las rectas de las combinaciones no logran interceptar a la recta de referencia, lo cual nos dice que en este caso no se podría llegar al valor de referencia del módulo residual.

- **Combinación Soft-kratio**

En la Figura 4.23 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre soft y kratio correspondientes a 1-9 (soft 0 y kratio 0.75), 1-12 (soft 0 y kratio 2.25), 4-9 (soft 60 y kratio 1.25) y 4-12 (soft 60 y kratio 2.25) y

los resultados en la Tabla 4.44. En la Figura 4.24 se muestra el gráfico de interacción obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.45, se presentan los resultados obtenidos del módulo residual.

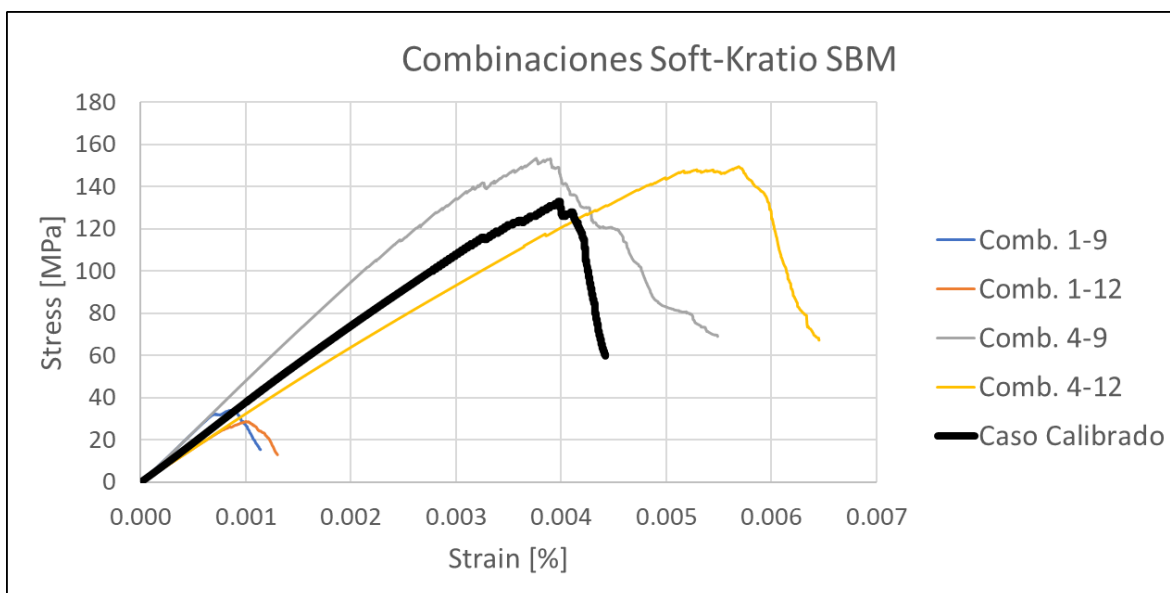


Figura 4.23: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre soft y kratio SBM.

Tabla 4.44: Resultados de la interacción entre soft y kratio SBM.

Comb.	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]	Error Mod Residual SBM [%]	Error Mod. Young SBM [%]	Error UCS SBM [%]
1-9	78.7	47.5	34.2	28.6%	41.7%	74.3%
1-12	61.8	32.1	28.8	44.0%	4.1%	78.3%
4-9	52.8	47.7	153.3	52.1%	42.4%	15.2%
4-12	122.5	31.8	151.2	11.1%	5.2%	13.7%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

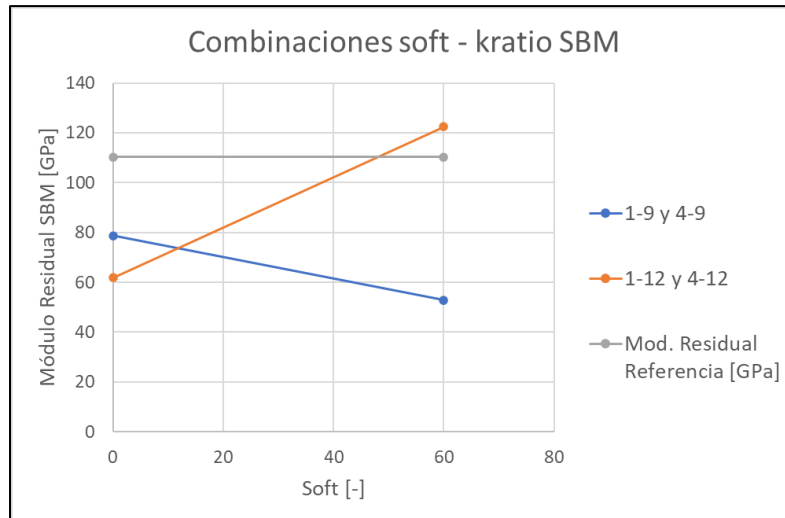


Figura 4.24: Resultados de la interacción entre soft y kratio SBM.

Tabla 4.45: Combinaciones formadas por soft y kratio con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro soft SBM [-]	Micro parámetro kratio SBM [-]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
1-9	0	0.75	78.7	-0.4
4-9	60	0.75	52.8	
1-12	0	2.25	61.8	1.0
4-12	60	2.25	122.5	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre el factor de ablandamiento (soft) y la razón de rigideces (kratio) presentan un comportamiento del tipo no ordinal, es decir que hay una interacción presente entre estas dos variables con respecto a la respuesta del módulo residual. Para el módulo residual se tiene que las combinaciones varían hasta un 52% la respuesta de este. Las combinaciones de soft y kratio también modifican todas las propiedades pre peak de la muestra, en el caso del módulo de Young este varía hasta un 42%, mientras que el UCS varía hasta un 74%, debido a que el soft controla principalmente la respuesta de la mecánica de la roca (UCS), y el kratio tiene el control sobre la respuesta elástica de la roca. Finalmente, se observa que la recta naranja (soft 0 y 60; kratio 2.25) a priori puede llegar al valor de referencia del módulo de Young, ya que cruza la recta del valor de referencia. Se debiese utilizar un valor de soft de 50 aproximadamente.

- Combinación Soft-sb_mcf

En la Figura 4.25 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre soft y sb_mcf correspondientes a 1-13 (soft 0 y sb_mcf 0), 1-16 (soft 0 y sb_mcf 1), 4-13 (soft 60 y sb_mcf 0) y 4-16 (soft 60 y sb_mcf 1) y los resultados en la Tabla 4.46. En la Figura 4.26 se muestra el gráfico de interacción

obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.47, se presentan los resultados obtenidos del módulo residual.

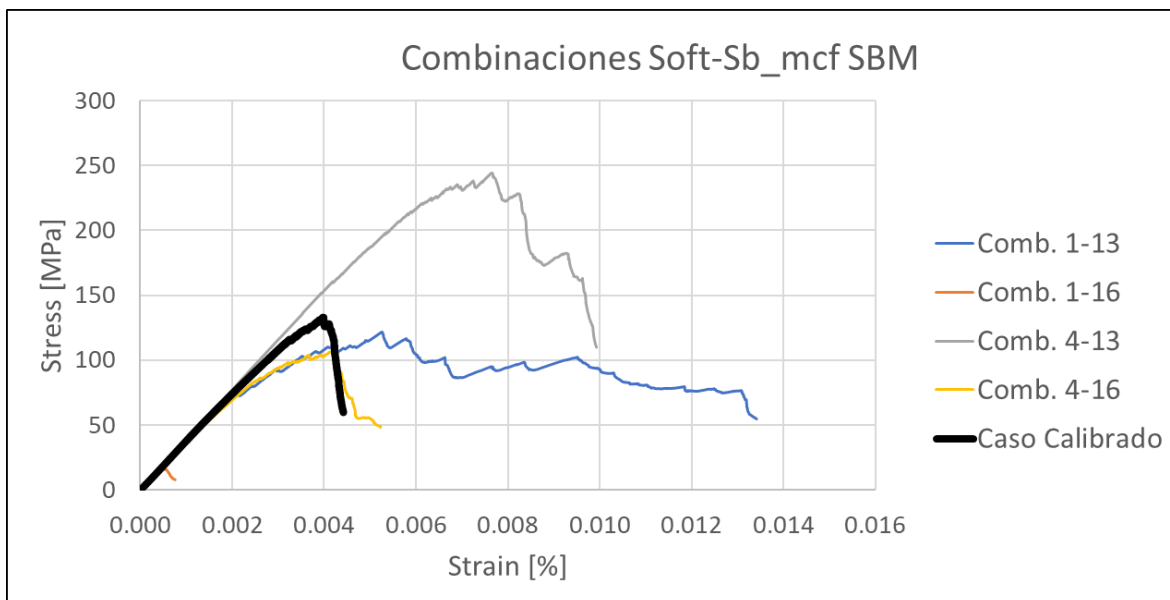


Figura 4.25: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre soft y sb_mcf SBM.

Tabla 4.46: Resultados de la interacción entre soft y sb_mcf SBM.

Comb.	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]	Error Mod Residual SBM [%]	Error Mod. Young SBM [%]	Error UCS SBM [%]
1-13	4.0	31.4	122.6	96.4%	6.3%	7.8%
1-16	43.4	36.7	174.3	60.7%	9.6%	31.0%
4-13	45.3	38.2	244.2	58.9%	14.0%	83.6%
4-16	101.5	34.8	107.3	8.0%	3.9%	19.4%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

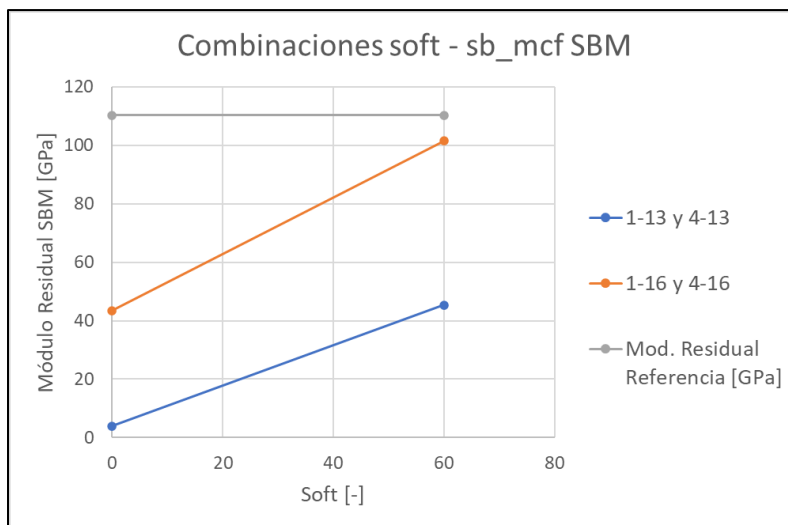


Figura 4.26: Resultados de la interacción entre soft y sb_mcf SBM.

Tabla 4.47: Combinaciones formadas por soft y sb_mcf con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro soft SBM [-]	Micro parámetro sb_mcf SBM [-]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
1-13	0	0.0	3.9	0.7
4-13	60	0.0	45.3	
1-16	0	1.0	43.4	1.0
4-16	60	1.0	101.5	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre el factor de ablandamiento (soft) y el factor de contribución del momento (sb_mcf) presentan un comportamiento del paralelo, es decir que no hay una interacción presente entre estas dos variables con respecto a la respuesta del módulo residual. Para el módulo residual se tiene que las combinaciones varían hasta un 96% la respuesta de este. Las combinaciones de soft y sb_mcf también modifican todas las propiedades pre peak de la muestra, en el caso del módulo de Young este varia hasta un 14%, mientras que el UCS varia hasta un 84%, debido a que el soft controla principalmente la respuesta del mecánica de la roca (UCS), y el sb_mcf tiene el control sobre la respuesta elástica de la roca. Finalmente, se observa que las rectas de las combinaciones no logran interceptar a la recta de referencia, lo cual nos dice que en este caso no se podría llegar al valor de referencia del módulo residual.

- Combinación Cut-kratio

En la Figura 4.27 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre cut y kratio correspondientes a 5-9 (cut 0.25 y kratio 0.75), 5-12 (cut 0.25 y kratio 2.25), 8-9 (cut 1 y kratio 0.75) y 8-12 (cut 1 y kratio 2.25) y los resultados en Tabla 4.48. En la Figura 4.28 se muestra el gráfico de interacción obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.49, se presentan los resultados obtenidos del módulo residual.

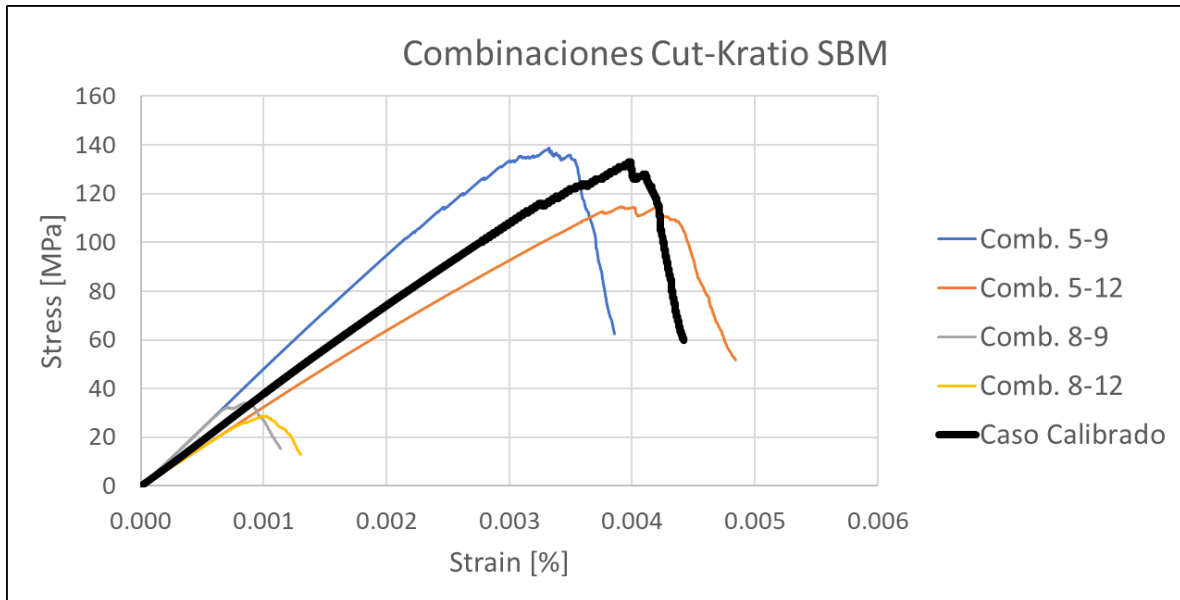


Figura 4.27: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre cut y kratio SBM.

Tabla 4.48: Resultados de la interacción entre cut y kratio SBM.

Comb.	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]	Error Mod Residual SBM [%]	Error Mod. Young SBM [%]	Error UCS SBM [%]
5-9	224.2	47.6	139.5	103.3%	42.1%	4.9%
5-12	127.0	31.2	115.3	15.1%	7.0%	13.3%
8-9	79.6	47.5	34.3	27.8%	41.6%	74.2%
8-12	58.7	32.1	28.3	46.8%	4.1%	116.8%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

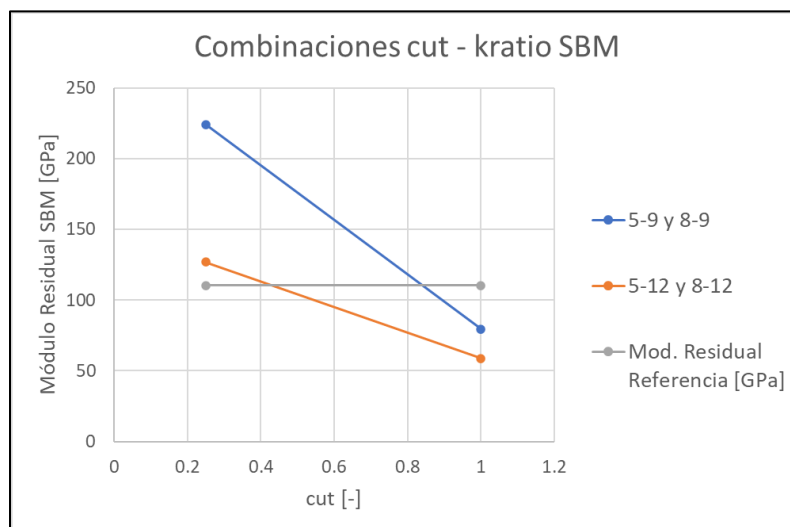


Figura 4.28: Resultados de la interacción entre cut y kratio SBM.

Tabla 4.49: Combinaciones formadas por cut y kratio con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro cut SBM [-]	Micro parámetro kratio SBM [-]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
5-9	0.25	0.75	224.2	-192.8
8-9	1.00	0.75	79.6	
5-12	0.25	2.25	127.0	-91.1
8-12	1.00	2.25	58.7	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre el factor de ablandamiento por resistencia a la tracción (cut) y la razón de rigideces (kratio) presentan un comportamiento del tipo mixto, es decir que hay una interacción considerable entre estas dos variables que se puede considerar una interacción no ordinal con respecto a la respuesta del módulo residual. Para el módulo residual se tiene que las combinaciones varían hasta un 103% la respuesta de este. Las combinaciones de cut y kratio también modifican todas las propiedades pre peak de la muestra, en el caso del módulo de Young este varia hasta un 42%, mientras que el UCS varia hasta un 117%, debido a que el cut controla principalmente la respuesta del mecánica de la roca (UCS), y el kratio tiene el control sobre la respuesta elástica de la roca. Por otro lado, se observa que cuando cut toma un valor de 1, restringe los valores del UCS teniendo un erro mínimo del 74% debido a la relación indirecta que hay entre el UCS y el cut. Finalmente, se observa que ambas rectas logran interceptar la recta de referencia, utilizando un valor de kratio de 0.75 y cut 0.4 aproximadamente, se puede llegar al valor de referencia; igualmente si se utiliza un kratio de 2.25 y un cut de 0.8 aproximadamente.

- Combinación Cut-sb_mcf

En la Figura 4.29 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre cut y sb_mcf correspondientes a 5-13 (cut 0.25 y sb_mcf 0), 5-16 (cut 0.25 y sb_mcf 1), 8-13 (cut 1 y sb_mcf 0) y 8-16 (cut 1 y sb_mcf 1) y los resultados en la Tabla 4.50. En la Figura 4.30 se muestra el gráfico de interacción obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.51, se presentan los resultados obtenidos del módulo residual.

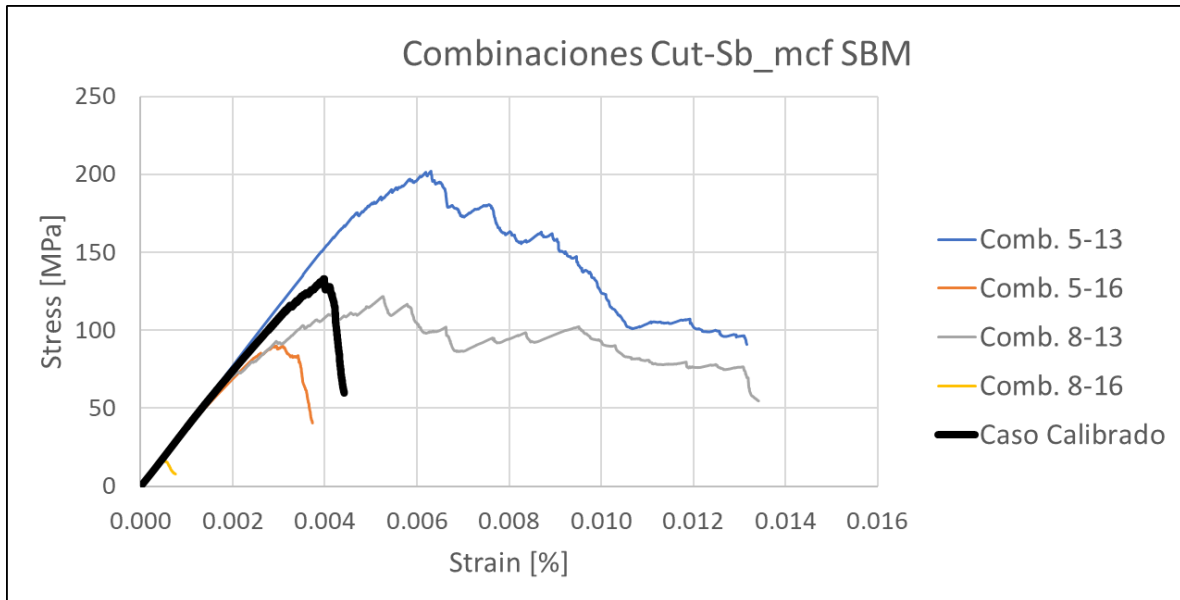


Figura 4.29: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre cut y sb_mcf SBM.

Tabla 4.50: Resultados de la interacción entre cut y sb_mcf SBM.

Comb.	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]	Error Mod Residual SBM [%]	Error Mod. Young SBM [%]	Error UCS SBM [%]
5-13	18.1	37.3	202.4	83.6%	11.4%	52.2%
5-16	136.6	34.7	90.2	23.8%	3.6%	32.2%
8-13	3.9	32.2	122.3	96.5%	3.8%	8.0%
8-16	43.1	36.7	17.0	60.9%	9.6%	87.2%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

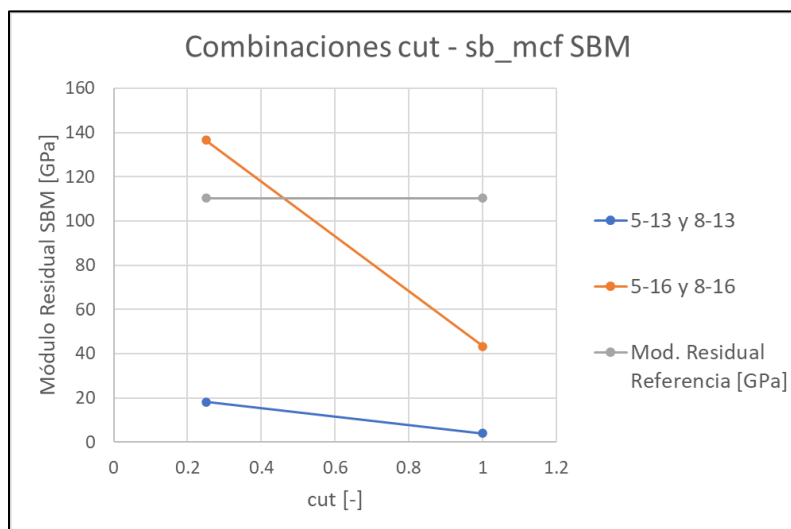


Figura 4.30: Resultados de la interacción entre cut y sb_mcf SBM.

Tabla 4.51: Combinaciones formadas por cut y sb_mcf con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro cut SBM [-]	Micro parámetro sb_mcf SBM [-]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
1-5	0.25	0.0	18.1	-118.5
4-5	1.00	0.0	3.9	
1-8	0.25	1.0	136.6	-39.4
4-8	1.00	1.0	43.3	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre el factor de ablandamiento por resistencia a la tracción (cut) y el factor de contribución del momento (sb_mcf) presentan un comportamiento del tipo ordinal negativa, es decir que existe una considerable interacción entre estos parámetros en la respuesta del módulo residual. Las combinaciones de cut y sb_mcf también modifican las respuestas de las propiedades pre peak, en el caso del módulo de Young lo varía un 11%, en el caso del UCS se varía un 87%, esto debido a que el cut controla principalmente la respuesta del UCS y el sb_mcf la respuesta del módulo residual. En este caso cuando cut toma un valor de 1 y sb_mcf un valor de 0, el modelo logra subir el valor del UCS, a diferencia de la combinación cut-kratio, pero en la combinación de cut igual a 1 y sb_mcf igual a 1, nuevamente el UCS se ve bastante restringido. Finalmente, se observa que la recta naranja logra interceptar la recta de referencia, usando un sb_mcf igual a 1 y un cut igual a 0.5, se debiese llegar al valor de referencia.

- Combinación Kratio-sb_mcf

En la Figura 4.31 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre kratio y sb_mcf correspondientes a 9-13 (kratio 0.75 y sb_mcf 0), 9-16 (kratio 0.75 y sb_mcf 1), 12-13 (kratio 2.25 y sb_mcf 0) y 12-16 (kratio 2.25 y sb_mcf 1) y los resultados en la Tabla 4.52. En la Figura 4.32 se muestra el gráfico de interacción obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.53, se presentan los resultados obtenidos del módulo residual.

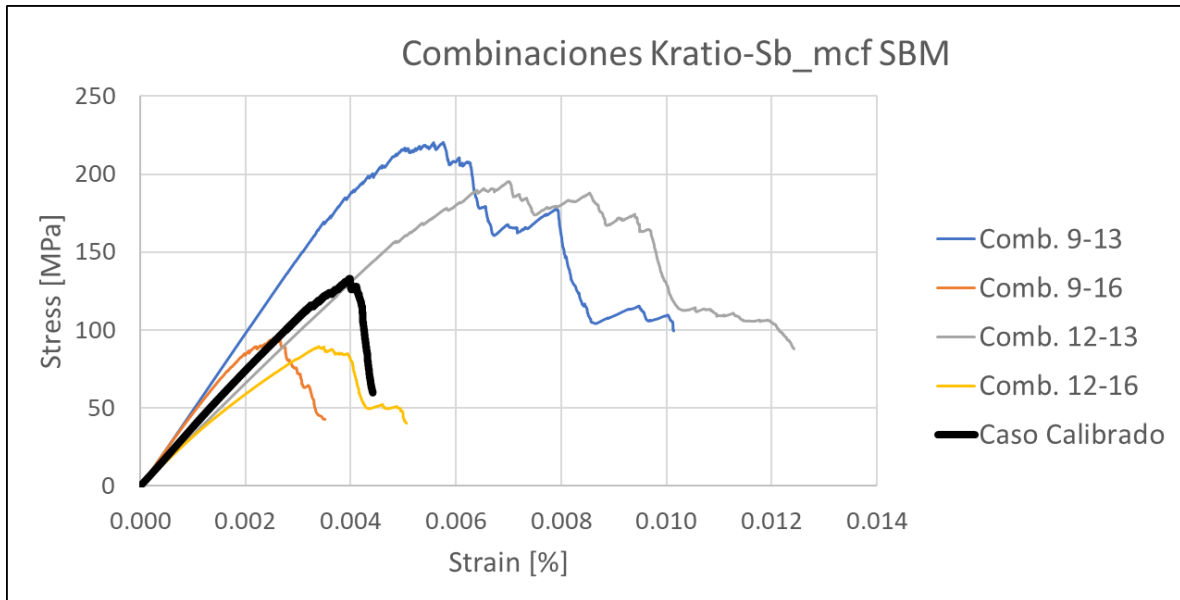


Figura 4.31: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre *kratio* y *sb_mcf* SBM.

Tabla 4.52: Resultados de la interacción entre *kratio* y *sb_mcf* SBM.

Comb.	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]	Error Mod. Residual SBM [%]	Error Mod. Young SBM [%]	Error UCS SBM [%]
9-13	25.9	49.1	220.3	76.5%	46.6%	65.7%
9-16	69.3	45.6	94.9	37.2%	36.1%	28.6%
12-13	21.2	32.8	195.0	80.8%	2.0%	46.6%
12-16	101.2	27.8	89.4	8.3%	17.0%	32.8%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

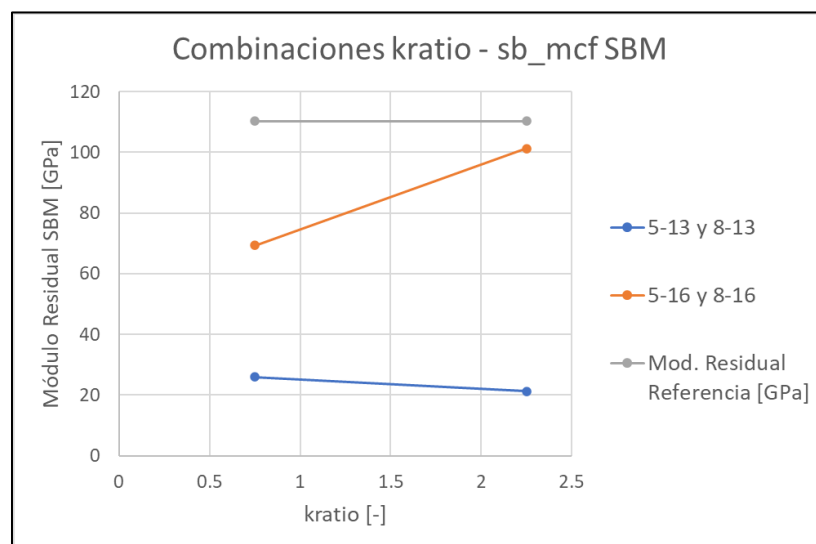


Figura 4.32: Resultados de la interacción entre *kratio* y *sb_mcf* SBM.

Tabla 4.53: Combinaciones formadas por kratio y sb_mcf con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro kratio SBM [-]	Micro parámetro sb_mcf SBM [-]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
5-13	0.75	0.0	25.9	-3.1
8-13	2.25	0.0	21.2	
5-16	0.75	1.0	69.3	21.3
8-16	2.25	1.0	101.2	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre la razón de rigideces (kratio) y el factor de contribución del momento (sb_mcf) presentan un comportamiento del tipo ordinal positiva, es decir que existe una considerable interacción entre estos parámetros en la respuesta del módulo residual. Para dicha propiedad, su valor varía hasta un 81%. Las propiedades pre peak también se ven afectadas, en el caso del UCS, este varía hasta un 65% y el módulo de Young hasta un 47%, esto debido a que el kratio controla principalmente las propiedades elásticas de la roca pre y post peak, y el sb_mcf controla el UCS en la zona pre peak, y al módulo residual en la zona post peak. Finalmente, se observa que las rectas de las combinaciones no logran interceptar a la recta de referencia, lo cual nos dice que en este caso no se podría llegar al valor de referencia del módulo residual.

4.4.2. Combinaciones FCM

Como ya fue mencionado, se combinan todos los micro parámetros seleccionados dentro del modelo FCM, en donde se usan el valor mínimo y máximo de cada micro parámetro, obteniendo 24 simulaciones divididas en 6 distintas combinaciones de micro parámetros (4 simulaciones por cada combinación de micro parámetros). Los micro parámetros seleccionados junto con sus valores (y un número identificador) a usar se observan en la Tabla 4.55 Tabla 4.41 (los demás micro parámetros usaran su valor calibrado), además en la Tabla 4.54; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se pueden observar como son los combinaciones a realizar gracias al código que identifica a cada variable, es decir que la Combinación 1-5 corresponde a kratio con un valor de 0.8 [-] junto a fricb con un valor de 0.25 [-], y la Combinación 1-9 corresponde a la combinación de kratio con un valor de 0.8 [-] y fj_fric con un valor de 0.25 [-], la combinación 1-13 corresponde a kratio con valor de 0.8 [-] y emod con valor de 23 [GPa], mientras que la combinación 4-5 corresponde a kratio con valor de 2.4 [-] y fricb con valor de 0.75 [-], la combinación 4-9 corresponde a kratio con valor de 2.4 [-] y fj_fric con valor de 0.25 [-], y la combinación 4-13 corresponde a kratio con valor de 2.4 [-] y emod con valor de 69 [GPa], y así sucesivamente para el resto de los micro parámetros y su código identificador. Cabe destacar que se usan los 2 decimales de los valores para así representar el valor de manera precisa del valor variado en su porcentaje correspondiente.

Tabla 4.54: Matriz de combinaciones para FCM.

1-5	4-5	5-9	8-9	9-13	12-13
1-8	4-8	5-12	8-12	9-16	12-16
1-9	4-9	5-13	8-13	-	-
1-12	4-12	5-16	8-16	-	-
1-13	4-13	-	-	-	-
1-16	4-16	-	-	-	-

Tabla 4.55: Parámetros seleccionados y sus respectivos valores para las combinaciones FCM.

1	kratio	0.8	4	kratio	2.4
5	fricb	0.25	8	fricb	0.75
9	fj_fric	0.25	12	fj_fric	0.75
13	emod	23	16	emod	69

- Combinación Kratio-fricb

En la Figura 4.33 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre kratio y fricb correspondientes a 1-5 (kratio 0.8 y fricb 0.25), 1-8 (kratio 0.8 y fricb 0.75), 4-5 (kratio 2.4 y fricb 0.25) y 4-8 (kratio 2.4 y fricb 0.75) y en la Tabla 4.56 se presentan los resultados. En la Figura 4.34 se muestra el gráfico de interacción obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.57, se presentan los resultados del módulo residual.

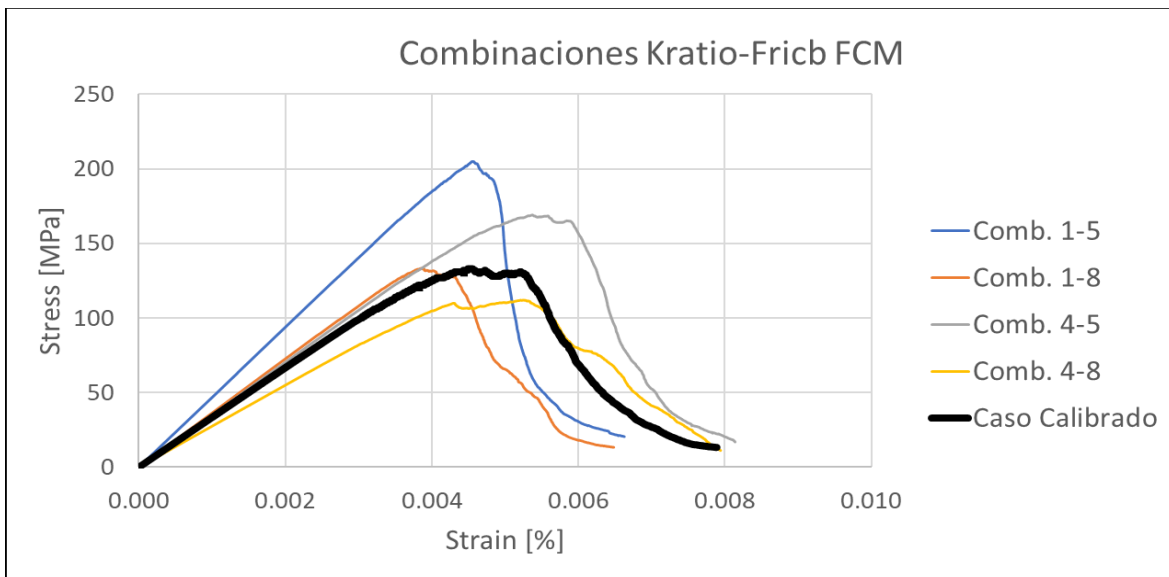


Figura 4.33: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre kratio y fricb - FCM.

Tabla 4.56: Resultados de la interacción entre kratio y fricb FCM.

Comb.	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]	Error Mod Residual FCM [%]	Error Mod. Young FCM [%]	Error UCS FCM [%]
1-5	294.9	46.8	205.4	167.4%	39.8%	54.4%
1-8	66.6	39.3	135.6	39.6%	17.2%	1.9%
4-5	124.2	38.1	169.4	12.6%	13.8%	27.3%
4-8	37.8	27.4	112.9	65.7%	18.2%	15.1%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

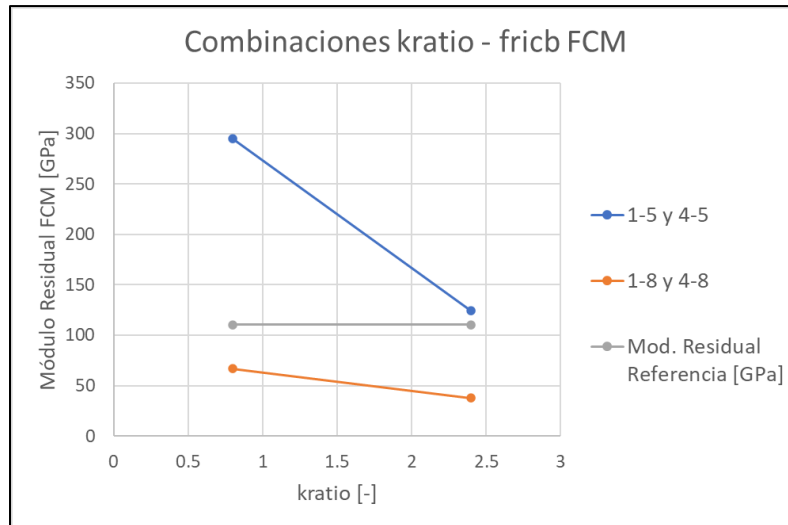


Figura 4.34: Resultados de la interacción entre kratio y fricb FCM

Tabla 4.57: Combinaciones formadas por kratio y fricb con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro kratio FCM [-]	Micro parámetro fricb FCM [-]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
1-5	0.8	0.25	294.9	-106.7
4-5	2.4	0.25	124.2	
1-8	0.8	0.75	66.6	-21.3
4-8	2.4	0.75	37.8	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre la razón de rigideces (kratio) y la fricción de las partículas (fricb) presenta un comportamiento del tipo ordinal negativa, es decir que presenta un considerable grado de interacción entre estas variables con respecto al módulo residual. Para dicha propiedad, se tiene una variación de hasta 167%. Las combinaciones de kratio y fricb también modifican la respuesta de las propiedades pre peak, para el caso del UCS se tiene una variación de hasta un 54% y para el módulo de Young de hasta un 40%, esto debido que el micro parámetro kratio controla principalmente la respuesta elástica de la roca, mientras que la fricción de las partículas afecta principalmente el UCS. Finalmente, se observa que las rectas de las combinaciones no logran interceptar a la recta de referencia, lo cual nos dice que en este caso no se podría llegar al valor de referencia del módulo residual. Finalmente, se observa que las rectas de las combinaciones no logran interceptar a la recta de referencia, lo cual nos dice que en este caso no se podría llegar al valor de referencia del módulo residual.

- Combinación Kratio-fj_fric

En la Figura 4.35 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre kratio y fj_fric correspondientes a 1-9 (kratio 0.8 y fj_fric 0.25), 1-12 (kratio 0.8 y fj_fric 0.75), 4-9 (kratio 2.4 y fj_fric 0.25) y 4-12 (kratio 2.4 y

fj_fric 0.75) y en la Tabla 4.58 se presentan los resultados. En la Figura 4.36 se muestra el gráfico de interacción obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.59, se presentan los resultados del módulo residual.

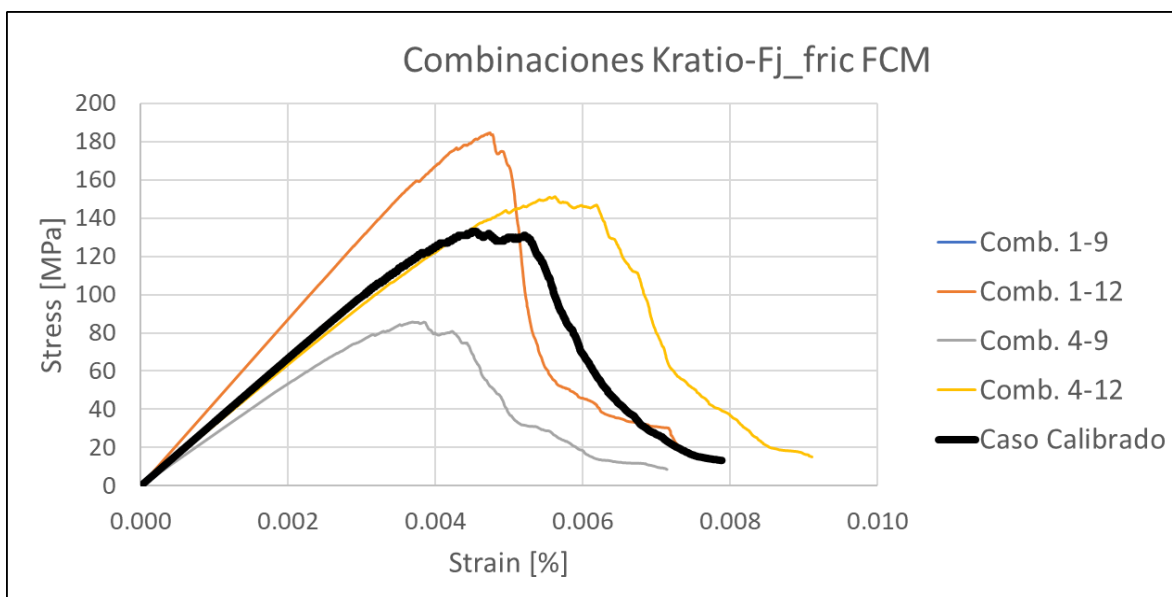


Figura 4.35: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre kratio y fj_fric - FCM.

Tabla 4.58: Resultados de la interacción entre kratio y fj_fric FCM.

Comb.	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]	Error Mod Residual FCM [%]	Error Mod. Young FCM [%]	Error UCS FCM [%]
1-9	146.3	34.2	101.3	32.6%	2.1%	23.8%
1-12	60.2	43.4	185.2	45.4%	29.6%	39.2%
4-9	231.6	26.5	85.8	110.0%	20.9%	35.5%
4-12	85.9	31.4	151.4	22.1%	6.3%	13.8%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

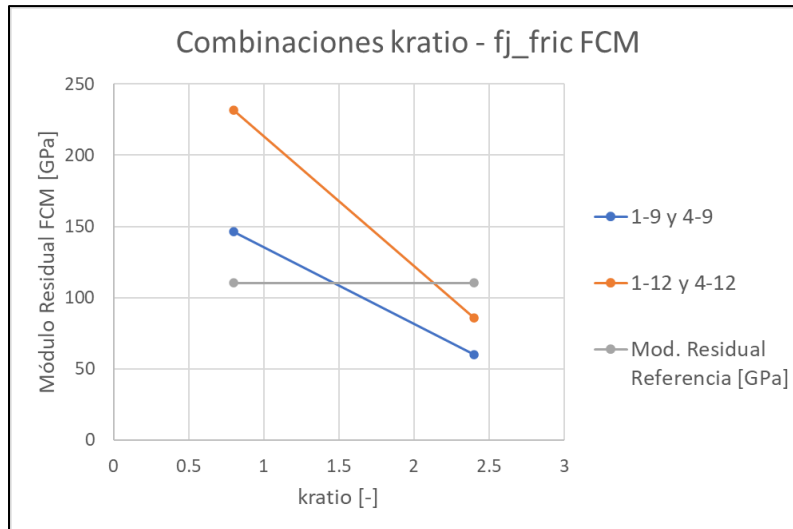


Figura 4.36: Resultados de la interacción entre $kratio$ y fj_fric FCM.

Tabla 4.59: Combinaciones formadas por $kratio$ y fj_fric con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro $kratio$ FCM [-]	Micro parámetro fj_fric FCM [-]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
1-9	0.8	0.25	146.3	-53.8
4-9	2.4	0.25	60.2	
1-12	0.8	0.75	231.6	-91.1
4-12	2.4	0.75	85.9	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre la razón de rigideces ($kratio$) y la fricción de los contactos (fj_fric) presenta un comportamiento del tipo ordinal negativa, es decir que presenta un considerable grado de interacción entre estas variables con respecto al módulo residual. Para dicha propiedad, se tiene una variación de hasta 110%. Las combinaciones de $kratio$ y fj_fric también modifican la respuesta de las propiedades pre peak, para el caso del UCS se tiene una variación de hasta un 39% y para el módulo de Young de hasta un 30%, esto debido que el micro parámetro $kratio$ controla principalmente la respuesta elástica de la roca, mientras que la fricción de los contactos afecta principalmente el UCS. Finalmente, se observa que ambas rectas de las combinaciones logran interceptar la recta de referencia. Utilizando fj_fric de 0.25 y un valor del $kratio$ de 0.8; o un fj_fric de 0.75 y un $kratio$ de 2.1, se debiese llegar al valor de referencia del módulo residual.

- Combinación $Kratio-emod$

En la Figura 4.37 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre $kratio$ y $emod$ correspondientes a 1-13 ($kratio$ 0.8 y $emod$ 23), 1-16 ($kratio$ 0.8 y $emod$ 69), 4-13 ($kratio$ 2.4 y $emod$ 23) y 4-16 ($kratio$ 2.4 y $emod$ 69) y en la Tabla 4.60 los resultados. En la Figura 4.38 se muestra el gráfico

de interacción obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.61, se presentan los resultados obtenidos del módulo residual.

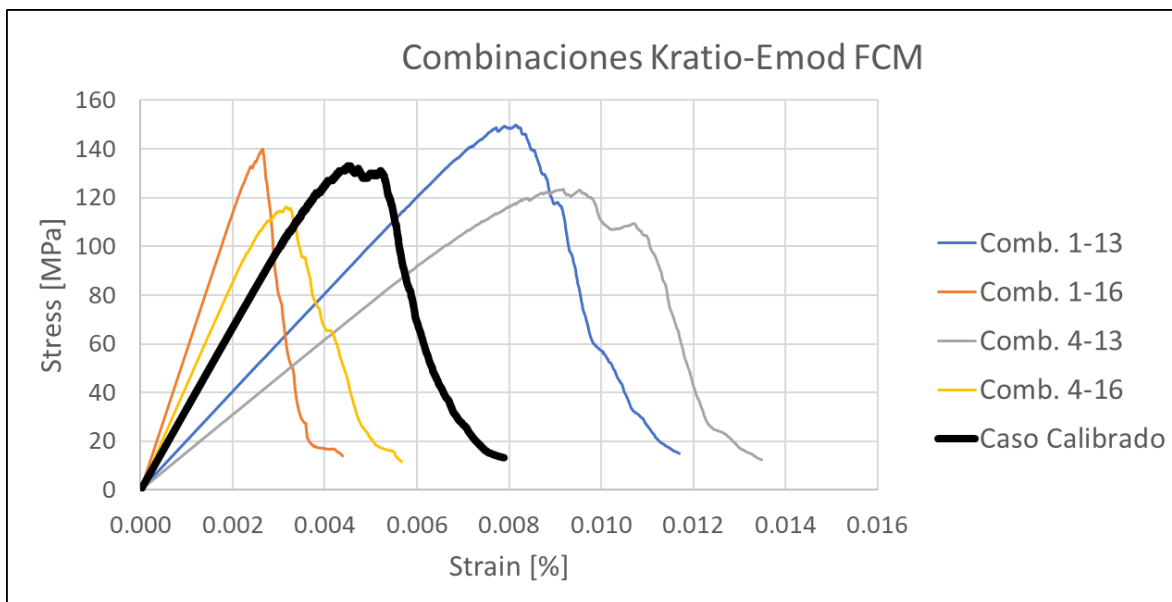


Figura 4.37: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre kratio y emod - FCM.

Tabla 4.60: Resultados de la interacción entre kratio y emod FCM.

Comb.	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]	Error Mod Residual FCM [%]	Error Mod. Young FCM [%]	Error UCS FCM [%]
1-13	63.1	20.1	150.4	63.1%	40.1%	13.1%
1-16	126.2	57.0	140.1	126.2%	70.1%	5.3%
4-13	61.5	15.3	123.0	44.2%	54.2%	7.5%
4-16	64.8	42.9	116.3	41.3%	28.0%	12.5%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

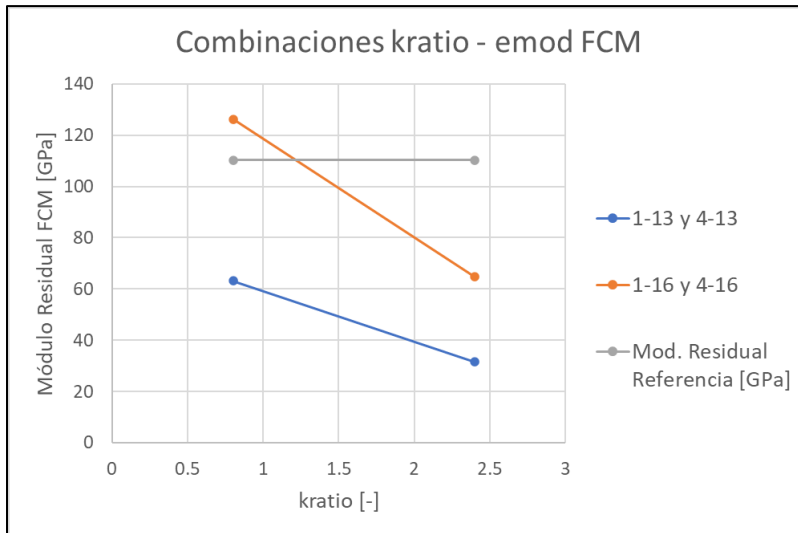


Figura 4.38: Resultados de la interacción entre kratio y emod FCM.

Tabla 4.61: Combinaciones formadas por kratio y emod con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro kratio FCM [-]	Micro parámetro emod [GPa]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
1-13	0.8	23.0	63.1	-19.7
4-13	2.4	23.0	31.5	
1-16	0.8	69.0	126.2	-38.4
4-16	2.4	69.0	64.8	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre la razón de rigideces (kratio) y el módulo de Young de los contactos presenta un comportamiento del tipo paralela, en este caso se presenta un mínimo de interacción entre las variables con respecto a la respuesta del módulo residual. Las combinaciones de kratio y emod también modifican la respuesta de las propiedades pre peak de la roca, en el caso del UCS, se tiene una variación de hasta un 13%, y para el caso del módulo de Young, se tiene una variación de hasta un 70%, esto debido a que ambas variables controlan principalmente las respuesta elásticas del modelo en su zona pre y post peak. Finalmente, se observa que recta naranja (kratio 0.8 y 2.4 con emod 69) logra interceptar la recta de referencia. Utilizando un emod de 69 [GPa] y un kratio de 1.3 se debiese llegar al valor de referencia del módulo residual.

- Combinación Frictb-fj_fric

En la Figura 4.39 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre frictb y fj_fric correspondientes a 5-9 (frictb 0.25 y fj_fric 0.25), 5-12 (frictb 0.25 y fj_fric 0.75), 8-9 (frictb 0.75 y fj_fric 0.25) y 8-12 (frictb 0.75 y fj_fric 0.75) y en la Tabla 4.62 se presentan los resultados. En la Figura 4.40 se muestra el gráfico de interacción obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.63, se presentan los resultados del módulo residual.

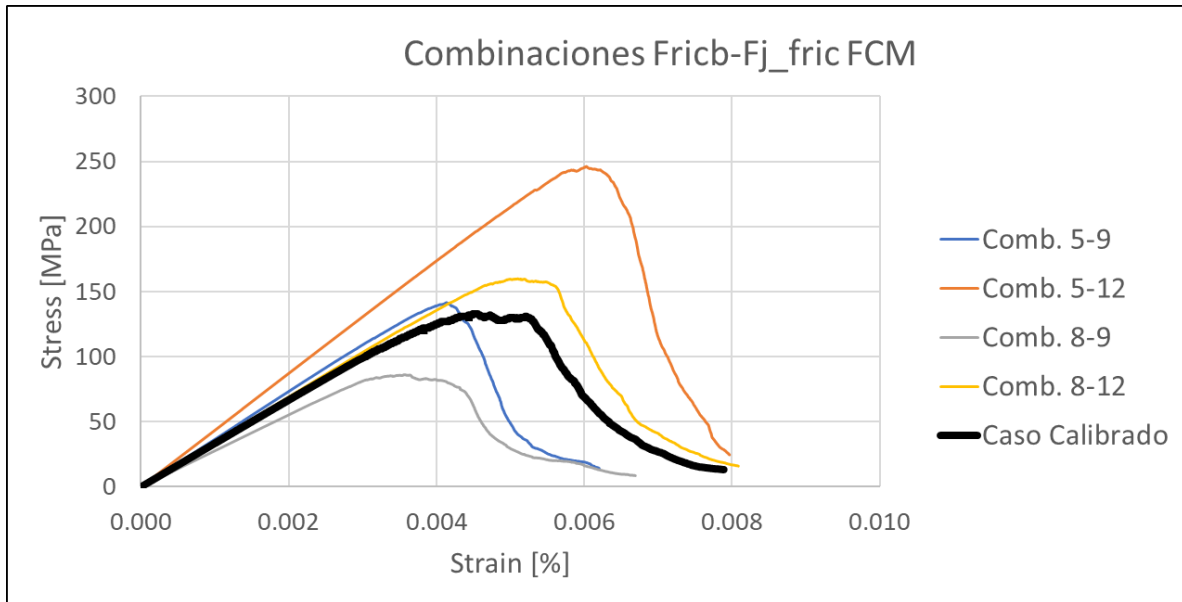


Figura 4.39: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre frictb y fj_fric - FCM.

Tabla 4.62: Resultados de la interacción entre frictb y fj_fric FCM.

Comb.	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]	Error Mod Residual FCM [%]	Error Mod. Young FCM [%]	Error UCS FCM [%]
5-9	140.1	36.6	142.7	27.0%	9.1%	7.3%
5-12	198.2	43.4	246.9	79.7%	29.5%	85.6%
8-9	78.1	27.6	86.1	29.2%	17.6%	35.3%
8-12	94.9	34.4	160.1	14.0%	2.6%	20.3%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

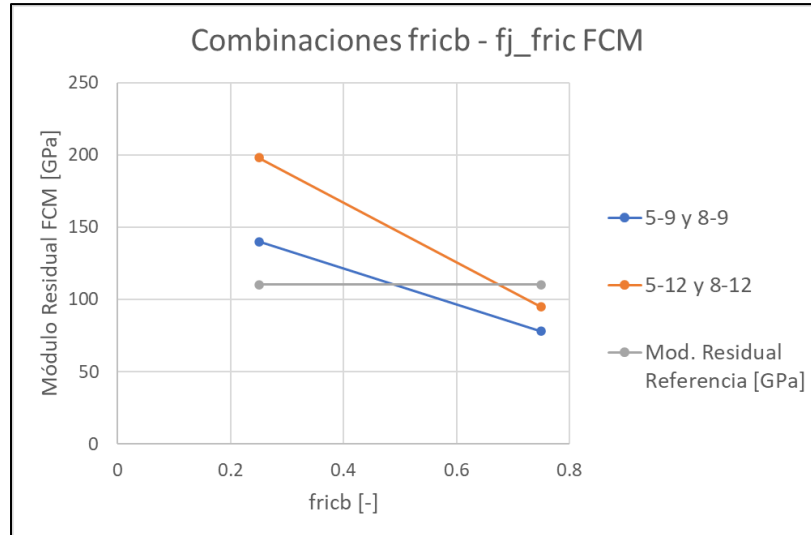


Figura 4.40: Resultados de la interacción entre *fricb* y *fj_fric* FCM.

Tabla 4.63: Combinaciones formadas por *fricb* y *fj_fric* con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro <i>fricb</i> FCM [-]	Micro parámetro <i>fj_fric</i> [-]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
5-9	0.25	0.25	140.1	-124.0
8-9	0.75	0.25	78.1	
5-12	0.25	0.75	198.2	-206.6
8-12	0.75	0.75	94.9	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre la fricción de las partículas (*fricb*) y la fricción de los contactos (*fj_fric*) presenta un comportamiento del tipo ordinal negativa, es decir que presenta un considerable grado de interacción entre estas variables con respecto al módulo residual. Para dicha propiedad, se tiene una variación de hasta 80%. Las combinaciones de *fricb* y *fj_fric* también modifican la respuesta de las propiedades pre peak, para el caso del UCS se tiene una variación de hasta un 86% y para el módulo de Young de hasta un 30%, esto debido que ambos micro parámetros controlan principalmente la respuesta elástica de la roca en su zona post peak, mientras que la fricción de los contactos también afecta principalmente el UCS y el módulo de Young. Finalmente, se observa que ambas rectas de las combinaciones logran interceptar la recta de referencia. Utilizando *fj_fric* de 0.25 y un valor 0.7 de *fricb*; o un *fj_fric* de 0.75 y un *fricb* de 0.5, se debiese llegar al valor de referencia del módulo residual.

- **Combinación *Fricb-emod***

En la Figura 4.41 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre *fricb* y *emod* correspondientes a 5-13 (*fricb* 0.25 y *emod* 23), 5-16 (*fricb* 0.25 y *emod* 69), 8-13 (*fricb* 0.75 y *emod* 23) y 8-16 (*fricb* 0.75 y *emod* 69) y en la Tabla 4.64 se presentan los resultados. En la Figura 4.42 se

muestra el gráfico de interacción obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.65, se presentan los resultados del módulo residual.

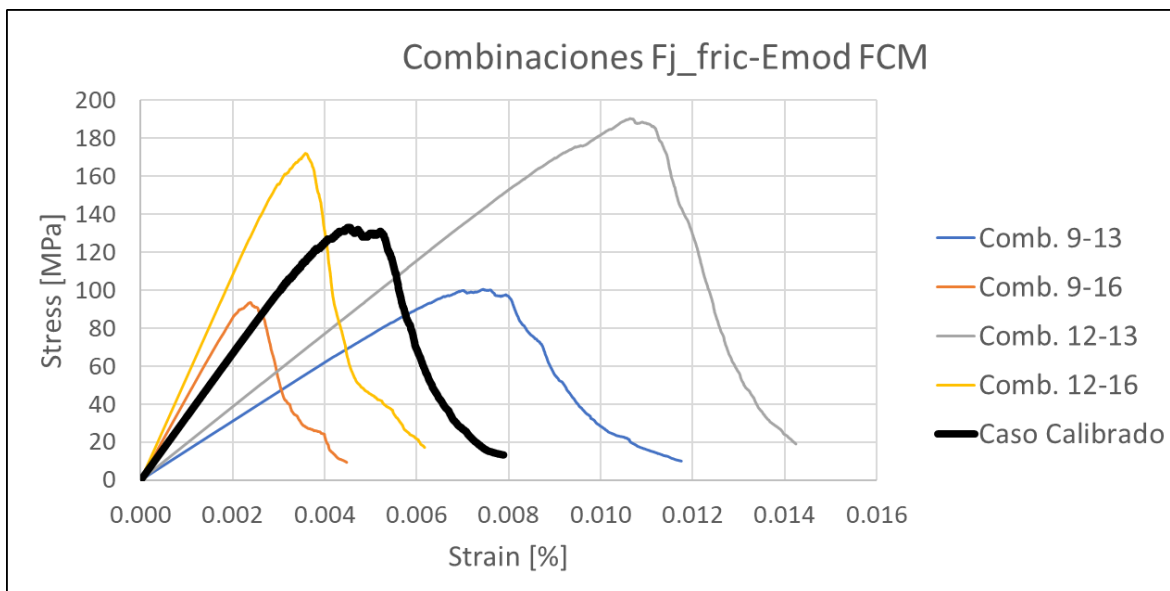


Figura 4.41: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre fricb y emod - FCM.

Tabla 4.64: Resultados de la interacción entre fricb y emod FCM.

Comb.	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]	Error Mod Residual FCM [%]	Error Mod. Young FCM [%]	Error UCS FCM [%]
5-13	63.1	19.8	186.3	42.8%	41.0%	40.1%
5-16	126.2	59.1	186.9	14.4%	76.3%	40.6%
8-13	61.5	16.0	130.7	44.2%	52.4%	1.8%
8-16	64.8	47.8	125.7	41.3%	42.5%	5.5%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

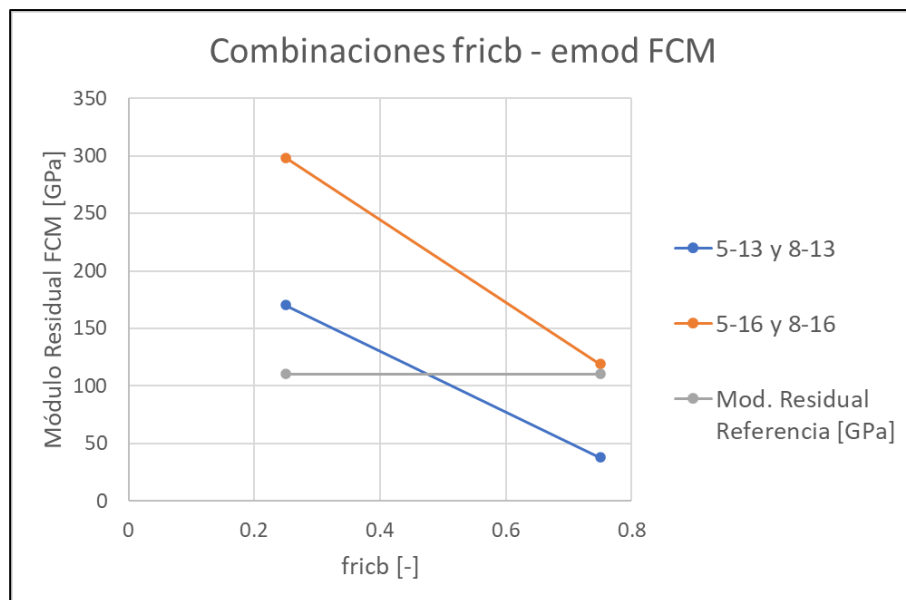


Figura 4.42: Resultados de la interacción entre fricb y emod FCM.

Tabla 4.65: Combinaciones formadas por fricb y emod con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro fricb FCM [-]	Micro parámetro emod [GPa]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
5-13	0.25	23.0	170.1	-264.4
8-13	0.75	23.0	37.9	
5-16	0.25	69.0	298.5	-395.2
8-16	0.75	69.0	118.9	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre la fricción de las partículas (fricb) y el módulo de Young de los contactos presenta un comportamiento del tipo paralelo, es decir que no presentan un grado de interacción con respecto a la respuesta del módulo residual. Las combinaciones de fricb y emod también modifican las respuestas de las propiedades pre peak, en el caso del UCS, este varía hasta un 40%. En el caso del módulo de Young, este varía hasta un 76%, esto debido a que fricb controla principalmente la respuesta elástica del post peak y el UCS del pre peak, mientras que el módulo de Young modifica la respuesta elástica del modelo en su zona pre y post peak. Finalmente, se observa que recta azul (fricb de 0.25 y 0.75; y emod 23) logra interceptar la recta de referencia. Utilizando un emod de 23 [GPa] y un valor de fric de 0.5 se debiese llegar al valor de referencia del módulo residual.

- Combinación Fj_fric-emod

En la Figura 4.43 se muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de las combinaciones entre fj_fric y emod correspondientes a 9-13 (fj_fric 0.25 y emod 23), 9-16 (fj_fric 0.75 y emod 69), 12-13 (fj_fric 0.25 y emod 23) y 12-16 (fj_fric 0.75 y emod 69) y en la Tabla 4.66 se presentan los resultados. En la Figura 4.44 se

muestra el gráfico de interacción obtenido de estas combinaciones, y en la Tabla 4.67, se presentan los resultados del módulo residual.

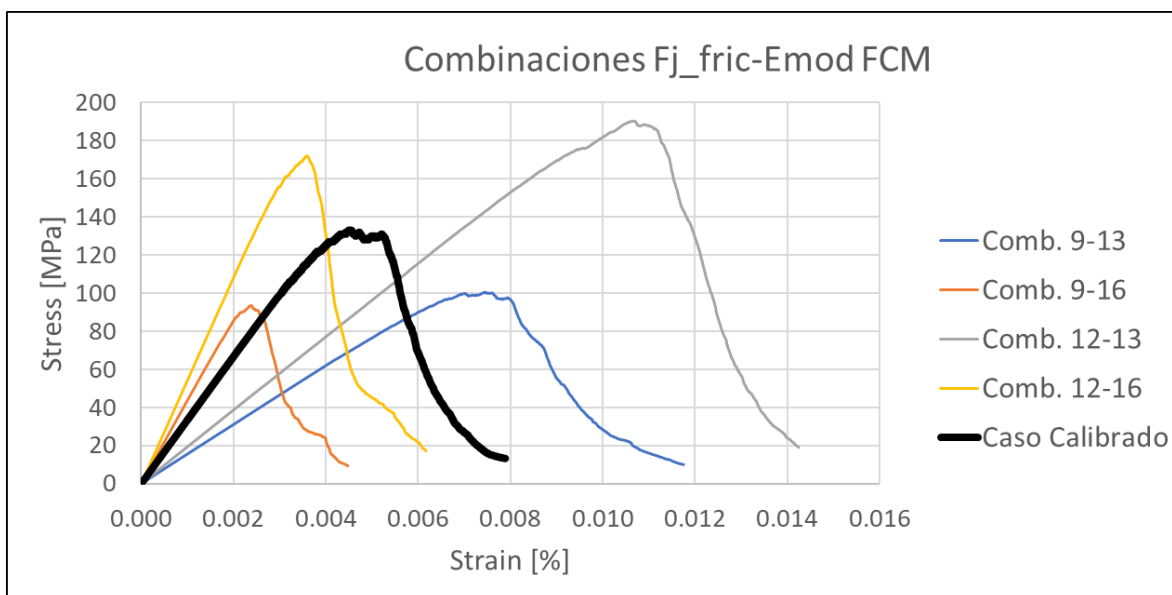


Figura 4.43: Curvas resultantes de las combinaciones realizadas entre f_{j_fric} y e_{mod} - FCM.

Tabla 4.66: Resultados de la interacción entre f_{j_fric} y e_{mod} FCM.

Comb.	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]	Error Mod Residual FCM [%]	Error Mod. Young FCM [%]	Error UCS FCM [%]
9-13	33.5	15.4	101.3	69.6%	54.0%	23.8%
9-16	101.1	43.2	93.6	8.3%	29.0%	29.6%
12-13	75.6	19.2	190.1	31.5%	42.7%	42.9%
12-16	132.6	53.9	172.7	20.2%	60.9%	29.8%
UCS Referencia [Mpa]			133.0			
Módulo de Young Referencia [Gpa]			33.5			
Módulo Residual Referencia [Gpa]			110.3			

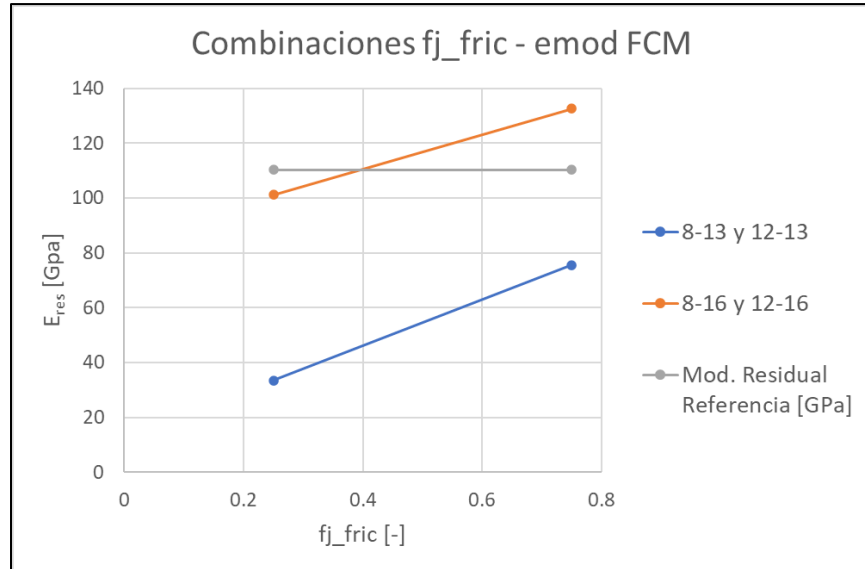


Figura 4.44: Resultados de la interacción entre fj_fric y $emod$ FCM.

Tabla 4.67: Combinaciones formadas por fj_fric y $emod$ con sus respectivas pendientes.

Comb.	Micro parámetro fj_fric FCM [-]	Micro parámetro $emod$ [GPa]	Mod Residual Comb. [GPa]	Pendiente [-]
5-13	0.25	23.0	33.5	84.2
8-13	0.75	23.0	75.6	
5-16	0.25	69.0	101.1	63.0
4816	0.75	69.0	132.6	

Se observa que las combinaciones que las combinaciones realizadas entre la fricción de los contactos (fj_fric) y el módulo de Young de los contactos ($emod$) presenta un comportamiento del tipo paralelo, es decir que no hay una interacción entre esta variables con respecto a la respuesta del módulo residual. Para dicha propiedad se tiene una variación máxima de 70%. Las combinaciones fj_fric y $emod$ también modifican las respuestas de las propiedades pre peak de la roca, en el caso del UCS, se tiene que este varía hasta un 43%, mientras que el módulo de Young varía hasta un 61%. Esto se debe a que ambas variables controlan la respuesta elástica del modelo en su zona pre y post peak, mientras que fj_fric también controla la respuesta UCS pre peak del modelo. Finalmente, se observa que recta naranja (fj_fric de 0.25 y 0.50 con $emod$ 23) logra interceptar la recta de referencia. Utilizando un $emod$ de 23 [GPa] y un fj_fric de 0.4 se debiese llegar al valor de referencia del módulo residual.

- Resumen de resultados de combinaciones

Finalmente, se puede observar que ambos modelos pueden llegar a los valores de referencia del módulo residual, pero al utilizar los distintos valores de los distintos micro parámetros de los modelos, también se verá modificada la respuesta de las demás propiedades de la roca, con errores considerables (>50%). Esto es de esperarse, ya que las variables seleccionadas para lograr el ajuste del módulo residual también controlan las propiedades pre peak de la roca. Por otro lado, como se menciona en el Inciso 3.6, aunque los resultados de los resultados de los gráficos no aseguran que la interacción o no sea fidedigna, la técnica de los gráficos de interacción es un primer acercamiento para buscar variables independientes en la respuesta objetivo del modelo, en este caso, se busca alguna variable que pueda controlar el módulo residual del modelo. Para las combinaciones de los modelos SBM y FCM, se observa un resumen de los resultados de interacción en las TAB y TAB, donde S.I. representa el estado sin interacción; C.I. representa el estado de considerable interacción; y G.I. representa el estado de gran interacción.

Tabla 4.68: Resumen de los resultados de interacción del modelo SBM.

	Soft SBM [-]	Cut SBM [-]	Kratio SBM [-]	Sb_mcf SBM [-]
Soft SBM [-]	-	S.I.	G.I.	S.I.
Cut SBM [-]	-	-	C.I.	C.I.
Kratio SBM [-]	-	-	-	C.I.
Sb_mcf SBM [-]	-	-	-	-

Tabla 4.69: Resumen de los resultados de interacción del modelo FCM.

	Kratio FCM [-]	Fricb FCM [-]	Fj_fric FCM [-]	Emod FCM [Gpa]
Kratio FCM [-]	-	C.I.	C.I.	S.I.
Fricb FCM [-]	-	-	C.I.	S.I.
Fj_fric FCM [-]	-	-	-	S.I.
Emod FCM [Gpa]	-	-	-	-

Para el caso del modelo SBM, la variable del factor de ablandamiento (soft) tiene un menor grado de interacción con las demás variables, mientras que para el modelo FCM, la variable del módulo de Young de los contactos (emod) es la que tiene menos interacción con las demás.

5. Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados entregados por los modelos SBM y FCM sobre el comportamiento post peak de la roca indican que ambos modelos son capaces de lograr una representación frágil de la roca en su zona plástica, incluso a pesar de que esta propiedad no fue calibrada. A pesar de lograr el comportamiento frágil de la zona post peak que se esperaba, se obtienen errores de un 102% sobre el valor referencial para el modelo SBM, y un error del 27% bajo el valor referencial para el modelo FCM. Sin embargo, se debe considerar que la cantidad de datos disponibles para comparar esta roca con su curva esfuerzo deformación es escasa, además de la variabilidad que se pueden obtener en los datos de laboratorio.

Con respecto a los ensayos de compresión y los resultados pre peak, ambos modelos entregan resultados similares a las propiedades de la roca seleccionada, obteniendo errores menores al 5% para las resistencias a la compresión y tracción como también para el módulo de Young. En el caso de la razón de Poisson, el modelo SBM no es capaz de representarlo debido a su derivación del modelo BPM, obteniendo un error del 68%, mientras que el modelo FCM si es capaz de representar esa propiedad obteniendo un error del 2.7%.

Con respecto a los ensayos triaxiales, ambos modelos logran representar bien el comportamiento de la roca en términos de los esfuerzos principales (σ_1 - σ_3), obteniendo un error promedio del 8% para el modelo SBM, y de un 10% para el modelo FCM. Para el módulo residual en los ensayos triaxiales, el modelo SBM logra una mejor representación de esta propiedad y de la transición frágil-dúctil, entregando un error promedio de un 49% versus un 71% que entrega el modelo FCM.

A pesar de estos buenos resultados, se tiene que los modelos de PFC3D3D son multivariantes, lo que implica que el ajustar la propiedad del módulo residual, modificara la respuesta de las demás propiedades, pero a pesar de esto, se encontraron distintos micro parámetros capaces de controlar la respuesta post peak de los modelos, tales como el factor de ablandamiento (soft), factor de ablandamiento por resistencia a la tracción (cut), la razón de rigideces (kratio) y el factor de contribución del momento (sb_mcf) para el modelo SBM; y la razón de rigideces (kratio), la fricción de las partículas (fricb), la fricción de los contactos (fj_fric) y el módulo de Young de los contactos (emod) para el modelo FCM.

Finalmente, se puede decir que las herramientas de numeración numérica son efectivas para la modelación del comportamiento post peak de la roca a pesar de que el estudio de esta propiedad en los modelos recién se encuentra en sus inicios.

Las recomendaciones que se realizan para futuras investigaciones corresponden:

1. Se tiene que el orden la calibración es primordial para lograr el correcto ajuste de las propiedades de la roca, pero las metodologías de los distintos trabajos se enfocan en calibrar las propiedades pre peak. Se sugiere elaborar una nueva metodología de calibración que este enfocada en obtener resultados con errores menores al 10% para las propiedades pre y post peak de la roca.
2. Se tiene que el análisis de sensibilidad se enfocó principalmente en las variables que definen el contacto del modelo. Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad a los micro parámetros de empaquetamiento de los modelos, tales como la resolución de las partículas y la razón de diámetros mínimos y máximos, como también a las variables que controlan la forma de ejercer las simulaciones de los distintos ensayos como lo es la tasa de deformación.
3. Implementar los modelos SBM y FCM en la técnica de SRM, la cual corresponde a una muestra de roca que tiene presente discontinuidades, permitiendo el estudio del modelo a escala de macizo rocoso.

6. Referencias

Arteaga R  th, R. A. (2015). Modelamiento numérico del comportamiento triaxial verdadero de roca intacta mediante elementos discretos y sus implicancias en el diseño minero. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133207>

Burbano, D., & García, T. (2016). Estimación empírica de la resistencia a compresión simple a partir del ensayo de carga puntual en rocas anis  tropas (esquistos y pizarras). FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.862>

Callister, W. (2005). Materials, Science and Engineering. <https://anupturnedworld.files.wordpress.com/2016/06/callister-materials-science-and-engineering.pdf>

Chang and Haimson. (2000). A Failure Criterion for Rocks Based on True Triaxial Testing. https://www.researchgate.net/publication/257445184_A_Failure_Criterion_for_Rocks_Based_on_True_Triaxial_Testing

Cho, N., Martin, C. D., & Sego, D. C. (2007). A clumped particle model for rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44(7), 997-1010. https://www.researchgate.net/publication/351437241_Cundall_St_John_and_Barton_1971_Discussion_on_numerical_and_physical_models_kn_and_ks_scale_effect_Rock_Fracture_Nancy

Cundall, P. A., & Hart, R. D. (1992). Numerical modelling of discontinua. Engineering Computations, 9(2), 101-113. <https://doi.org/10.1108/eb023851>

Cundall, P., John, C., & Barton, N. (1971). Discussion on numerical and physical models, kn, and ks scale effect. Rock Fracture, Nancy,. https://www.researchgate.net/publication/351437241_Cundall_St_John_and_Barton_1971_Discussion_on_numerical_and_physical_models_kn_and_ks_scale_effect_Rock_Fracture_Nancy

Dono, A. R., & Alejano, L. R. (2012). *Comportamiento post-rotura de los macizos rocosos: Y su aplicación al diseño de excavaciones subterr  neas*. https://www.semanticscholar.org/paper/Comportamiento_post_rotura_de_los_macizos_rocosos%3ADono-Alejano/5f4077634bc9ed28e9af02b670b9774b2ef9a9b

Ferrer, L. G. de V., Mercedes. (2011). Geological Engineering. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11745>

Frías-navarro, D., & Pascual-Soler, M. (2022). «Diseño de la investigación, análisis y redacción de los resultados» (Disseny de la investigació, anàlisi i redacció dels resultats Research design, analysis and results write up). Enero 2022.

https://www.researchgate.net/publication/358986279_Disen%C3%B3_de_la_investigaci%C3%B3n_an%C3%A1lisis_y_redacci%C3%B3n_de_los_resultados_Disseny_de_la_investigaci%C3%B3n_an%C3%A1lisi_i_redacci%C3%B3_dels_resultats_Research_design_analysis_and_results_write_up_Enero_2022_Version_final_im

Gao, G., & Meguid, M. A. (2022). On the role of joint roughness on the micromechanics of rock fracturing process: A numerical study. *Acta Geotechnica*, 17(7), 2799-2824. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01401-8>

Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)

Hudson and Harrison. (2000). *Engineering Rock Mechanics—Part 2*. <https://shop.elsevier.com/books/engineering-rock-mechanics/hudson/978-0-08-043864-1>

Jiang, M., Shen, Z., & Wang, J. (2015). A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances. *Computers and Geotechnics*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.12.011>

Jing, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(3), 283-353. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00013-3)

Kawakata, H., Shimada, M. Theoretical approach to dependence of crack growth mechanism on confining pressure. *Earth Planet Sp* **52**, 315–320 (2000). <https://doi.org/10.1186/BF03351642>

LAUBSCHER, D. (1994). Cave Mining—The state of the art. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. <https://doi.org/10.1179/174328610X12820409992255>

Luengo Cerda, J. B. (2014). Efecto escala en el modelamiento de roca intacta mediante elementos discretos. Tesis ingeniero civil de minas--Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116973>

Ma, Y., & Huang, H. (2018). DEM analysis of failure mechanisms in the intact Brazilian test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 102, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.11.010>

Ofoegbu, G. I., & Curran, J. H. (1992). Deformability of intact rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 29(1), 35-48. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91043-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91043-5)

Ozdogan, M. (2018). Physical and mechanical properties of cubuk andesite-a case study. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32427.54568>

Paterson, M., & Wong, T. (2005). Experimental Rock Deformation—The Brittle Field. *Experimental Rock Deformation - The Brittle Field*, 348. <https://doi.org/10.1007/b137431>

Pollak Aguiló, D. I. (2022). Ensayos de compresión para estimación de comportamiento Post-Peak en roca: Puesta en marcha y análisis de primeros ensayos en prensa mes 800. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188023>

Potyondy, D. O. (2012, junio 24). A Flat-Jointed Bonded-Particle Material For Hard Rock. 46th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. <https://dx.doi.org/>

Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8), 1329-1364. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011>

Qu, J., & Tao, H. (2019). Strength and deformation behavior of Shanghai andesite under various strain rates in uniaxial loading test. *Geomechanics and Geoengineering*, 16, 1-8. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1645364>

Rockscience. (2013). RocLab. <https://www.rockscience.com/>

Salinas Lara, J. M. (2016). Comparación de modelos de elementos discretos aplicados al comportamiento de roca intacta. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139766>

Salinas Riveros, E. (2018). Análisis de propiedades geotécnicas de algunas rocas comunes en Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169948>

Suzuki Morales, K. (2013). Aplicación de la técnica Synthetic Rock Mass a escala de laboratorio. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/113949>

Turichshev, A., & Hadjigeorgiou, J. (2016). Triaxial compression experiments on intact veined andesite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 86, 179-193. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.04.012>

Vallejos, J., Salinas, J., Delonca, A., & Mas Ivars, D. (2016). Calibration and Verification of Two Bonded-Particle Models for Simulation of Intact Rock Behavior. *International Journal of Geomechanics*, 17, 06016030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000773](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000773)

Velásquez Núñez, J. I. (2022). *Estudio de respuesta Peak y Post Peak en rocas ígneas*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/187258>

Vergara, M. R., Arismendy, A., Liberos, A., & Brzovic, A. (2020). Numerical investigation into strength and deformability of veined rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 135, 104510. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104510>

Wiebols, G. A., & Cook, N. G. W. (1968). An energy criterion for the strength of rock in polyaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 5(6), 529-549. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(68\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(68)90040-5)

7. Anexos

A continuación, se presentan los gráficos obtenidos del estudio previo del comportamiento post peak tanto del modelo SBM como del FCM.

- Estudio Previo SBM

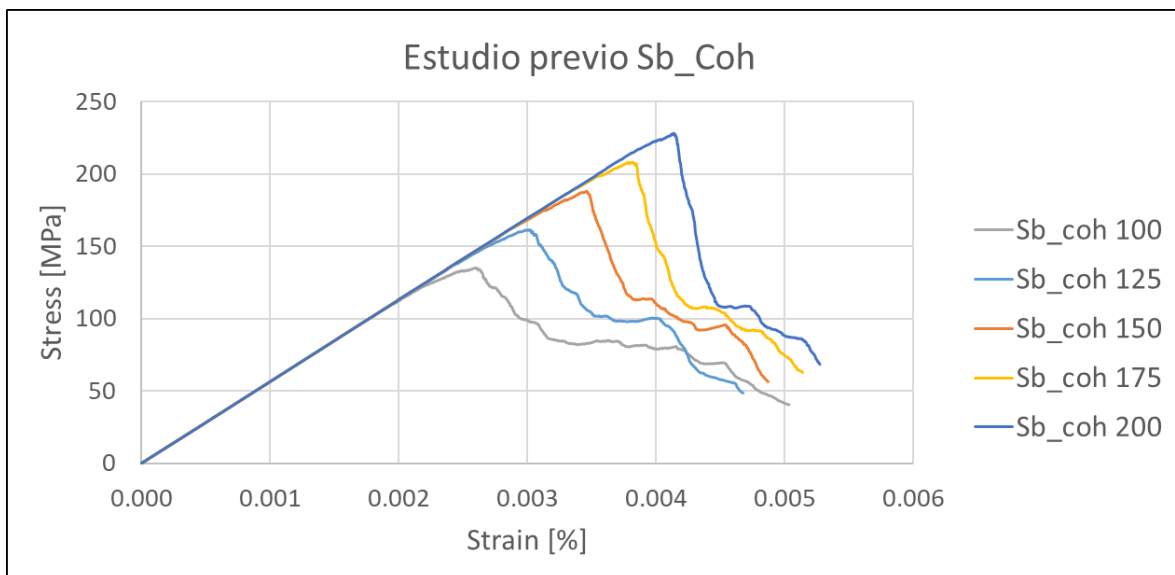


Figura 7.1: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro sb_coh del modelo SBM.

Tabla 7.1: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro sb_coh del modelo SBM.

Sb_coh [MPa]	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]
100	7.9	56.5	135.0
125	12.1	56.5	161.4
150	22.1	56.5	188.1
175	25.5	56.5	208.2
200	39.5	56.4	228.1

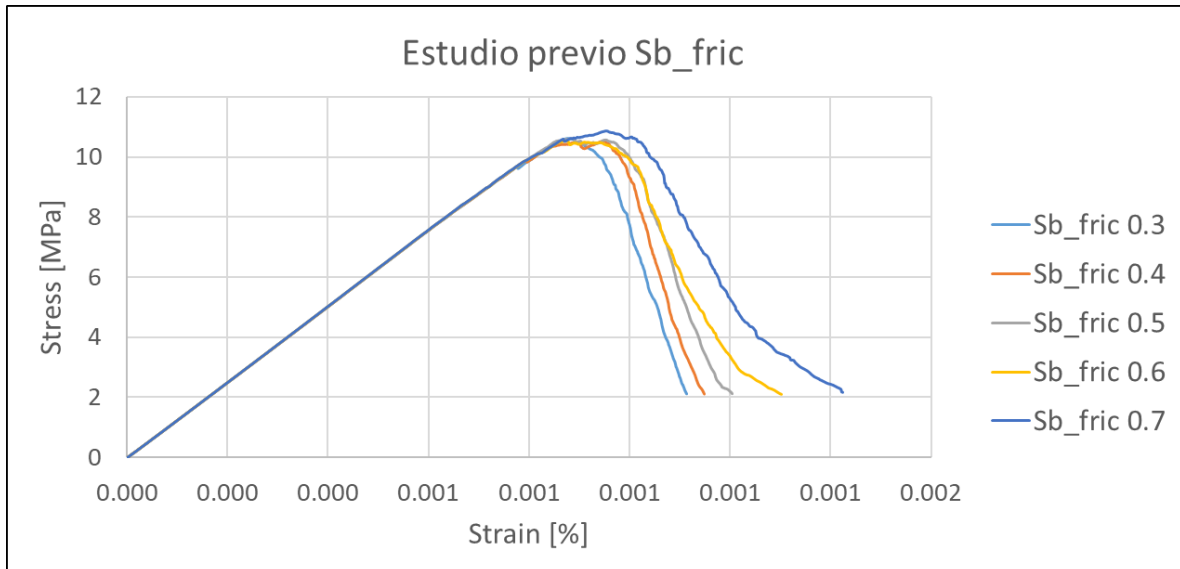


Figura 7.2: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro sb_fric del modelo SBM.

Tabla 7.2: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro sb_fric del modelo SBM.

Sb_fric [-]	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]
0.3	4.9	13.5	10.6
0.4	5.1	13.6	10.5
0.5	4.2	13.6	10.6
0.6	3.2	13.6	10.5
0.7	3.0	13.6	10.8

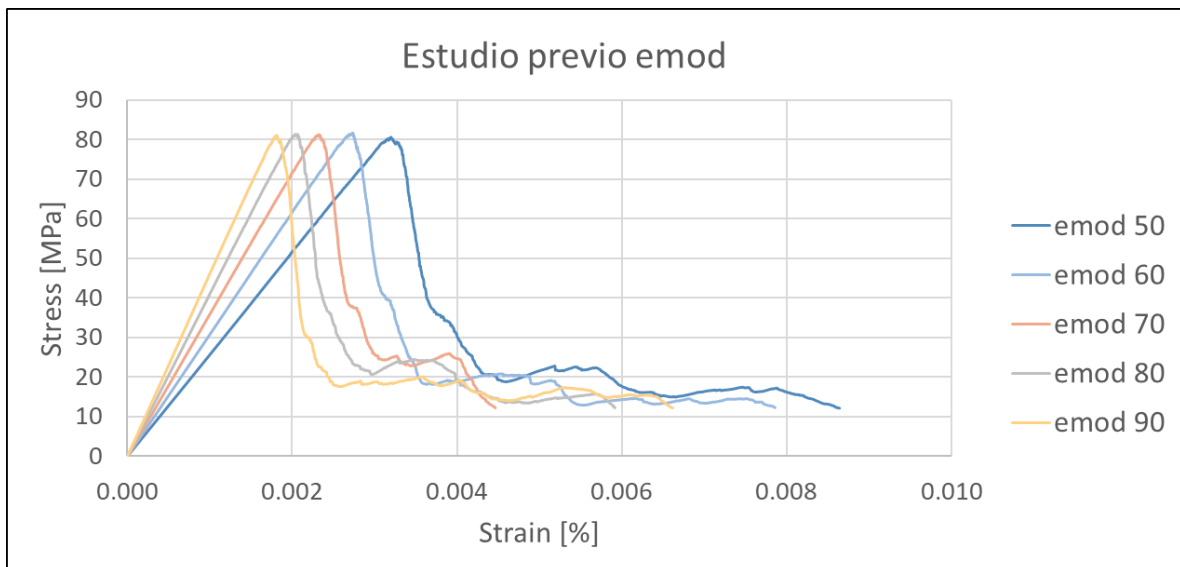


Figura 7.3: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro $emod$ del modelo SBM.

Tabla 7.3: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro emod del modelo SBM.

Emod [GPa]	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]
50	12.6	25.8	80.6
60	15.3	30.8	81.7
70	16.5	35.8	81.2
80	16.6	40.7	81.3
90	19.8	45.4	81.0

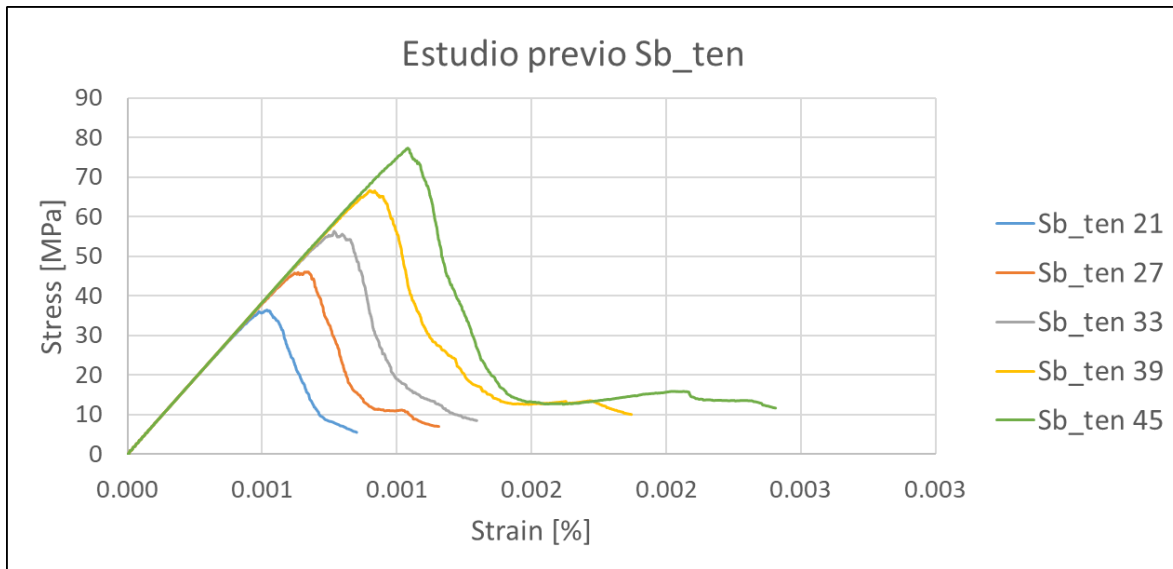


Figura 7.4: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro sb_ten del modelo SBM.

Tabla 7.4: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro sb_ten del modelo SBM.

Sb_ten [MPa]	Módulo Residual SBM [GPa]	Módulo Young SBM [GPa]	UCS SBM [MPa]
21	15.6	76.8	36.4
27	17.3	75.9	46.0
33	22.0	76.0	56.3
39	24.6	75.3	66.6
45	25.7	76.7	77.3

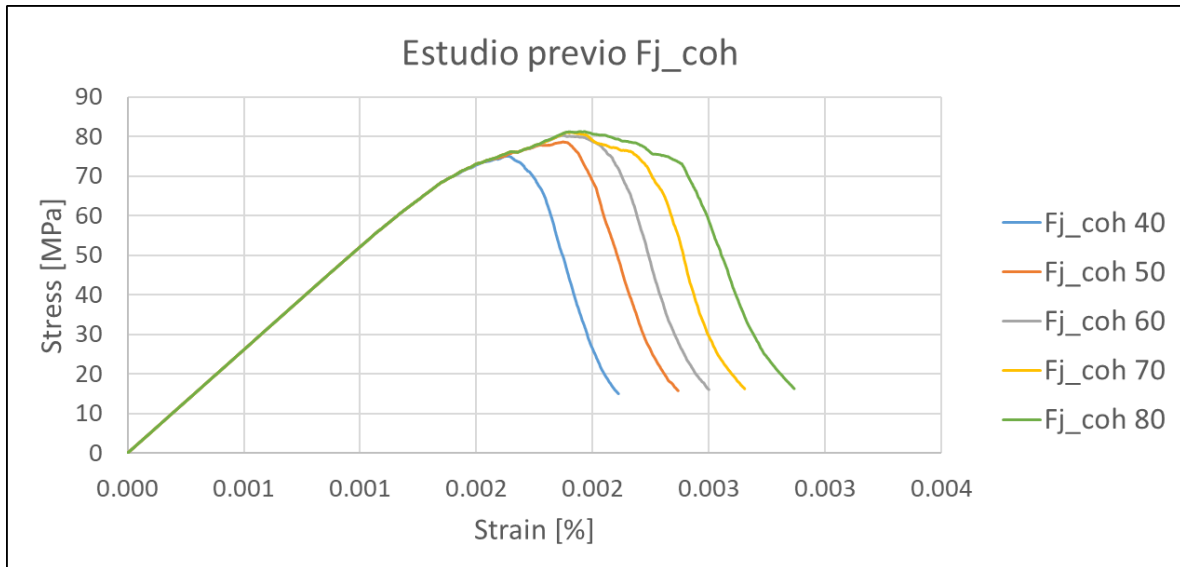


Figura 7.5: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro fj_coh del modelo FCM.

Tabla 7.5: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro fj_coh del modelo FCM.

Fj_coh [MPa]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]
40	52.3	51.8	75.0
50	53.4	52.1	78.6
60	53.5	52.1	80.3
70	54.0	52.1	81.0
80	54.2	52.1	81.3

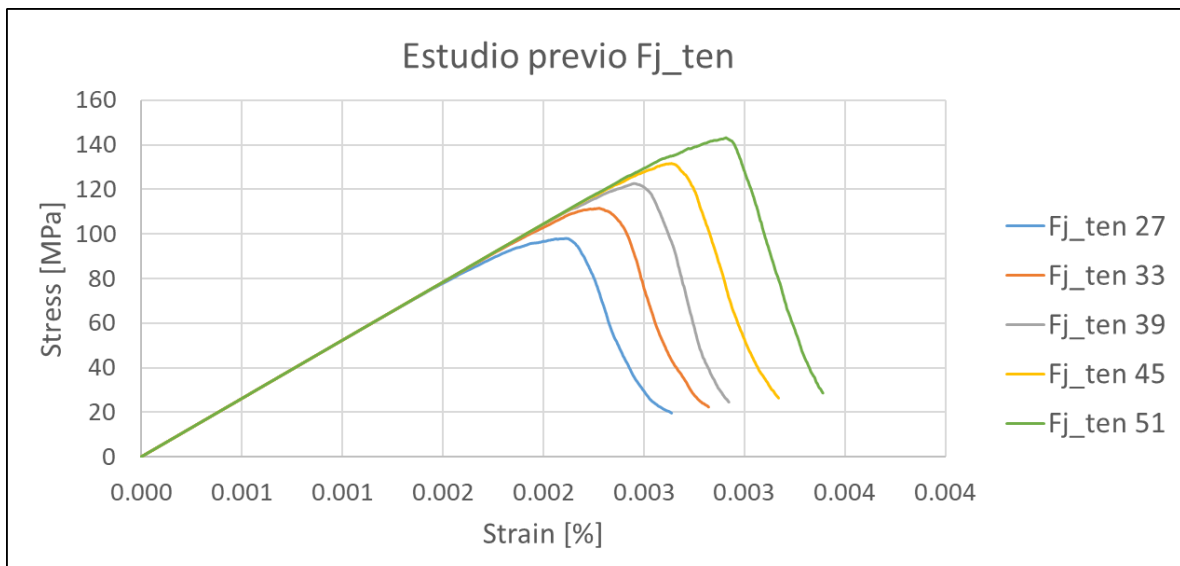


Figura 7.6: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro fj_ten del modelo FCM.

Tabla 7.6: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro fj_ten del modelo FCM.

Fj_ten [MPa]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]
27	17.6	52.3	98.1
33	20.2	52.3	111.6
39	25.4	52.3	122.7
45	23.1	52.3	131.7
51	26.8	52.3	143.2

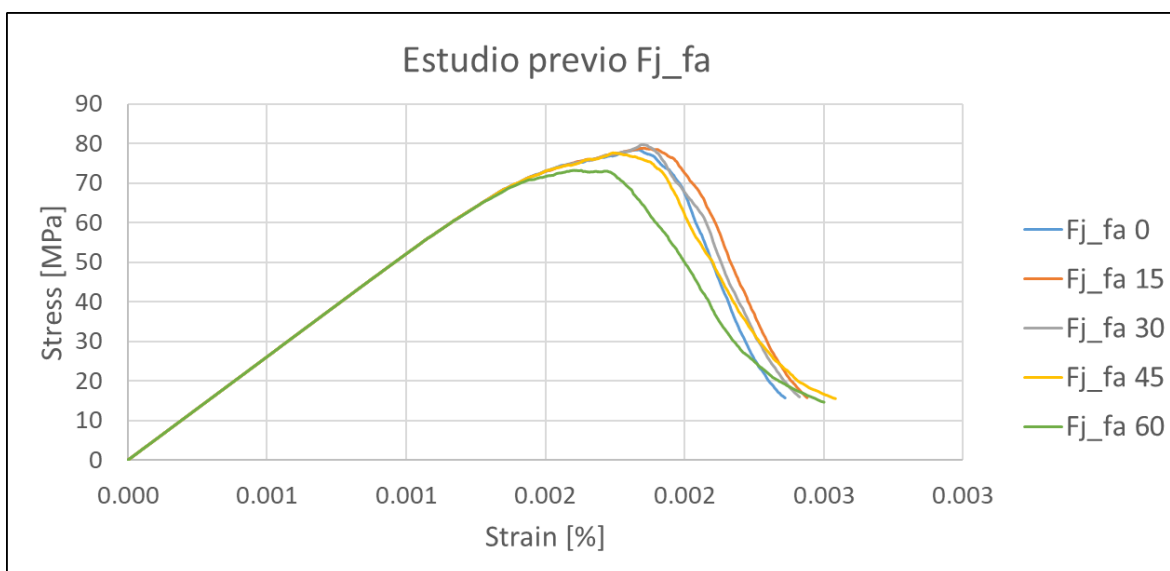


Figura 7.7: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro fj_fa del modelo FCM.

Tabla 7.7: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro fj_fa del modelo FCM.

Fj_fa [°]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]
0	16.3	52.1	78.5
15	15.1	52.1	78.9
30	14.6	52.1	79.8
45	12.4	52.1	77.7
60	10.4	51.7	73.2

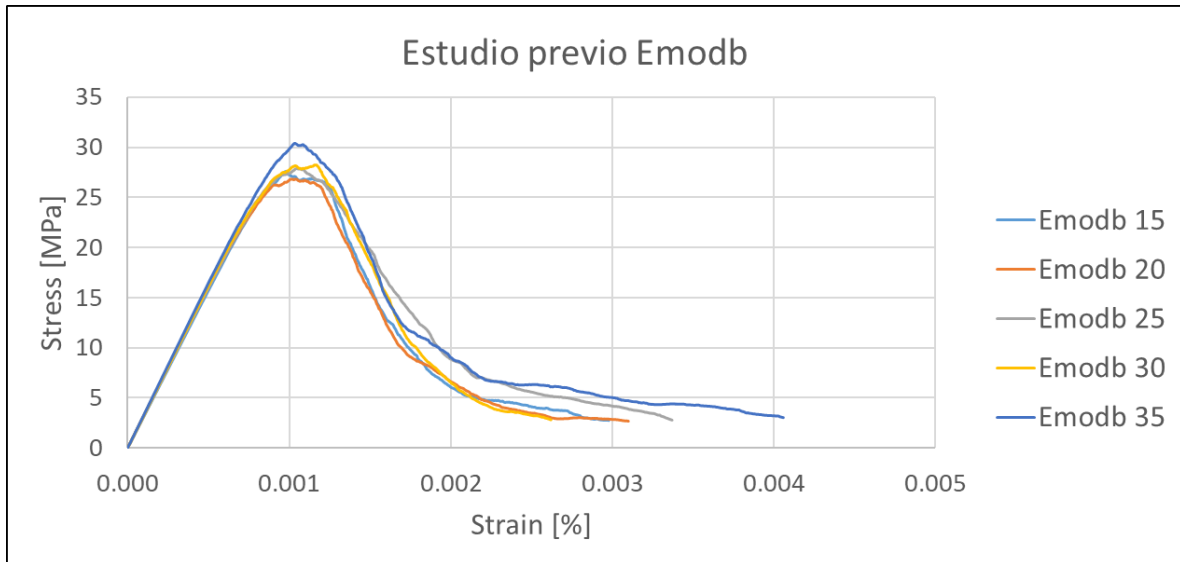


Figura 7.8: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro emodb del modelo FCM.

Tabla 7.8: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro emodb del modelo FCM.

Emodb [GPa]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]
15	33.5	28.1	27.6
20	32.3	28.8	26.8
25	33.3	28.9	27.9
30	32.5	28.5	28.2
35	35.8	29.2	30.4

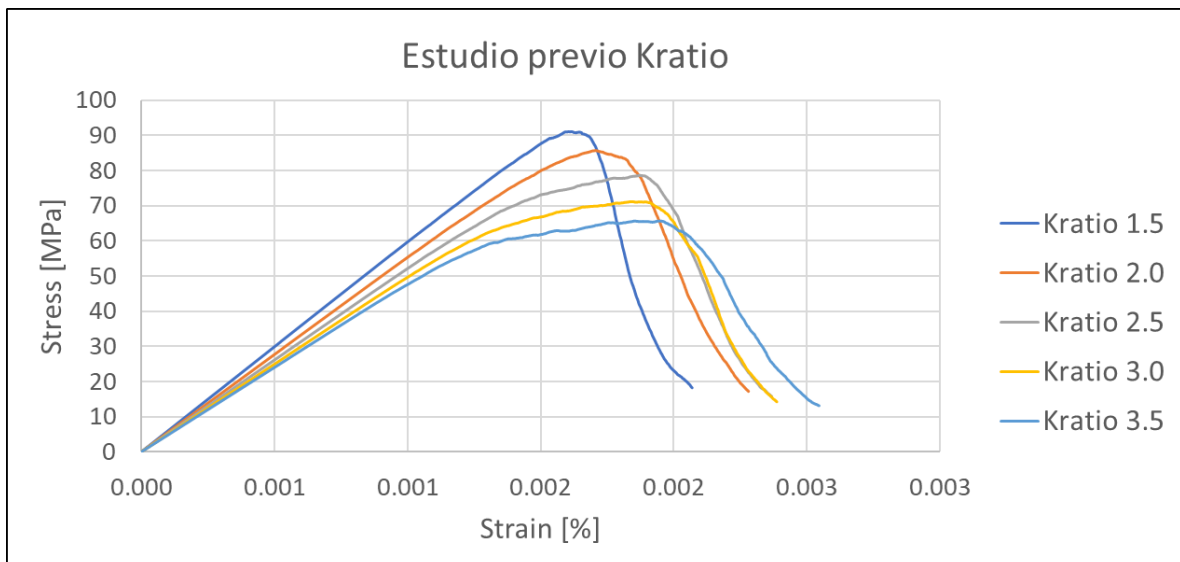


Figura 7.9: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro kratio del modelo FCM.

Tabla 7.9: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro kratio del modelo FCM.

Kratio [-]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]
1.5	27.8	59.3	91.1
2.0	16.2	55.0	85.7
2.5	17.7	52.0	78.7
3.0	16.6	49.6	71.2
3.5	12.4	48.0	65.7

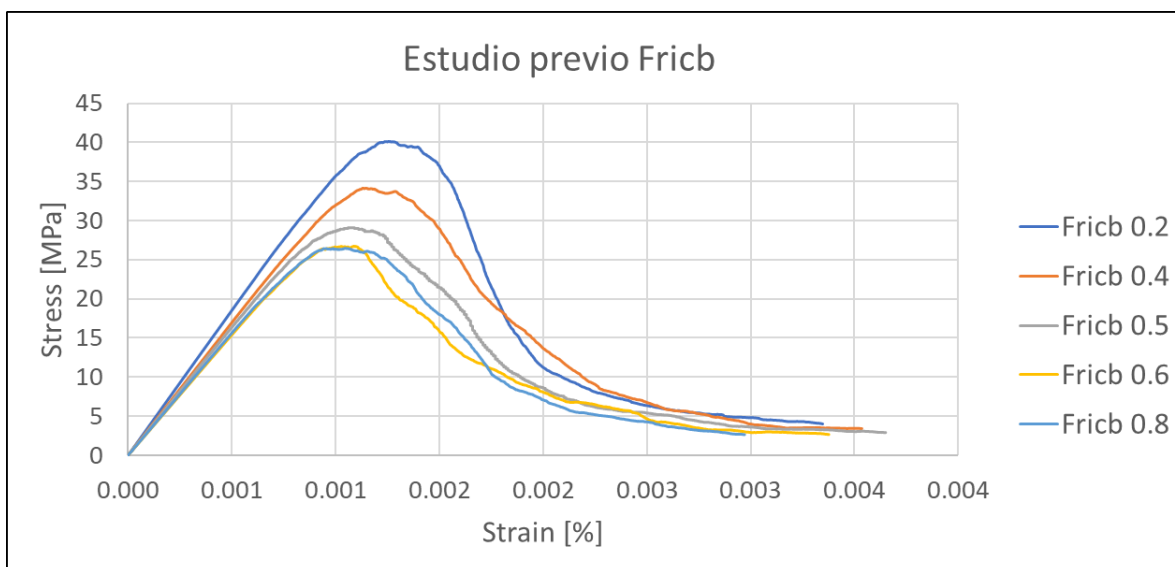


Figura 7.10: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro fricb del modelo FCM.

Tabla 7.10: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro fricb del modelo FCM.

Fricb [-]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]
0.2	67.7	36.2	40.1
0.4	35.7	34.3	34.2
0.5	28.6	33.9	29.1
0.6	24.5	31.5	26.7
0.8	27.2	31.0	26.5

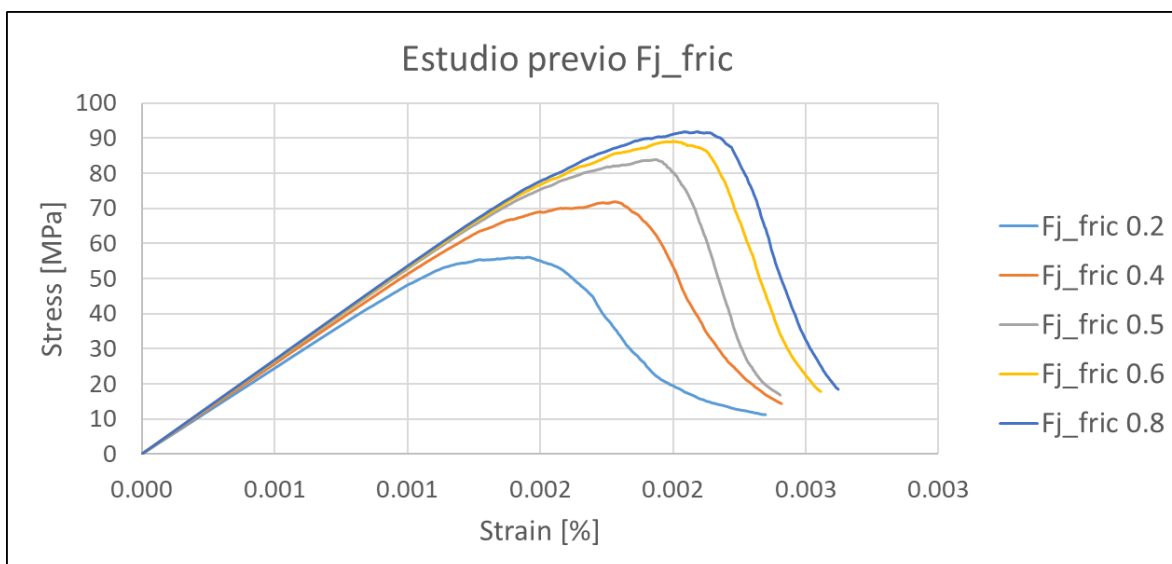


Figura 7.11: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro fj_fric del modelo FCM.

Tabla 7.11: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro fj_fric del modelo FCM.

Fj_fric [-]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]
0.2	9.4	48.7	56.9
0.4	14.3	51.0	71.9
0.5	22.5	52.6	83.9
0.6	20.1	52.9	89.1
0.8	23.6	53.6	91.9

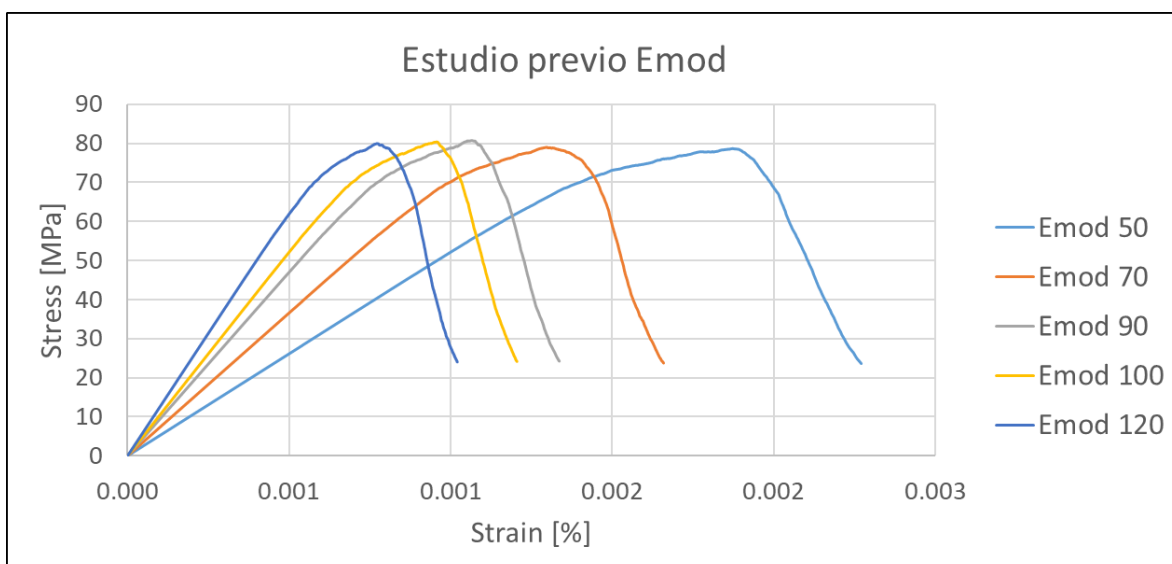


Figura 7.12: Curvas esfuerzo deformación obtenidas del estudio previo del micro parámetro $emod$ del modelo FCM.

Tabla 7.12: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca para el micro parámetro E_{mod} del modelo FCM.

E_{mod} [GPa]	Módulo Residual FCM [GPa]	Módulo Young FCM [GPa]	UCS FCM [MPa]
50	26.3	52.1	78.5
70	29.0	72.3	78.9
90	31.2	92.3	80.7
100	33.8	103.8	80.4
120	35.8	124.9	80.1