



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

**COMPARACIÓN DE MODELOS DE ELEMENTOS DISCRETOS APLICADOS AL  
COMPORTAMIENTO DE ROCA INTACTA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JOSÉ MATÍAS SALINAS LARA

PROFESOR GUÍA:

JAVIER VALLEJOS MASSA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

VICTOR ENCINA MONTENEGRO

DIEGO MAS IVARS

SANTIAGO DE CHILE

2016

## RESUMEN EJECUTIVO

El estudio del comportamiento de roca intacta es el punto de partida para poder realizar análisis a escala de macizo rocoso. Es por esto que se han realizado grandes esfuerzos para replicar y validar dicho comportamiento mediante el modelamiento numérico. Aquí es donde aparece el programa de elementos discretos PFC<sup>3D</sup>, el cual replica a la roca intacta mediante esferas rígidas unidas entre sí por modelos de contactos, cuyo comportamiento depende de micro-parámetros.

El modelo de contactos utilizado últimamente para realizar los ensayos con este programa tiene por nombre Enhanced Bonded Particle Model, el cual presenta una serie de deficiencias. De esta manera se trabajó en la creación de un nuevo modelo llamado Flat Joint Model, con la finalidad de tratar de superar las falencias que presenta el Enhanced BPM. De esto nace el objetivo principal de este trabajo, el cual consiste en calibrar este nuevo modelo de contacto, de manera de representar el comportamiento de la roca intacta, que en este caso corresponde a la roca Westerly granite, y poder así comparar los resultados obtenidos por ambos modelos.

Para lograr la calibración del Flat Joint Model, y tener un punto de comparación con datos de laboratorio, se extraen desde la literatura una serie de datos experimentales de diversos autores que realizaron una serie de ensayos de roca a muestras de granito que llevan por nombre Westerly granite. Además se cuenta con los resultados de simulaciones hechas con el modelo Enhanced Bonded Particle Model.

Los resultados de las simulaciones hechas con el Flat Joint Model, luego de haber sido calibrado, nos dicen que este modelo replica con mayor exactitud los parámetros elásticos y de resistencia en el ensayo de compresión uniaxial y de tracción directa, como también representa de mejor manera la envolvente de falla experimental de la roca, sobre todo a confinamientos bajo los 60 [MPa]. Además se resuelve en parte una de las deficiencias del modelo Enhanced BPM, el cual no es capaz de replicar los valores de la razón de Poisson de la roca obteniendo resultados muy por debajo a los experimentales (diferencias del orden de 86%).

Finalmente se concluye que el FJM es mejor modelo de contactos que el Enhanced BPM debido a que es capaz de replicar un comportamiento post-peak de la roca (comportamiento frágil), lo cual era la gran deficiencia del primer modelo. Si bien no se logra representar la fragilidad de la roca a grandes confinamientos, es un gran avance que se tengan comportamientos frágiles aún a 30 [MPa] de confinamiento, siendo que en el Enhanced BPM, a confinamientos de 5 [MPa] ya se presenta una respuesta dúctil de la curva esfuerzo-deformación.

*A mi familia, en especial a mis padres.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera comenzar agradeciendo a mi Profesor Guía Javier Vallejos, quien confió en mí desde un principio, y siempre tuvo la disposición de resolver mis dudas y ayudarme a encaminar este trabajo. Agradecer también a Kimie Suzuki por su gran disposición a resolver mis dudas acerca del software PFC<sup>3D</sup>.

Dar gracias a mi familia, en especial a mis padres, Rubén Salinas y Elizabeth Lara, porque fueron, son y serán un pilar fundamental en mi vida. Que de no haber sido por ellos hoy no estaría escribiendo estas palabras.

También incluir en estos agradecimientos a mi polola Coti, que me acompañó durante toda mi carrera universitaria y siempre estuvo cuando más la necesité. Además de mis compañeros y amigos de la infancia que hasta el día de hoy están conmigo en las buenas y en las malas. Siempre serán una parte importante de mi vida, Chiqui, Dani, Richard, Azocar y Bianca.

Mención honrosa para mis compadres, los mineros. Estoy muy agradecido de haberlos conocido ya que hicieron mi estadía en la universidad inolvidable. Quisiera destacar a mi gran amigo Acro, con el cual pasamos muchas anécdotas juntos. Creo que ninguno de nosotros olvidará que cuando llegábamos a algún “carrete”, simplemente nos catalogaban como “los mineros”.

Finalmente quisiera expresar mi gran orgullo por haber tenido a los abuelos que tuve, Tata Chelo y Abuela Tuca. Esto es para ustedes que siempre quisieron ver a sus nietos ser Profesionales.

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Objetivos .....	2
1.1.1	Objetivo General.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos .....	2
1.2	Alcances.....	2
1.3	Metodología .....	2
1.4	Contenido de la Memoria .....	3
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Características roca estudiada.....	4
2.2	Ensayos en roca intacta.....	5
2.2.1	Ensayo de Tracción Directa.....	6
2.2.2	Ensayo de Compresión Uniaxial.....	6
2.2.3	Ensayo Triaxial Convencional .....	7
2.3	Método de Elementos Discretos (DEM) .....	8
2.4	Particle Flow Code 3D (PFC <sup>3D</sup> ).....	9
2.4.1	Bonded Particle Model (BPM).....	11
2.4.2	Flat Joint Model .....	21
2.5	Ensayos de Roca Intacta en PFC <sup>3D</sup> .....	25
2.6	Trabajos Realizados con Flat Joint Model.....	26
3	METODOLOGÍA .....	27
3.1	Datos Experimentales .....	27
3.2	Resultados Enhanced Bonded Particle Model .....	30
3.3	Análisis de Sensibilidad Micro-Parámetros Flat Joint Model .....	30
3.4	Definición metodología de calibración de Micro-Parámetros .....	30

4	ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	32
4.1	Análisis de Sensibilidad.....	32
4.1.1	Ensayos de Tracción Directa.....	32
4.1.2	Ensayos de Compresión Uniaxial.....	33
4.2	Generación de Metodología de Calibración .....	37
4.3	Calibración Micro-Parámetros.....	38
4.3.1	Calibración Razón de Poisson.....	42
4.3.2	Calibración Resistencia a la tracción .....	43
4.3.3	Calibración Módulo de Young.....	44
4.3.4	Calibración UCS .....	44
4.4	Ensayos Triaxiales Convencionales.....	47
4.4.1	Calibración Envolvente de Falla .....	47
4.4.2	Curvas Esfuerzo-Deformación.....	51
4.4.3	Módulo de Young.....	53
4.4.4	Razón de Poisson.....	55
4.4.5	Umbrales de Daño ( $\sigma_{ci}$ , $\sigma_{cd}$ y $\sigma_{peak}$ ) .....	56
4.4.6	Ángulo de Dilatación.....	60
4.4.7	Ángulo de Fractura .....	61
4.4.8	Módulo Post-Peak .....	63
4.4.9	Implicancia del $f_{jm\_krat}$ en la respuesta triaxial.....	65
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	67
6	BIBLIOGRAFÍA .....	69

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Curva esfuerzo-deformación típica de una roca frágil.....	4
Figura 2-2: Diagrama de transición desde una condición de roca intacta a la de un macizo rocoso muy fracturado (Hoek & Brown, 1997). .....	5
Figura 2-3: (a) Estado de esfuerzos en un ensayo de tracción directa. (b) Trayectoria de esfuerzos ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) en ensayo de tracción directa. ....	6
Figura 2-4: (a) Estado de esfuerzos en un ensayo de compresión uniaxial. (b) Trayectoria de esfuerzos ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) en ensayo de compresión uniaxial. ....	7
Figura 2-5: (a) Estado de esfuerzos en un ensayo triaxial convencional. (b) Trayectoria de esfuerzos ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) en ensayo triaxial convencional. ....	7
Figura 2-6: Efecto del confinamiento en curvas esfuerzo-deformación de una muestra de mármol (Paterson & Wong, 2005). .....	8
Figura 2-7: Ciclo de cálculo utilizado por el método de elementos discretos (Luengo, 2014). .....	9
Figura 2-8: Probeta sintética de roca en PFC <sup>3D</sup> con paredes para la aplicación de carga en ensayo triaxial convencional (Potyondy, 2010b). .....	10
Figura 2-9: Representación Bonded Particle Model (D. Potyondy & Cundall, 2004).....	11
Figura 2-10: Esquema del Modelo Contact Bond (D. Potyondy & Cundall, 2004).....	12
Figura 2-11: Tipos de falla Contact Bond Model (Cho, Martin, & Segó, 2007). .....	13
Figura 2-12: Esquema del Modelo Parallel Bond (D. Potyondy & Cundall, 2004). .....	14
Figura 2-13: Tipos de falla Parallel Bond Model (Itasca, 2008). .....	16
Figura 2-14: Comparación resultados de calibración de granito Lac du Bonnet con BPM versus resultados experimentales (D. Potyondy & Cundall, 2004). .....	17
Figura 2-15: Envolvente de falla criterio Mohr-Coulomb para los contactos (Potyondy, 2010a). .....	18
Figura 2-16: Efecto de nuevos micro-parámetros del Enhanced BPM en el comportamiento del daño en un ensayo de tracción directa (Potyondy, 2010a). .....	18
Figura 2-17: Efecto de nuevos micro-parámetros del Enhanced BPM en el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial en ensayo UCS (Potyondy, 2010a) .....	19

Figura 2-18: Comparación parámetros elásticos (Módulo de Young y Razón de Poisson) obtenidos con EBPM versus datos experimentales (Arteaga, 2015).....	20
Figura 2-19: 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 2-20: (a) Esquema de Flat Joint Contact. (b) Representación de Flat Joint Material. (Potyondy, 2013b). .....	21
Figura 2-21: Tipos de Estados de Flat Joint Contacts (Potyondy, 2014).....	22
Figura 2-22: Cinemática Flat Joint Model (Potyondy, 2012).....	23
Figura 2-23: Cinética Flat Joint Model (Potyondy, 2012).....	24
Figura 2-24: (a) Enhanced BPM Material (izquierda) y FJM Material (derecha). (b) Comparación de número de contactos en una esfera para ambos modelos. (Potyondy, 2013a). .....	25
Figura 2-25: (a) Diferentes formas de aplicación de esfuerzos. (b) Curvas Esfuerzo-Deformación obtenidas con ambos métodos. (Mas Ivars, 2010).....	25
Figura 3-1: Envolvente de falla roca Westerly Granite. ....	27
Figura 3-2: Curvas Esfuerzo-Deformación a distintos confinamientos. ....	29
Figura 3-3: Metodología de calibración Flat Joint Model. ....	31
Figura 3-4: Resumen Metodología. ....	31
Figura 4-1: Efecto <i>fjm_ts</i> en resistencia a la tracción de la roca. ....	32
Figura 4-2: Efecto <i>fjm_krat</i> en resistencia a la tracción de la roca. ....	33
Figura 4-3: Esquema Flat Joint Contact utilizado en simulaciones. ....	34
Figura 4-4: (a) Efecto rigidez en curvas esfuerzo-deformación (b) Efecto rigidez en curva deformación volumétrica. ....	35
Figura 4-5: Efecto del parámetro <i>fjm_coh</i> en curvas esfuerzo-deformación. ....	35
Figura 4-6: Efecto del parámetro <i>fjm_E</i> en curvas esfuerzo-deformación.....	36
Figura 4-7: Efecto razón módulos de deformación en curvas esfuerzo-deformación.....	39
Figura 4-8: Efecto coeficiente de fricción del contacto en curvas esfuerzo-deformación. ....	40
Figura 4-9: Resolución utilizada para ensayos de roca.....	41

Figura 4-10: Estimación de $\nu$ para calibración razón de Poisson.....	42
Figura 4-11: Estimación de $f_{jm\_ts}$ para calibración de resistencia a la tracción.....	43
Figura 4-12: Estimación de $f_{jm\_coh}$ para calibración UCS. ....	45
Figura 4-13: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas por ambos modelos en ensayos Uniaxiales.....	47
Figura 4-14: Envolventes de falla para cada valor de $f_{jm\_fa}$ .....	48
Figura 4-15: Comparación de envolventes de falla entregadas por FJM y Enhanced BPM. ....	49
Figura 4-16: Envolvente de falla roca Westerly Granite obtenida por Haimson & Chang. ....	49
Figura 4-17: Comparación envolvente de falla FJM versus Haimson & Chang. ....	50
Figura 4-18: Curvas esfuerzo-deformación para distintos confinamientos obtenidas mediante FJM.....	51
Figura 4-19: Curvas esfuerzo-deformación ensayo triaxial convencional, confinamiento 5 [MPa] (Kawakata & Shimada, 2000). ....	52
Figura 4-20: Curvas esfuerzo-deformación ensayo triaxial convencional, confinamiento 60 [MPa] (Haimson & Chang, 2000).....	52
Figura 4-21: Curvas esfuerzo-deformación ensayo triaxial convencional, confinamiento 100 [MPa] (Kawakata & Shimada, 2000). ....	53
Figura 4-22: Comportamiento módulo de Young según confinamiento.....	54
Figura 4-23: Comportamiento razón de Poisson según confinamiento. ....	56
Figura 4-24: Comparación entre $\sigma_{ci}$ obtenido por modelos de PFC <sup>3D</sup> y datos de laboratorio. ....	58
Figura 4-25: Comparación entre $\sigma_{ci}$ obtenido por los modelos de PFC <sup>3D</sup> y curvas de Brace & Martin.....	58
Figura 4-26: Comparación entre $\sigma_{cd}$ obtenido por modelos de PFC <sup>3D</sup> y datos de laboratorio. ....	59
Figura 4-27: Comportamiento ángulo de dilatación con respecto al confinamiento (Yuan & Harrison, 2004). ....	60
Figura 4-28: Comportamiento ángulo de dilatación según confinamiento.....	60
Figura 4-29: Efecto del confinamiento en el ángulo de fractura del granito Westerly (Haimson & Chang, 2000).....	61

Figura 4-30: Imagen de probeta al finalizar ensayo triaxial a confinamiento de 5 [MPa] utilizando FJM. ....	61
Figura 4-31: Relación entre ángulo de fractura y ángulo de fricción de la roca.....	62
Figura 4-32: Comparación ángulos de fractura obtenidos por modelos de PFC <sup>3D</sup> versus datos de laboratorio.....	63
Figura 4-33: Comportamiento módulo post-peak según confinamiento. ....	64
Figura 4-34: Efecto parámetro <i>fjm_krat</i> en ensayo triaxial, confinamiento 5 [MPa].....	65
Figura 4-35: Efecto parámetro <i>fjm_krat</i> en ensayo triaxial, confinamiento 20 [MPa].....	65
Figura 4-36: Efecto parámetro <i>fjm_krat</i> en ensayo triaxial, confinamiento 40 [MPa].....	66

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Micro-Parámetros Contact Bond Model .....	13
Tabla 2-2: Micro-Parámetros Bonded Particle Model.....	16
Tabla 2-3: Micro-Parámetros Enhanced Bonded Particle Model.....	19
Tabla 2-4: Micro-Parámetros Flat Joint Model.....	24
Tabla 3-1: Set de datos para obtención de envolvente de falla para roca Westerly Granite .....	28
Tabla 3-2: Parámetros de Resistencia para envolventes de falla Hoek & Brown y Mohr Coulomb.....	29
Tabla 4-1: Efecto N° de elementos en Flat Joint Contact en tiempo de simulación y macro-parámetros .....	34
Tabla 4-2: Efecto <i>fjm_coh</i> en macro-parámetros .....	36
Tabla 4-3: Efecto <i>fjm_E</i> en macro-parámetros.....	37
Tabla 4-4: Valores micro-parámetros previa calibración .....	41
Tabla 4-5: Resultados simulaciones calibración razón de Poisson .....	42
Tabla 4-6: Resultados simulaciones calibración resistencia a la tracción .....	43
Tabla 4-7: Resultados simulaciones calibración módulo de Young.....	44
Tabla 4-8: Resultados simulaciones calibración UCS.....	45
Tabla 4-9: Micro-Parámetros calibrados del modelo FJM .....	46
Tabla 4-10: Comparación macro-parámetros obtenidos por ambos modelos.....	46
Tabla 4-11: Diferencias absolutas entre envolventes experimentales y FJM.....	48
Tabla 4-12: Comparación pares $\sigma_1$ - $\sigma_3$ FJM vs Haimson & Chang .....	50
Tabla 4-13: Resultados variación Módulo de Young según confinamiento .....	54
Tabla 4-14: Resultados variación razón de Poisson según confinamiento .....	55
Tabla 4-15: Umbrales de daño experimentales para confinamientos de 5 [MPa] y 100 [MPa].....	56
Tabla 4-16: Umbrales de daño experimentales para confinamiento de 60 [MPa] .....	57
Tabla 4-17: Resultados $\sigma_{ci}$ entregados por Enhanced BPM y FJM.....	57

Tabla 4-18: Resultados $\sigma_{cd}$ entregados por Enhanced BPM y FJM .....	59
Tabla 4-19: Resultados ángulos de fractura modelos Enhanced BPM y FJM.....	62
Tabla 4-20: Resultados variación módulo post-peak según confinamiento.....	64

# 1 INTRODUCCIÓN

El poseer el conocimiento de las propiedades mecánicas de las rocas es muy importante para los estudios en ingeniería. El problema a ser resuelto comúnmente corresponde al posible fallo en el soporte de cargas en distintas labores mineras. Es por esto que es de suma importancia estar al tanto de las propiedades de resistencia del material en cuestión. Es aquí donde juegan un papel importante los ensayos de roca.

El poder caracterizar a la roca intacta de buena manera, representa un punto de partida en el estudio del macizo rocoso, puesto que nos entrega los parámetros necesarios para la caracterización y calibración de modelos constitutivos. Estos modelos son los que permiten entender ciertos fenómenos que tienen lugar durante los ensayos (proceso de generación, localización y evolución de falla) al poder aislar y controlar determinadas variables. De esta manera es posible tener un mejor control de la estabilidad, pudiendo determinar por ejemplo la extensión de zonas plásticas alrededor de excavaciones subterráneas.

Este tipo de información es relevante a la hora de determinar las características de la fortificación requerida por túneles, lo que a su vez se ve reflejado en la mejora de las condiciones de seguridad y reducción de costos asociados.

Además de esto, con la masificación de los métodos mineros de explotación por hundimiento (Block/Panel Caving, Sublevel Caving) el comportamiento post-peak de la roca, junto con la dilatación adquieren gran importancia. Esto debido a que cuando la roca ve sobrepasada su resistencia (comportamiento post-falla), el macizo rocoso puede sufrir una súbita disminución de su capacidad de resistir esfuerzos. Esto además se asocia con una notable dilatación de los trozos de roca quebrada. Es de esta manera como toma gran importancia el poder explicar la respuesta de ensayos mediante el análisis de las curvas esfuerzo-deformación tanto en sus zonas de pre y post peak.

Cuando se usan modelos constitutivos basados en plasticidad para estudiar la falla progresiva de los macizos rocosos, se necesita una estimación de las características del comportamiento post-peak del macizo rocoso (Hoek & Brown, 1997). Aquí es donde aparece el desafío de poder representar a la roca intacta mediante elementos discretos, ya que al poder plasmar sus características de resistencia, como también el comportamiento post-rotura, se tiene un punto de partida para el estudio de la conducta del macizo en condiciones de esfuerzos mayores a su resistencia (Caving).

Si bien la tarea de establecer las propiedades mecánicas de las rocas se lleva a cabo principalmente en laboratorio (Paterson & Wong, 2005), lo cual está relativamente bien establecido, esto a veces corresponde a una tarea muy laboriosa y costosa. Es por esto que se busca lograr una buena representación de estos ensayos mediante este modelo de partículas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

Como objetivo general de esta Memoria de Título se tiene el comparar simulaciones de modelos de elementos discretos, basado en la mecánica de partículas, aplicados al comportamiento de roca intacta.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Entre los objetivos específicos se encuentran:

- Calibración de Modelo de Elementos Discretos, específicamente el Flat Joint Model.
- Simular el comportamiento de roca intacta en ensayos de roca mediante elementos discretos.
- Comparar los resultados del modelamiento de dos modelos de elementos discretos con resultados de laboratorio obtenidos de la literatura.

## **1.2 Alcances**

Para el desarrollo de este trabajo se utiliza el código PFC3D. El modelo con el cual se trabaja, se calibra con resultados de ensayos de laboratorio (Ensayos de Tracción, Uniaxial y Triaxial Convencional) disponibles en la literatura para la roca Westerly Granite. De esta forma se comparan cualitativa y cuantitativamente dos modelos de elementos discretos (Bonded Particle Model y Flat Joint Model).

## **1.3 Metodología**

La metodología utilizada para el cumplimiento de los objetivos antes planteados fue la siguiente:

- Aprender a utilizar Software PFC3D.
- Reconocer valores de algunos parámetros de entrada (Tamaño de probeta, densidad partículas, etc.).
- Realización de Simulaciones para Calibración.
- Análisis de resultados de simulaciones.
- Comparación de resultados obtenidos por Flat Joint Model con Enhanced Bonded Particle Model y datos de la literatura.

## 1.4 Contenido de la Memoria

A continuación se presentan los contenidos de cada uno de los capítulos de la presente memoria de título.

La primera parte de este trabajo, contenida en el **Capítulo 1**, corresponde a la Introducción, junto con los objetivos y alcances de la memoria.

El **Capítulo 2** contiene la Revisión Bibliográfica, en la cual se encuentran todos los antecedentes obtenidos de la literatura para poder realizar este trabajo, como la explicación del comportamiento de los distintos modelos de elementos discretos a ser comparados en este trabajo.

La metodología seguida para realizar la calibración del Flat Joint Model (FJM) es exhibida en el **Capítulo 3**, en donde se explica que este trabajo se dividió en dos etapas, siendo la primera de recopilación de datos, terminando por la obtención de resultados con el modelo FJM.

En el **Capítulo 4** se muestran el análisis y los resultados obtenidos en esta investigación. En donde es posible ver los micro-parámetros utilizados para lograr los resultados obtenidos con el modelo.

Finalmente las conclusiones y recomendaciones se indican en el **Capítulo 5**.

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Características roca estudiada

La roca utilizada para el estudio del presente trabajo corresponde a un granito de nombre Westerly Granite. Este tipo de roca posee una baja porosidad, es de alta resistencia, isotrópica casi completa, con elasticidad lineal y homogénea (Haimson & Chang, 2000). Este granito corresponde a una roca frágil de alta resistencia. En la Figura 2-1 se observa una curva esfuerzo-deformación típica de un ensayo de compresión uniaxial a una roca frágil, en donde se puede apreciar que dicha curva se divide en “secciones” de comportamiento micro-estructural.

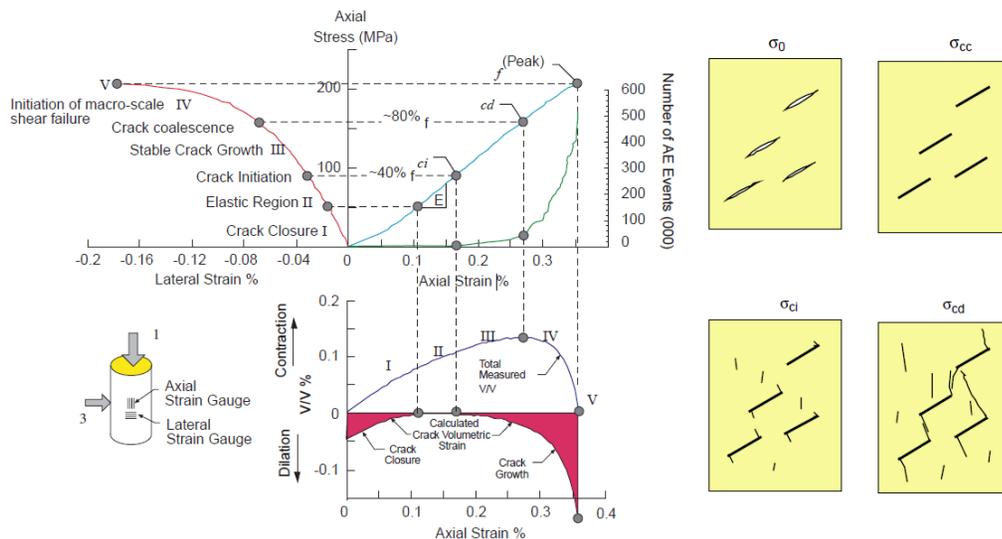


Figura 2-1: Curva esfuerzo-deformación típica de una roca frágil.

Las distintas “secciones” en las que se divide la curva son:

- Una zona lineal elástica, entre el esfuerzo al cual se cierran las grietas pre-existentes ( $\sigma_{cc}$ ) y el inicio de daño ( $\sigma_{ci}$ ).
- Una zona en la que las grietas comienzas a propagarse, entre el inicio de daño y el umbral de daño ( $\sigma_{cd}$ ).
- Una zona en la que la deformación volumétrica pasa de un estado contractivo a dilatante.

La región post-peak 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 (Paterson & Wong, 2005). Es así como es de gran importancia lograr una buena representación de la región post-falla de las curvas esfuerzo-deformación para distintos confinamientos, ya que nos da información inicial del comportamiento de esta roca en el Caving.

## 2.2 Ensayos en roca intacta

Se define como roca intacta a un volumen pequeño de roca, el cual debe estar libre de irregularidades y discontinuidades que influyan en la cinemática de su ruptura. En la Figura 2-2 es posible observar esquemáticamente la diferencia entre roca intacta y macizo rocoso.

Los ensayos en roca intacta permiten identificar y clasificar al material ensayado, obteniendo parámetros de resistencia y rigidez que son primordiales para una descripción cuantitativa de la roca. Los ensayos están diseñados para replicar los modos de falla lo cual permite replicar las condiciones de carga de terreno, siendo esto muy importante para el diseño minero.

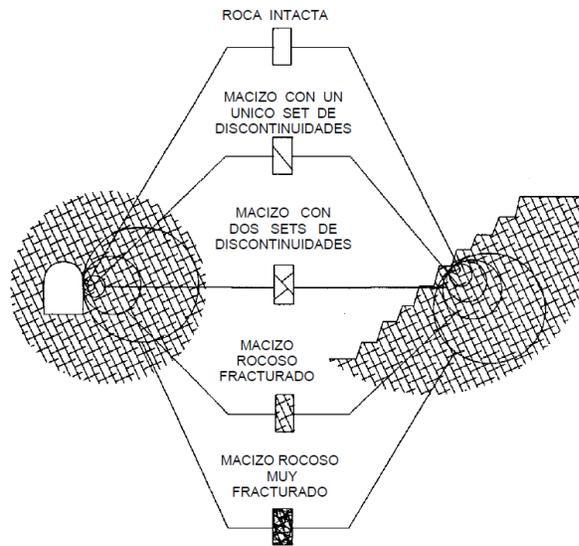


Figura 2-2: Diagrama de transición desde una condición de roca intacta a la de un macizo rocoso muy fracturado (Hoek & Brown, 1997).

Existe una variedad de ensayos de roca intacta para encontrar ciertos parámetros del material. Para efectos de este trabajo se considerarán tres tipos de ensayo, ya que permiten obtener los parámetros necesarios para la calibración:

- **Ensayo de Tracción Directa:** Permite encontrar la resistencia a tracción de la roca.
- **Ensayo de Compresión Uniaxial:** Permite encontrar la resistencia a la compresión uniaxial, además de los parámetros elásticos (Módulo de Deformación y Razón de Poisson).
- **Ensayo Triaxial Convencional:** 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 (Figura 2-3a). Es muy difícil su realización principalmente por dos razones (Hudson & Harrison, 2000):

- Difícil de fijar los bordes de la muestra para aplicar la carga, y
- 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 ( $\sigma_t$ ), el cual sirve como dato de entrada para estimar la envolvente de falla. Con lo que respecta a la trayectoria de esfuerzos en un ensayo de tracción directa, el testigo se somete a una carga de tracción (Figura 2-3b), la cual se aplica en los extremos de la muestra hasta que esta falle ( $\sigma_t$ ).

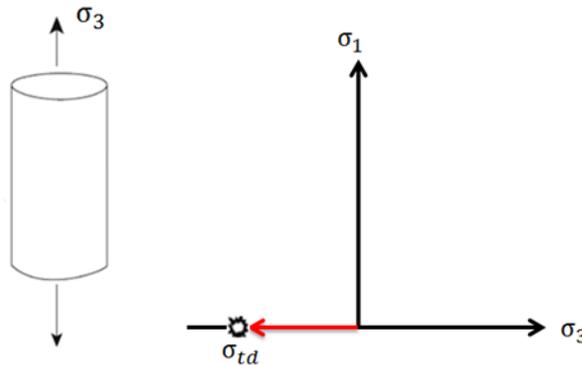


Figura 2-3: (a) Estado de esfuerzos en un ensayo de tracción directa. (b) Trayectoria de esfuerzos ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) en ensayo de tracción directa.

### 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 (Figura 2-4a), 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 y de resistencia tales como el Módulo de Young (E), Razón de Poisson ( $\nu$ ) y resistencia a la compresión uniaxial ( $\sigma_{UCS}$ ).

Con lo que respecta a la trayectoria de esfuerzos en un ensayo de compresión uniaxial, la muestra se somete a una carga axial que comprime el testigo hasta que se alcanza la falla ( $\sigma_{UCS}$ ) de la muestra (Figura 2-4b).

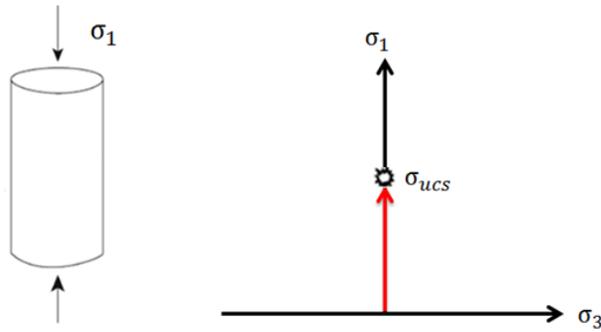


Figura 2-4: (a) Estado de esfuerzos en un ensayo de compresión uniaxial. (b) Trayectoria de esfuerzos ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) en ensayo de compresión uniaxial.

### 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 en compresión (Figura 2-5a), mientras que en el caso contrario (esfuerzo principal intermedio igual al mayor) representa un ensayo triaxial en extensión.

Con lo que respecta a la trayectoria de esfuerzos en un ensayo triaxial convencional, este comienza con la aplicación de un esfuerzo isótropo ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) hasta alcanzar el confinamiento deseado, para luego aplicar una carga axial ( $\sigma_1$ ), manteniendo el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ) constante, hasta alcanzar la rotura (Figura 2-5b).

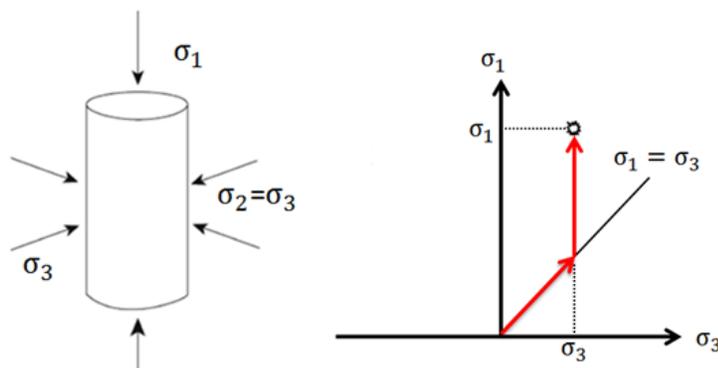


Figura 2-5: (a) Estado de esfuerzos en un ensayo triaxial convencional. (b) Trayectoria de esfuerzos ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) en ensayo triaxial convencional.

### 2.2.3.1 Efecto del Confinamiento en Curvas Esfuerzo-Deformación

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  $\sigma_3$  (Paterson & Wong, 2005). En la Figura 2-6 hay un claro ejemplo de lo antes mencionado para ensayos realizados a muestras de mármol.

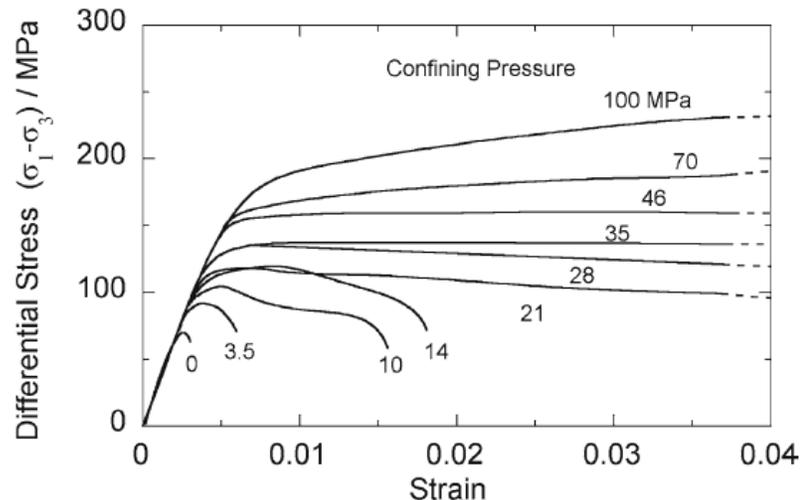


Figura 2-6: Efecto del confinamiento en curvas esfuerzo-deformación de una muestra de mármol (Paterson & Wong, 2005).

Esta transición frágil-dúctil nos indica que a medida que se aumenta el confinamiento la roca es capaz de resistir mayores deformaciones antes de alcanzar la falla.

Es preciso mencionar que para rocas no porosas ni alteradas como lo es el Granito, no presentan esta transición frágil-dúctil sino a un confinamiento de más de 1000 [MPa] (Shimada, Cho, & Yukutake, 1983).

### 2.3 Método de Elementos Discretos (DEM)

Peter Cundall es quien introduce el método de elementos discretos (Peter Alan Cundall, 1971) para el análisis de problemas de mecánica de rocas. Se dice que un programa es de métodos discretos si cumple con (Peter 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.

PFC<sup>3D</sup> (Particle Flow Code 3D) (Itasca, 2008), 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.

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 (Figura 2-7). 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 (D. Potyondy & Cundall, 2004).

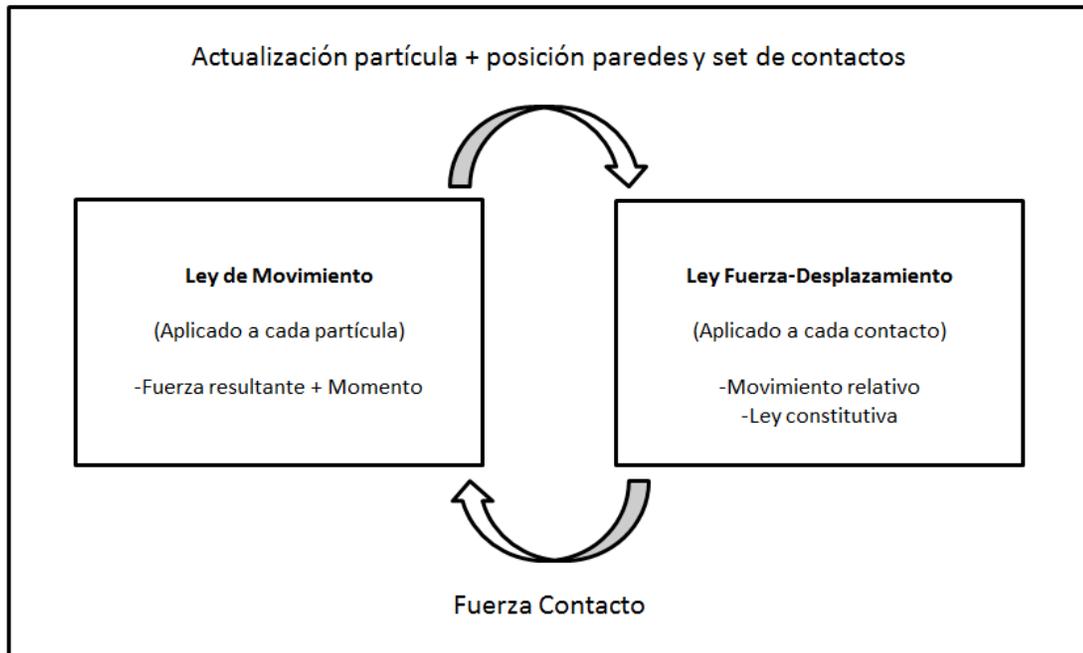


Figura 2-7: Ciclo de cálculo utilizado por el método de elementos discretos (Luengo, 2014).

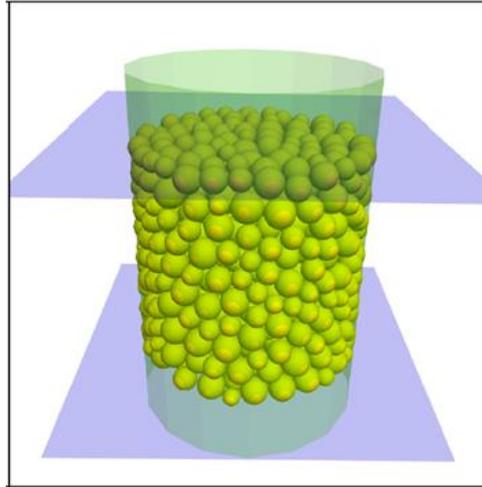
El método de elementos discretos se basa en la idea de que el paso de tiempo escogido para la realización de los cálculos de interacción puede ser tan pequeño que, durante un solo paso de tiempo (time-step), las perturbaciones no pueden propagarse más allá de sus vecinos inmediatos.

#### 2.4 Particle Flow Code 3D (PFC<sup>3D</sup>)

La compañía Itasca Consulting Group Inc. implementa una serie de programas para el estudio y análisis geomecánico, entre los cuales se encuentra el programa PFC tanto en sus versiones en dos y tres dimensiones (PFC<sup>2D</sup> y PFC<sup>3D</sup> respectivamente).

PFC<sup>3D</sup> 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.

Con esta representación de la roca es posible utilizar PFC<sup>3D</sup> para la realización de ensayos de roca, ya que además del arreglo de partículas que utiliza para generar al testigo, también puede representar condiciones de borde al conjunto de esferas mediante paredes (Figura 2-8), lo cual es una de las formas de representar el confinamiento en un ensayo triaxial convencional, además de la carga axial.



**Figura 2-8: Probeta sintética de roca en PFC<sup>3D</sup> con paredes para la aplicación de carga en ensayo triaxial convencional (Potyondy, 2010b).**

Cabe destacar que el término partícula difiere de su definición común en el campo de la mecánica, en el cual se toma como un cuerpo de tamaño insignificante que ocupa un solo punto en el espacio. En este contexto el término partícula indica a un cuerpo que ocupa una cantidad finita de espacio (D. Potyondy & Cundall, 2004).

Para el modelamiento con elementos distintos en PFC<sup>3D</sup>, se tienen ciertos supuestos (Itasca, 2008):

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 en 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 PFC<sup>3D</sup> es lograr una calibración para obtener envolventes de falla y propiedades elásticas (módulo de Young y razón de Poisson). Para representar el daño durante un ensayo, Particle Flow Code permite la formación, crecimiento e interacción de grietas, considerando para esto la falla de los vínculos entre las partículas (Suzuki Morales, 2013). Para lograr la calibración de los modelos en PFC<sup>3D</sup> se deben variar micro-parámetros, los cuales cambian las condiciones en las cuales interactúan las partículas entre sí. Los modelos a ser comparados en este trabajo son el Enhanced Bonded Particle Model y el Flat Joint Model, los cuales representan distintos tipos de contacto entre las partículas.

#### 2.4.1 Bonded Particle Model (BPM)

El Bonded Particle Model corresponde a un modelo de partículas que representa al macizo rocoso utilizando el programa PFC. Este simula el comportamiento mecánico de una colección de granos (partículas esféricas) unidos por cemento (Parallel Bond Contact) (Figura 2-9).

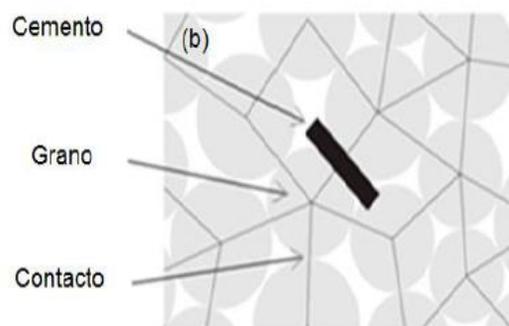


Figura 2-9: Representación Bonded Particle Model (D. Potyondy & Cundall, 2004).

El comportamiento mecánico de este sistema se describe por el movimiento de cada partícula, y la acción de la fuerza y el momento sobre cada contacto. En este modelo de partículas existen dos tipos de contactos, uno corresponde al enlace de contacto (Contact Bond), y otro al enlace paralelo (Parallel Bond). El primero representa un contacto puntual de tamaño muy pequeño, el cual se ubica exactamente en el punto en el que dos partículas se encuentran unidas, mientras que el segundo posee tamaño finito, y corresponde a una sección rectangular (2D) o circular (3D) ubicado entre dos granos (corresponde al cemento mostrado en la Figura 2-9). La diferencia entre estos tipos de contactos entre partículas, radica en que el Contact Bond permite transmitir fuerza entre partículas, mientras que el Parallel Bond permite transmitir a la vez fuerza y momento. El Bonded Particle Model permite que ambos contactos estén activados a la vez, existiendo hasta que alcancen la falla.

### 2.4.1.1 Contact Bond (CB)

Este tipo de contacto representa al punto donde interactúan las esferas. En el caso de no existir cemento entre las partículas, entonces estas pueden moverse independientes unas de otras, pudiendo rotar debido a que el Contact Bond no posee resistencia al momento, de manera que las esferas sólo interactuarán en dicho punto de contacto. Esta interacción se puede idealizar como un resorte, el cual posee una constante de rigidez normal ( $k^n$ ) y otra de corte ( $k^s$ ), además de una resistencia a la tracción ( $F_c^n$ ) y al corte ( $F_c^s$ ). Estas rigideces están dadas por:

$$k^n = 2DE \qquad k^s = k^n / \left(\frac{k^n}{k^s}\right)$$

Donde,

- ✓ E es el módulo de Young de la partícula,
- ✓ D es el diámetro de la partícula, y
- ✓  $k^n/k^s$  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. En la Figura 2-10 se puede observar lo antes mencionado:

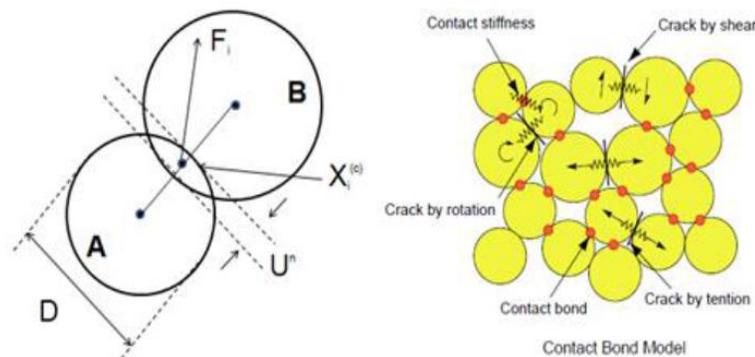


Figura 2-10: Esquema del Modelo Contact Bond (D. Potyondy & Cundall, 2004).

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 Contact Bond ( $F^n \geq F_c^n$ ), entonces este fallará. Luego las fuerzas normal y de corte serán nulas.
- ✓ Si la fuerza de corte es igual o mayor a la resistencia al corte del Contact Bond ( $F^s \geq F_c^s$ ), entonces este fallará. Pero a diferencia del caso anterior, las fuerzas del contacto no cambian ya que actúa la fricción sobre las partículas.

En la Figura 2-11 se puede observar el comportamiento fuerza-desplazamiento del Contact Bond Model, en donde se relacionan las componentes normal y de corte de la fuerza con el desplazamiento.

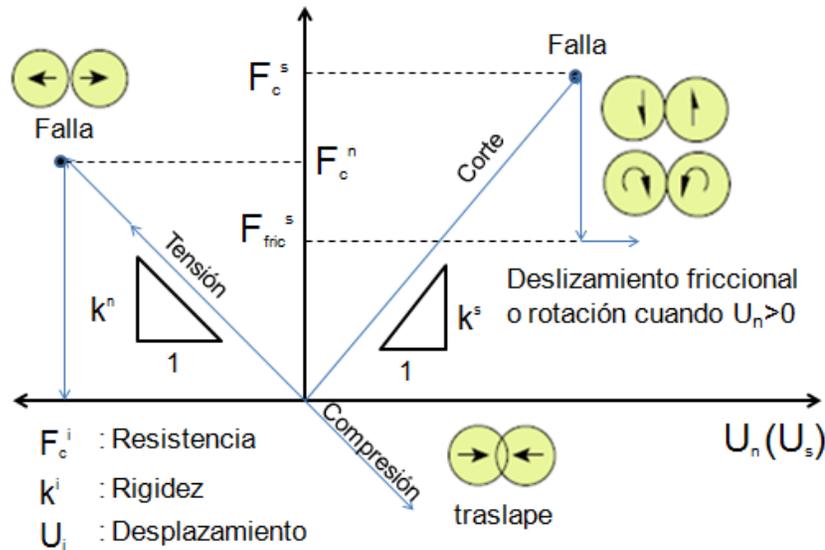


Figura 2-11: Tipos de falla Contact Bond Model (Cho, Martin, & Segoo, 2007).

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.

De esta manera, los micro-parámetros necesarios en este modelo de contacto son los siguientes:

Tabla 2-1: Micro-Parámetros Contact Bond Model

<b>Micro-Parámetro</b>	<b>Símbolo FISH</b>	<b>Descripción</b>
$E$	<i>ba_Ec</i>	Módulo de Young de las Partículas [GPa]
$k^n/k^s$	<i>ba_krat</i>	Razón entre rigidez normal y de corte de las partículas
$\rho$	<i>ba_rho</i>	Densidad del material [kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	<i>ba_fric</i>	Coeficiente de fricción de las partículas
$D_{m\acute{a}x}/D_{m\acute{i}n}$	<i>mg_Rrat</i>	Razón entre diámetro máximo y mínimo de las partículas

### 2.4.1.2 Parallel Bond (PB)

El Parallel Bond (o enlace paralelo) representa una especie de “cemento”, el cual establece una interacción elástica entre partículas, y que les permite deslizarse entre sí.

Este contacto tiene la capacidad de actuar de forma paralela con el Contact Bond (CB). A diferencia con el contacto anterior, el Parallel Bond, además de tener asociada una fuerza, también tiene asociado un momento ( $\bar{F}_i$  y  $\bar{M}_i$  respectivamente), los cuales a su vez se dividen en una componente normal y una de corte (Figura 2-12).

$$\text{Componentes de Fuerza: } \bar{F}_i = \bar{F}_i^n + \bar{F}_i^s$$

$$\text{Componentes de Momento: } \bar{M}_i = \bar{M}_i^n + \bar{M}_i^s$$

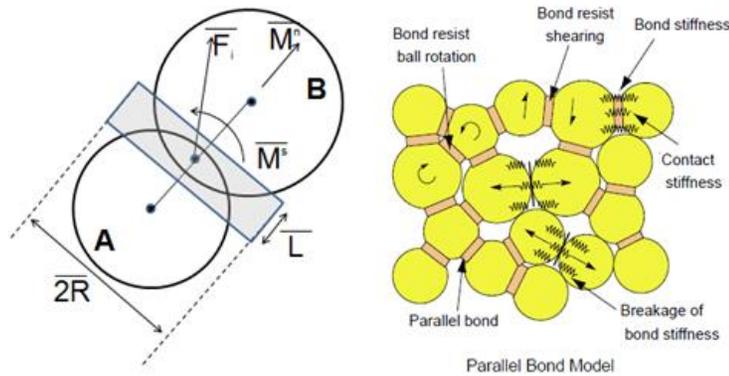


Figura 2-12: Esquema del Modelo Parallel Bond (D. Potyondy & Cundall, 2004).

Al igual que en el modelo de Contact Bond (CB), el Parallel Bond 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:

$$\bar{k}^n = \frac{\bar{E}_C}{R^{(A)} + R^{(B)}}$$

$$\bar{k}^s = \bar{k}^n / (\bar{k}^n / \bar{k}^s)$$

Donde,

- ✓  $\bar{E}_C$  corresponde al módulo de Young del Parallel Bond.
- ✓  $\bar{k}^n / \bar{k}^s$  es la razón entre las rigideces normal y de corte.
- ✓  $R^{(A)}$  y  $R^{(B)}$  corresponden a los radios de las partículas que comparten el PB.

Como se observa en la Figura 2-12, el Parallel Bond corresponde a un “disco” de ancho  $\bar{L}$  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, y
- ✓  $R^{(i)}$  es el radio de las partículas que comparten el PB.

Es posible estimar una resistencia a la tracción y al corte para los Parallel Bond ( $\bar{\sigma}_c$  y  $\bar{\tau}_c$  respectivamente), y de esta manera definir un criterio de falla para este contacto. Si los esfuerzos máximos superan a la resistencia a la tracción ( $\bar{\sigma}^{max} \geq \bar{\sigma}_c$ ) o a la resistencia al corte ( $\bar{\tau}^{max} \geq \bar{\tau}_c$ ), entonces el enlace paralelo fallará.

Los esfuerzos máximos de tracción y de corte se definen a continuación:

$$\bar{\sigma}^{max} = -\frac{\overline{F_l^n}}{A} + \frac{\bar{\beta}|\overline{M_l^s}|}{I} \bar{R}$$

$$\bar{\tau}^{max} = -\frac{|\overline{F_l^s}|}{A} + \frac{\bar{\beta}|\overline{M_l^s}|}{J} \bar{R}$$

Donde,

- ✓  $\overline{F_l^n}$  es la componente normal de la fuerza en el Parallel Bond.
- ✓  $\overline{F_l^s}$  es la componente de corte de la fuerza en el Parallel Bond.
- ✓  $A$  es el área de la sección del Parallel Bond.
- ✓  $I$  es el momento de inercia.
- ✓  $J$  es el momento polar de inercia.
- ✓  $\bar{\beta}$  es el factor de contribución de momento (se considera igual a uno).

En la Figura 2-13 se puede observar el comportamiento fuerza-desplazamiento del Parallel Bond Contact, en donde se relacionan las componentes normal y de corte de la fuerza con el desplazamiento.

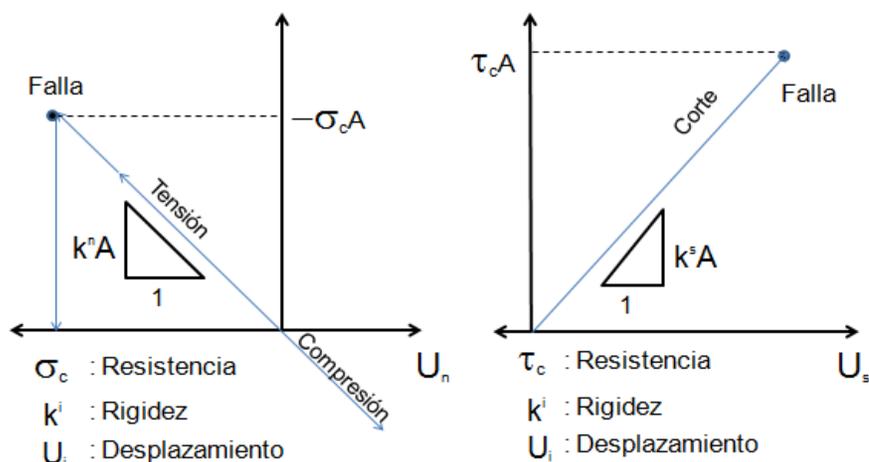


Figura 2-13: Tipos de falla Parallel Bond Model (Itasca, 2008).

Al igual que en el modelo de contacto anterior, se necesitan de micro-parámetros para dar las propiedades a cada unión entre partículas.

Tabla 2-2: Micro-Parámetros Bonded Particle Model

Micro-Parámetro	Símbolo FISH	Descripción
$E$	$pb\_Ec$	Módulo de Young de los Contactos [GPa]
$\bar{k}^n / \bar{k}^s$	$pb\_krat$	Razón entre rigidez normal y de corte del contacto
$\sigma_c$	$pb\_sn$	Resistencia a la tracción [MPa]
$\tau_c$	$pb\_ss$	Resistencia al corte [MPa]
$\lambda$	$pb\_Rmult$	Multiplicador de radios
$\beta$	$mg\_wfac$	Factor de contribución de momento

Si bien la forma de representar a la roca por medio del Bonded Particle Model es adecuada, ya que considera una material granular (esferas) cementado (Parallel Bonds), se tiene que este modelo presenta algunas deficiencias en su respuesta macroscópica (D. Potyondy & Cundall, 2004):

- No es capaz de reproducir ángulos de fricción mayores a  $30^\circ$ ,
- No es capaz de reproducir razones entre la resistencia a la compresión uniaxial y la resistencia a la tracción ( $\sigma_{ucs} / \sigma_t$ ) superiores a cuatro en 3D y a seis en 2D, y
- Genera una envolvente de falla lineal (Figura 2-14).

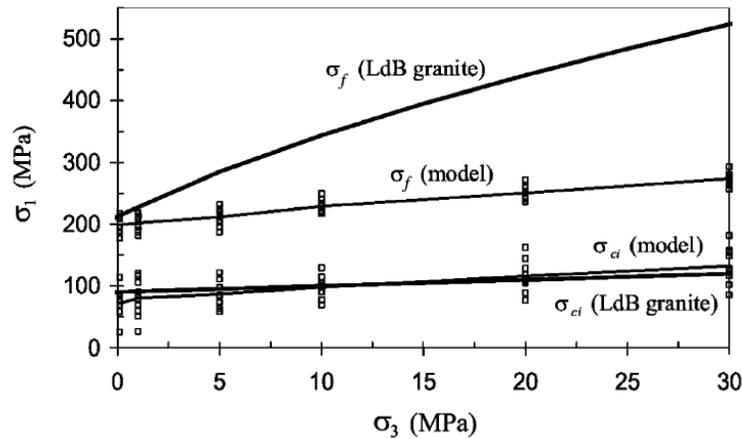


Figura 2-14: Comparación resultados de calibración de granito Lac du Bonnet con BPM versus resultados experimentales (D. Potyondy & Cundall, 2004).

En pocas palabras, este modelo no permite representar todas las características de una roca dura y frágil. Es por esto que ITASCA trabajó en un modelo mejorado.

#### 2.4.1.3 Enhanced Bonded Particle Model

Debido a las limitaciones sufridas por el Bonded Particle Model antes mencionadas, se modificó el modelo a nivel micro-estructural de manera de mejorar el comportamiento macroscópico. De esta manera se obtiene un modelo mejorado llamado Enhanced Bonded Particle Model (EBPM).

Para eliminar las limitaciones del modelo estándar, se realizaron las siguientes modificaciones (Potyondy, 2010a):

- Se modificó la manera de calcular los esfuerzos máximos de tracción y de corte que definen el criterio de falla del Parallel Bond. En el modelo mejorado se suele considerar que la contribución del momento para el cálculo de los esfuerzos máximos es igual a cero ( $\bar{\beta} = 0$ ), aunque puede tomar cualquier valor entre 0 y 1:

$$\bar{\sigma}^{max} = -\frac{\overline{F_l^n}}{A} \quad \bar{\tau}^{max} = -\frac{\overline{|F_l^s|}}{A}$$

Esto permite al nuevo modelo poder representar de mejor manera la razón  $\sigma_{ucs}/\sigma_t$ , como también el ángulo de fricción.

- En el modelo estándar, la manera de manejar la resistencia al corte de los vínculos es mediante el micro-parámetro  $\bar{\tau}_c$ , el cual se considera igual a la cohesión (considerando  $\phi = 0$ ). En el Enhanced Bonded Particle Model, se utiliza el criterio de Mohr-Coulomb (Figura 2-15). De esta manera, la resistencia al corte se representa mediante dos micro-parámetros, la cohesión ( $\bar{c}$ ) y el ángulo de fricción ( $\bar{\phi}$ ).

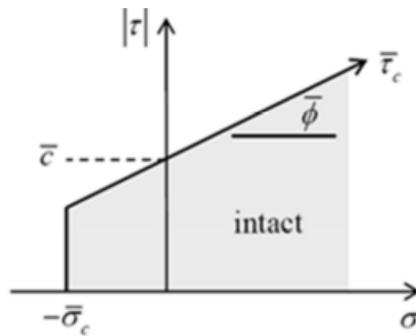


Figura 2-15: Envoltente de falla criterio Mohr-Coulomb para los contactos (Potyondy, 2010a).

- La última modificación implementada en el modelo BPM, corresponde a la manera en que se distribuye la carga en los contactos entre partículas. El estándar BPM considera que la carga es repartida entre el contacto puntual (Contact Bond) y el cemento (Parallel Bond), mientras que el modelo mejorado estipula que el cemento es el que soporta toda la carga hasta fallar y luego la transfiere al contacto entre partículas. Es así como se integra un nuevo micro-parámetro al modelo ( $B_{pb\_all}$ ), el cual adquiere un valor igual a uno si la carga es llevada completamente por el Parallel Bond, o un valor igual a cero si es que no.

Es así como Potyondy (2010a) obtiene los siguientes resultados en ensayos de tracción directa y de compresión uniaxial:

- **Ensayo de Tracción Directa:** Al remover la contribución del momento del criterio de falla ( $\bar{\beta} = 0$ ) se incrementa la resistencia a la tracción, pero no existe un efecto notorio en el comportamiento del daño. Con respecto al parámetro  $B_{pb\_all}$ , no posee un efecto directo en la resistencia a la tracción como también en el comportamiento del daño. Es así como todo el daño consiste en la falla de los contactos por tracción, por lo que la resistencia a la tracción se ve solo afectada por  $\bar{\sigma}_c$  y no por  $\bar{c}$  (Figura 2-16).

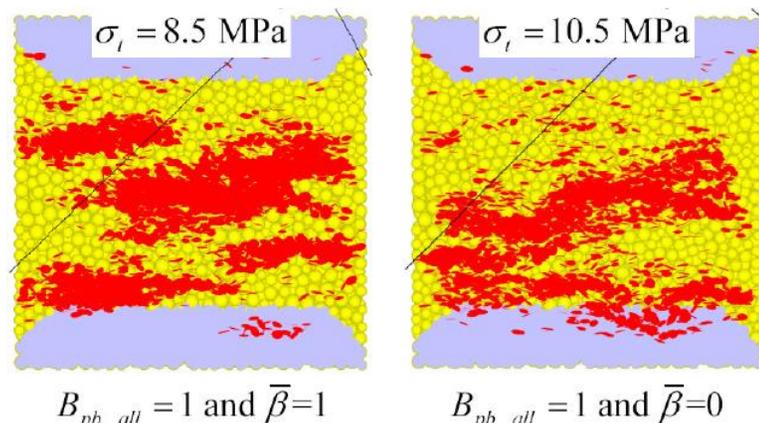


Figura 2-16: Efecto de nuevos micro-parámetros del Enhanced BPM en el comportamiento del daño en un ensayo de tracción directa (Potyondy, 2010a).

- **Ensayo de Compresión Uniaxial:** Al transferir toda la carga al Parallel Bond ( $B_{pb\_all} = 1$ ) se reduce el valor de la razón de Poisson, pero no se encuentra algún otro efecto. El remover el efecto del momento en la estimación de los esfuerzos máximos ( $\bar{\beta} = 0$ ) tiene diversos efectos (Figura 2-17). Se alcanza un mayor valor de la resistencia peak, además de una notoria pérdida de resistencia pre-peak que coincide con la iniciación del daño (curva azul). Con lo que respecta a la curva de deformación volumétrica, el comienzo de la dilatancia es entre la iniciación de daño y el esfuerzo peak.

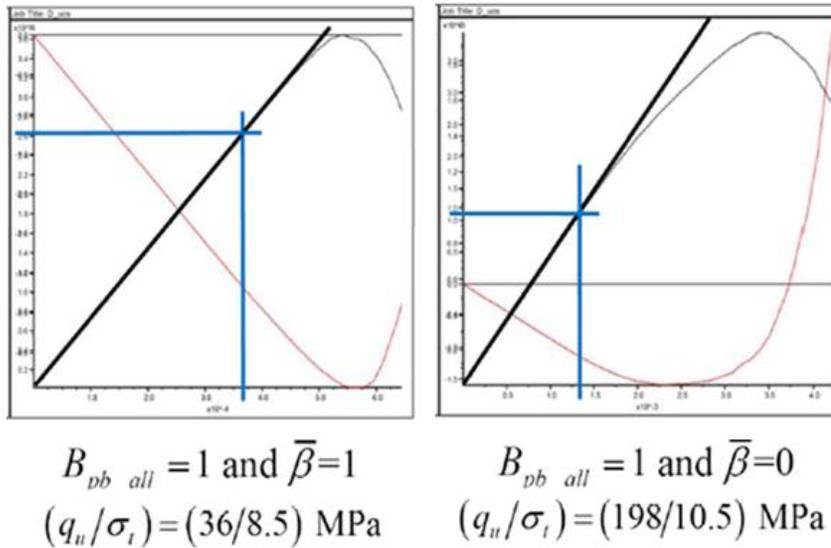


Figura 2-17: Efecto de nuevos micro-parámetros del Enhanced BPM en el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación y deformación volumétrica-deformación axial en ensayo UCS (Potyondy, 2010a)

De esta manera los micro-parámetros que controlan al Enhanced Bonded Particle Model son los siguientes:

Tabla 2-3: Micro-Parámetros Enhanced Bonded Particle Model

Micro-Parámetro	Símbolo FISH	Descripción
$E$	$pb\_Ec$	Módulo de Young de los Contactos [GPa]
$k^n/k^s$	$pb\_krat$	Razón entre rigidez normal y de corte del contacto
$\sigma_c$	$pb\_sn$	Resistencia a la tracción [MPa]
$\bar{c}$	$pb\_coh$	Cohesión [MPa]
$\lambda$	$pb\_Rmult$	Multiplicador de los radios
$\phi$	$pb\_phi$	Ángulo de fricción [°]
$\beta$	$mg\_wfac$	Factor de contribución de momento
$B_{pb\_all}$	$pb\_all$	Factor de carga del contacto

Aún con las modificaciones hechas al BPM, siguen habiendo deficiencias en el modelo (Arteaga, 2015), lo que motiva a la investigación de una nueva representación de los contactos entre partículas.

Las deficiencias que tiene el EBPM en las respuestas macroscópicas son las siguientes:

- La calibración de la razón de Poisson está lejos de alcanzar el valor de laboratorio (Figura 2-18), ya que toma valores menores a los experimentales:

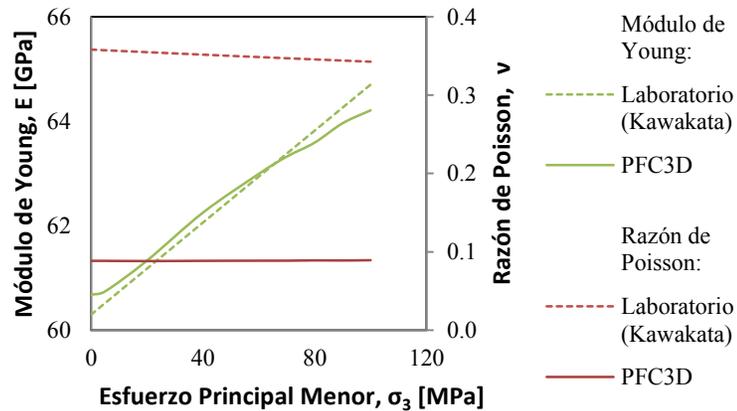


Figura 2-18: Comparación parámetros elásticos (Módulo de Young y Razón de Poisson) obtenidos con EBPM versus datos experimentales (Arteaga, 2015).

- El EBPM no modela bien el post-peak de la curva esfuerzo-deformación. Esta es la principal razón que motiva la realización de este trabajo. En la Figura 2-19 es posible observar que el EBPM no es capaz de representar una curva frágil.

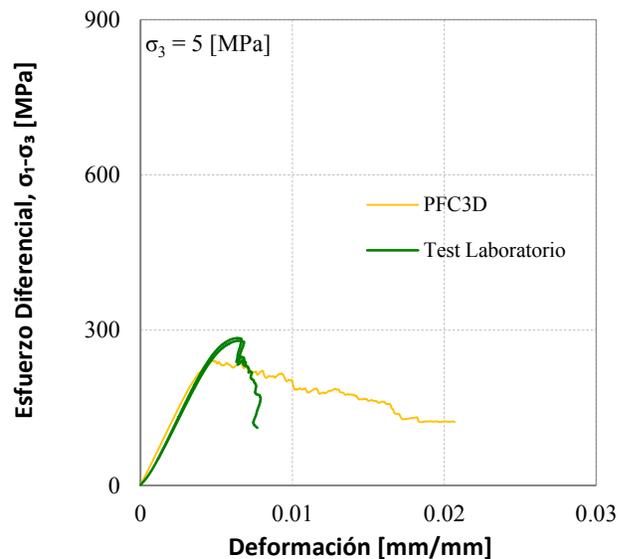


Figura 2-19: Representación de curva esfuerzo-deformación obtenida por ensayo triaxial con confinamiento de 5 [MPa] por EBPM (en amarillo) vs curva experimental (en verde) (Arteaga, 2015).

## 2.4.2 Flat Joint Model

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

Un Flat Joint Contact simula el comportamiento de una interface entre dos superficies ideales planas de largo finito, cada una conectada rígidamente a una partícula. La interface 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 siguiente figura:

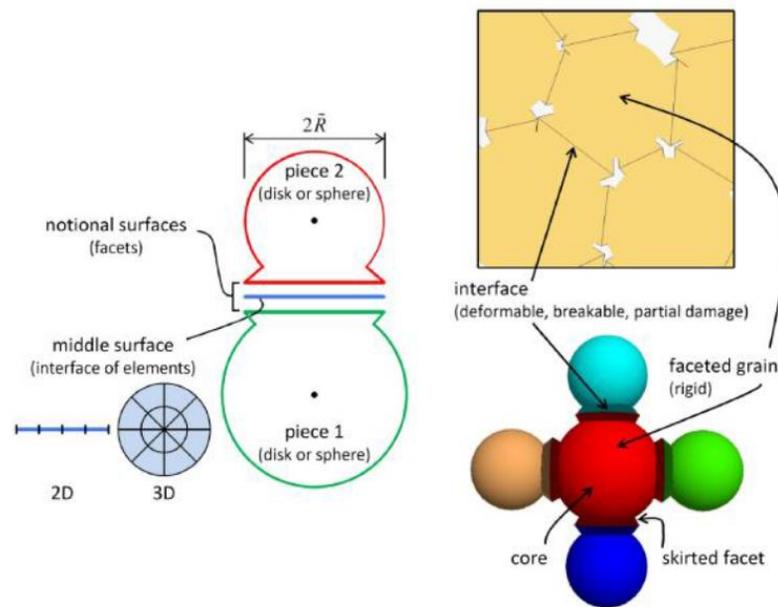


Figura 2-20: (a) Esquema de Flat Joint Contact. (b) Representación de Flat Joint Material. (Potyondy, 2013b).

A diferencia del Enhanced Bonded Particle Model, este modelo posee un contacto que se divide en elementos, de los cuales cada uno posee propiedades de resistencia. Es por esto que cada elemento puede fallar independiente de los demás. De esta manera el comportamiento mecánico de la interface puede ser elástico cuando todos los segmentos se encuentran unidos, como friccional cuando estos han fallado. Es así como un Flat Joint Contact puede representar un daño parcial, al tener solo algunos elementos sin fallar.

Tanto en el EBPM como en el FJM, se posee un contacto de largo finito. La diferencia radica en que en el Parallel Bond Contact la interface se encuentra unida en todo su largo, por lo que al fallar el contacto, el Parallel bond es removido no pudiendo resistir rotación, mientras que en el Flat Joint Contact, la interface esta discretizada en elementos, pudiendo comportarse como un contacto completamente unido a uno completamente roto, pero al no ser removido, resiste la rotación.

### 2.4.2.1 Microestructura de un Material Flat-Jointed

Cada Flat Joint Contact posee un estado inicial diferente a los demás dependiendo de los valores entregados a ciertos micro-parámetros. Este estado puede ser unido, fallado, o slit. De esta manera cuando el material flat-jointed es creado, cada flat Joint contact es designado como un tipo B (unido), G (fallado) o S (slit) como lo muestra la Figura 2-21, 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 ( $g_o > 0$ ), 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:

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

$$0 \leq \phi_S \leq 1$$

Donde,

- ✓  $\phi_S$  = Fracción de contactos en estado slit.
- ✓  $\phi_B$  = Fracción de contactos unidos.
- ✓  $\phi_G$  = Fracción de contactos fallados.

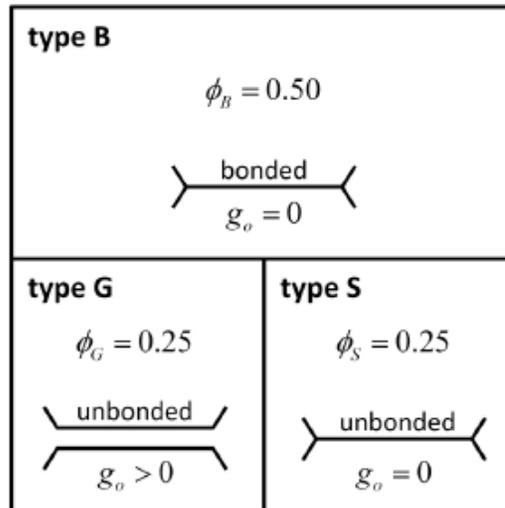


Figura 2-21: Tipos de Estados de Flat Joint Contacts (Potyondy, 2014).

### 2.4.2.2 Cinemática del Flat Joint Model

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:

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

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

Dónde,

- ✓  $X_c$  corresponde a la posición del centroide,
- ✓  $\dot{X}$  es la velocidad de traslación,
- ✓  $\Omega$  es la velocidad de rotación, y
- ✓  $\dot{X}_c^{(i)}$  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.

En la Figura 2-22 se puede observar esquemáticamente el comportamiento cinemático (traslacional y rotacional) de un Flat Joint Contact.

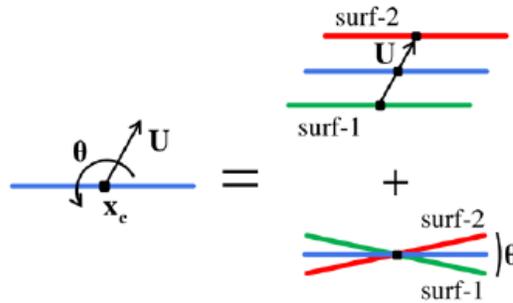


Figura 2-22: Cinemática Flat Joint Model (Potyondy, 2012).

### 2.4.2.3 Cinética (Ley fuerza-desplazamiento) del Flat Joint Model

Para el estudio de 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 interface 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 2-23.

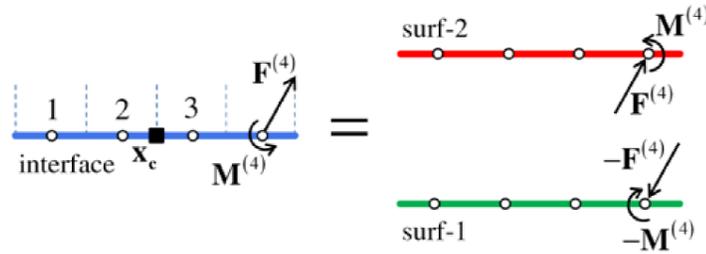


Figura 2-23: Cinética Flat Joint Model (Potyondy, 2012).

De esta manera los micro-parámetros que controlan al Flat Joint Model son los siguientes:

Tabla 2-4: Micro-Parámetros Flat Joint Model

Micro-Parámetro	Símbolo FISH	Descripción
$N_r$	$fjm\_Nr$	Número de elementos en dirección radial
$N_a$	$fjm\_Nal$	Número de elementos en dirección circunferencial
$\phi_S$	$fjm\_S\_frac$	Fracción de contactos en estado slit
$\phi_B$	$fjm\_B\_frac$	Fracción de contactos unidos
$\phi_G$	$fjm\_G\_frac$	Fracción de contactos fallados
$\bar{\sigma}_b$	$fjm\_ts$	Resistencia a la tracción del contacto [MPa]
$\bar{c}_b$	$fjm\_coh$	Cohesión del contacto [MPa]
$\bar{\phi}_b$	$fjm\_fa$	Ángulo de fricción del contacto [°]
$\mu$	$fjm\_fric$	Coefficiente de fricción del contacto
$\bar{E}_c$	$fjm\_E$	Módulo de Young del contacto [GPa]
$\bar{k}^n / \bar{k}^s$	$fjm\_krat$	Razón entre rigidez normal y de corte del contacto
$\bar{\lambda}$	$fjm\_RmultFix$	Multiplicador de radios

A modo de comparación entre los modelos presentados en esta sección, es posible ver en la Figura 2-24a la forma que adquieren los materiales generados por el Enhanced Bonded Particle Model y el Flat Joint Model, mientras que en la Figura 2-24b se observa una esfera en particular, la cual posee dos contactos en la versión EBPM contra seis contactos en la versión FJM.

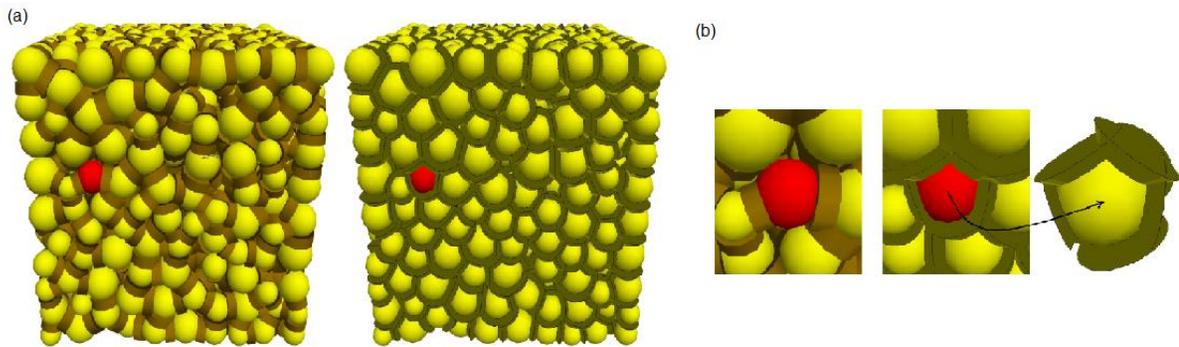


Figura 2-24: (a) Enhanced BPM Material (izquierda) y FJM Material (derecha). (b) Comparación de número de contactos en una esfera para ambos modelos. (Potyondy, 2013a).

De esto se desprende que el FJM proporciona una mayor cantidad de contactos que el Enhanced BPM. En el ejemplo mostrado en la Figura 2-24a, el material consiste en 1000 esferas, las cuales poseen en total 2527 Parallel Bonds versus 4184 Flat Joint Contacts. Esto nos indica que el FJM Material representa de mejor manera a una roca dura y compacta como lo es el Westerly Granite, al presentar una porosidad menor.

## 2.5 Ensayos de Roca Intacta en PFC<sup>3D</sup>

En PFC<sup>3D</sup> es posible simular una variedad de ensayos de roca intacta, entre los cuales están los de tracción directa e indirecta (brasileño), ensayos de compresión uniaxial y ensayos triaxiales. Para la realización de estos ensayos se debe ingresar los micro-parámetros del arreglo de partículas, como también las características del ensayo (dimensiones probeta, tasa de deformación, etc.).

Las deformaciones pueden ser provocadas de dos maneras. Una es aplicando el esfuerzo a través de placas que comprimen a la probeta (Wall Servo), o mediante un estrato de partículas (Full Strain). En la Figura 2-25a es posible observar la diferencia antes mencionada, mientras que en la Figura 2-25b se muestran los resultados obtenidos mediante estas dos maneras distintas de generar las deformaciones. Con esto se puede concluir que la respuesta es muy parecida, pero para asemejar más a un ensayo real se utilizará el método Wall Servo. Además el método Full Strain genera mejores respuestas cuando la resolución utilizada es muy alta (mayor a 20), caso contrario a este estudio en que se utiliza una resolución de 12.

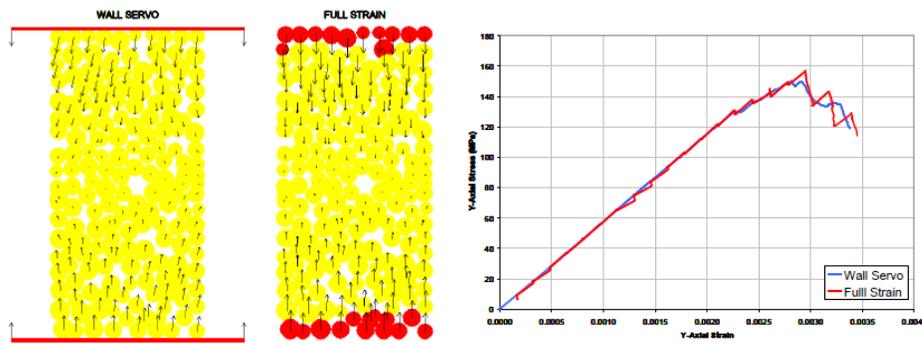


Figura 2-25: (a) Diferentes formas de aplicación de esfuerzos. (b) Curvas Esfuerzo-Deformación obtenidas con ambos métodos. (Mas Ivars, 2010).

## 2.6 Trabajos Realizados con Flat Joint Model

En la actualidad son pocos los trabajos realizados con este nuevo modelo de contacto, debido a que aún se encuentra en una etapa de evaluación. Autores como Potyondy han analizado el comportamiento del FJM mediante la calibración de este modelo de partículas para distintos tipos de roca:

- Äspö diorita (Potyondy, 2012): En este estudio se busca coincidir la respuesta macroscópica de este tipo de roca mediante una calibración de los micro-parámetros del FJM. Se realizan ensayos de tracción directa, compresión uniaxial, y triaxiales convencionales con confinamiento de 7 [MPa].
- Castlegate arenisca (Potyondy, 2013a): En este estudio se busca coincidir la respuesta macroscópica de este tipo de roca mediante una calibración de los micro-parámetros del FJM. Se realizan ensayos de tracción directa, compresión uniaxial, y triaxiales convencionales con confinamiento de 350 [psi] (2.4 [MPa]).

En ambos trabajos se concluye que las respuestas de los ensayos son similares a las de laboratorio, con esfuerzos peak bien definidos en la curva esfuerzo-deformación y haciendo coincidir las características elásticas y de resistencia de cada roca estudiada.

Cabe destacar que en estos estudios se compara el comportamiento de este nuevo modelo (FJM) con respecto al Bonded Particle Model Estándar, haciendo hincapié en la capacidad del Flat Joint Model por lograr un valor de la razón entre la resistencia a la compresión uniaxial y la resistencia a la tracción acorde al de una roca intacta compacta, lo cual era una de las mayores falencias de modelo BPM estándar al obtener valores menores a los de laboratorio (Sección 2.4.1.2).

Si bien el Flat Joint Model es capaz de superar este problema, también lo puede hacer la versión mejorada del Bonded Particle Model (Enhanced BPM). Es por esto que en este trabajo se busca analizar las respuestas de distintos ensayos de roca aplicados a un granito Westerly (Ensayos de tracción directa, compresión uniaxial y triaxial convencional) realizados con PFC<sup>3D</sup>, utilizando ambos modelos de partículas mencionados en este capítulo, Enhanced Bonded Particle Model y Flat Joint Model.

Téngase en cuenta que a diferencia de otros estudios realizados, en este trabajo se simula una serie de ensayos triaxiales a distintas presiones de confinamiento, de manera de encontrar el modelo que representa de mejor manera los parámetros de elásticos y de resistencia de la roca a medida que aumenta el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ) en los ensayos. De esta manera se obtienen las envolventes de falla y curvas esfuerzo-deformación de cada modelo, lo cual permite saber cuál de los dos es el que entrega valores de los parámetros más ajustados a los experimentales.

Así es como se conoce cuál es el modelo que representa de mejor forma a una roca compacta intacta, lo cual permite entregar el punto de partida para realizar estudios a nivel de macizo rocoso, utilizando al mejor modelo para representar a los bloques que se encuentran entre discontinuidades.

### 3 METODOLOGÍA

Para la realización de esta Memoria de Título, se siguió una metodología dividida en dos etapas. La primera etapa consiste en una recopilación de datos experimentales de las características de la roca Westerly Granite. De esta manera se cuenta con los parámetros de resistencia y de elasticidad, como también con la envolvente de falla de la roca, para así pasar a la segunda etapa que consiste en la calibración del modelo de elementos discretos llamado Flat Joint Model, con el cual se busca representar el comportamiento de esta roca.

#### 3.1 Datos Experimentales

La roca a ser estudiada en este trabajo corresponde a un granito (Westerly Granite). Para lograr la calibración del modelo es necesario recolectar una serie de datos de la roca intacta para tener un punto de comparación, y de esta forma saber cuándo el modelo está finalmente calibrado. Para esto son necesarios:

- Parámetros de Resistencia (Resistencia a la tracción y a la compresión uniaxial)
- Parámetros elásticos (Módulo de Young y Razón de Poisson)
- Curvas Esfuerzo-Deformación de ensayos triaxiales convencionales a distintos confinamientos para realizar comparación con curvas obtenidas con Flat Joint.

Arteaga (2015) en su tesis de magister obtuvo una serie de datos a partir de la literatura. Entre los datos obtenidos se encuentran valores de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  obtenidos por diversos autores (Tabla 3-1), los cuales realizaron ensayos triaxiales convencionales en compresión ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) y en extensión ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ). Con este set de datos es posible obtener parámetros de resistencia y elásticos de la roca, los cuales son útiles para tener una fuente de comparación al momento de calibrar el modelo Flat Joint.

De esta manera se utilizó el software Roclab (RockScience, 2013) para obtener la envolvente de falla de esta roca utilizando el criterio de falla de Hoek & Brown. Se obtiene tanto una envolvente en extensión como en compresión. Ambas envolventes son mostradas en la Figura 3-1.

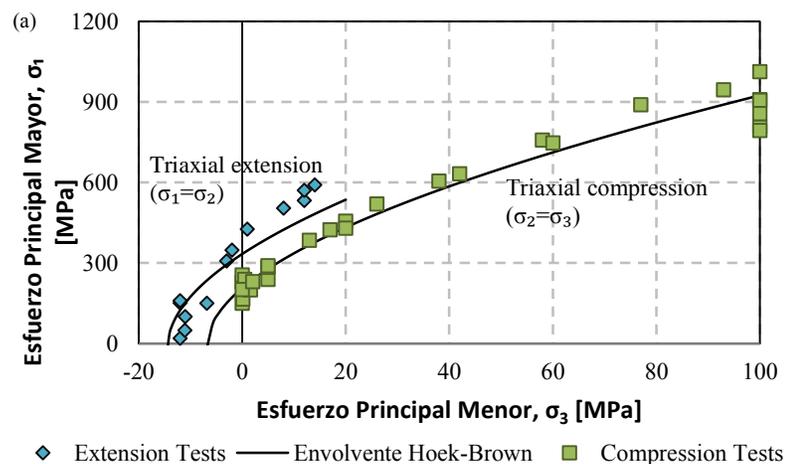


Figura 3-1: Envolvente de falla roca Westerly Granite.

**Tabla 3-1: Set de datos para obtención de envolvente de falla para roca Westerly Granite**

	Sigma 1 [MPa]	Sigma 2 [MPa]	Sigma 3 [MPa]
Brace, 1964	229.0	0.0	0.0
	945.0	93.0	93.0
	30.0	30.0	-21.0
	151.0	151.0	-12.0
	159.0	159.0	-12.0
	239.0	5.0	5.0
Heard, Abey, Bonner, & Schock, 1974	150.0	0.0	0.0
	165.4	0.1	0.1
	238.5	0.5	0.5
	456.0	20.0	20.0
	908.0	100.0	100.0
Johnson, Friedman, Hopkins, & Bauer, 1987	20.0	20.0	-12.0
	50.0	50.0	-11.1
	100.0	100.0	-11.0
	150.0	150.0	-6.8
	200.0	1.6	1.6
Haimson & Chang, 2000	201.0	0.0	0.0
	231.0	2.0	2.0
	430.0	20.0	20.0
	605.0	38.0	38.0
	747.0	60.0	60.0
	889.0	77.0	77.0
	1012.0	100.0	100.0
Mogi, 1971	256.0	0.0	0.0
	385.0	13.0	13.0
	424.0	17.0	17.0
	520.0	26.0	26.0
	632.0	42.0	42.0
	758.0	58.0	58.0

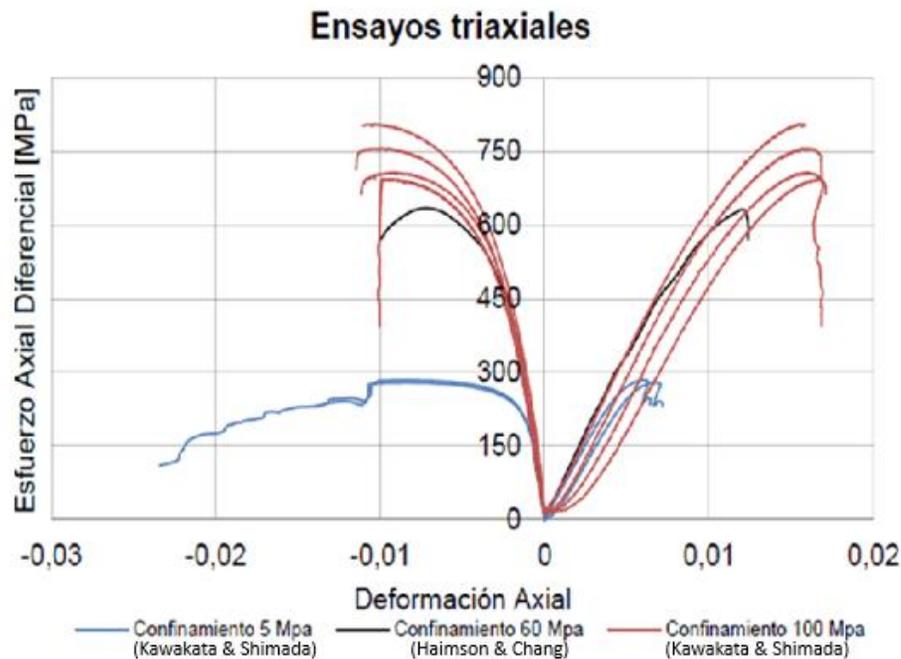
Además de entregar la envolvente de falla, Roclab nos entrega también los parámetros de resistencia de la roca tanto para el criterio Hoek & Brown, como los de Mohr Coulomb. Estos parámetros son el punto de partida para lograr la calibración del modelo. Idealmente se busca obtener estos mismos valores (o con un error relativo bastante bajo) de los macro-parámetros, para lograr una buena representación

**Tabla 3-2: Parámetros de Resistencia para envoltentes de falla Hoek & Brown y Mohr Coulomb**

	Parámetro	Valor
Hoek & Brown	$m_i$	30.8
	UCS [MPa]	206.9
	Resistencia a la Tracción [MPa]	14.4
Mohr Coulomb	Cohesión [MPa]	49.8
	Ángulo de Fricción [°]	47.2

Para la obtención de los parámetros elásticos ( $E$  y  $\nu$ ), Kawakata & Shimada (2000) estudiaron la roca Westerly Granite, realizando ensayos de laboratorio de compresión Uniaxial, estimando de esta manera los valores de estos parámetros. El módulo de Young posee un valor de 60.3 [GPa], mientras que la razón de Poisson es igual a 0.35.

Finalmente se cuenta con tres curvas esfuerzo-deformación provenientes de ensayos triaxiales convencionales (Figura 3-2). Kawakata & Shimada (2000) realizaron ensayos triaxiales a confinamientos de 5 [MPa] y 100 [MPa], mientras que Haimson & Chang (2000) obtuvieron una curva con 60 [MPa] de confinamiento.



**Figura 3-2: Curvas Esfuerzo-Deformación a distintos confinamientos.**

### 3.2 Resultados Enhanced Bonded Particle Model

Arteaga (2015) en su tesis de magister (Modelamiento Numérico del Comportamiento Triaxial Verdadero de Roca Intacta Mediante Elementos Discretos y sus Implicancias en el Diseño Minero) simula el comportamiento de la roca Westerly Granite utilizando el Enhanced BPM. Para poder realizar una comparación exhaustiva entre ambos modelos, se obtuvieron los siguientes datos:

- Curvas esfuerzo-deformación a distintos confinamientos
- Parámetros de resistencia obtenidos con el modelo ( $\sigma_{ucs}$  y  $\sigma_t$ )
- Umbrales de daño para distintos confinamientos ( $\sigma_{ci}$  y  $\sigma_{cd}$ )
- Parámetros elásticos ( $E$  y  $\nu$ )
- Módulo post-peak ( $E_{post-peak}$ )
- Ángulos de dilatación
- Ángulos de fractura

### 3.3 Análisis de Sensibilidad Micro-Parámetros Flat Joint Model

En esta parte de la metodología se busca observar el efecto que posee cada uno de los micro-parámetros en la respuesta del modelo. De esta manera se puede definir una metodología de calibración de los parámetros para generar una réplica de los datos experimentales. Cabe destacar que se toma como punto de partida la metodología de calibración del Enhanced BPM, y según el análisis de sensibilidad de los parámetros del Flat Joint Model, esta se modifica.

Lo primordial en esta etapa fue estudiar que micro-parámetros afectaban de mayor manera los macro-parámetros de la roca. Lo primero es utilizar valores de micro-parámetros para este análisis de tal manera que los parámetros de resistencia y elásticos obtenidos con las simulaciones se encuentren dentro de un rango cercano a lo que se quiere llegar, pudiendo así estar seguros del efecto de los parámetros en la respuesta macroscópica.

### 3.4 Definición metodología de calibración de Micro-Parámetros

Para esta última etapa, se tomó en cuenta el análisis de sensibilidad para encontrar la metodología ideal para lograr la calibración del modelo. El criterio utilizado fue observar cómo es el comportamiento de los macro-parámetros al ir variando los micro-parámetros. Es así como se van fijando los parámetros que afectaban en gran medida la respuesta del modelo, terminando por calibrar los parámetros que afectan respuestas específicas. De esta forma se obtiene la metodología para la calibración del modelo mostrada en la Figura 3-3.

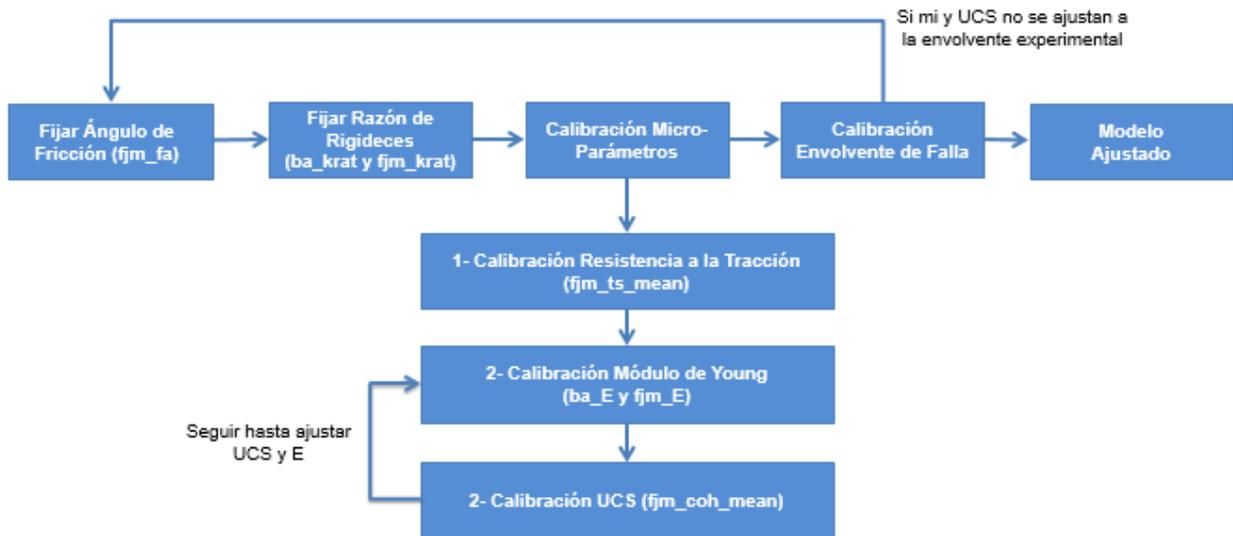


Figura 3-3: Metodología de calibración Flat Joint Model.

Cabe destacar que en esta metodología, a diferencia de la utilizada para el modelo Enhanced Bonded Particle Model, se hace un esfuerzo por calibrar la razón de Poisson, variando la razón entre las rigideces de los contactos, parámetro que se encarga de cambiar esta característica.

Con esta metodología fue posible la realización de este trabajo, comparando a dos modelos de elementos discretos entre sí, tratando de replicar los datos experimentales para su validación. Esta metodología se puede ver resumida en el siguiente esquema:

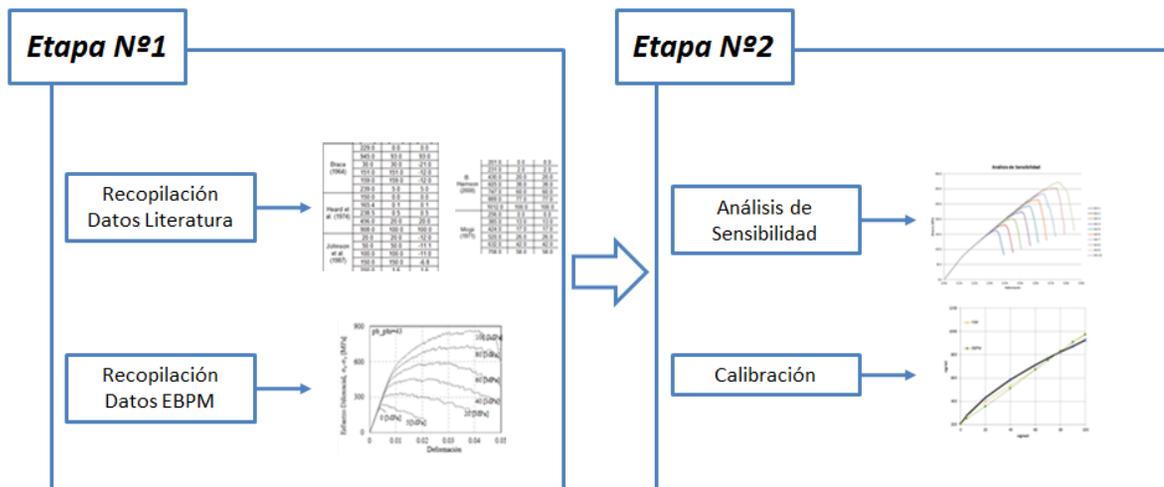


Figura 3-4: Resumen Metodología.

## 4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos con el modelo Flat Joint Model luego de aplicada la metodología explicada en el Capítulo 3 de este trabajo. Además se muestra el resultado del análisis de sensibilidad de los micro-parámetros de este nuevo modelo, como también la comparación con el Enhanced BPM y los datos experimentales.

### 4.1 Análisis de Sensibilidad

Como se explicó en el capítulo anterior, luego de recolectados todos los datos experimentales y resultados del modelo Enhanced Bonded Particle Model, se debe comenzar con un análisis de sensibilidad de los micro-parámetros del Flat Joint Model, de manera de estimar su efecto en los macro-parámetros de cada ensayo de roca. Como es posible observar en la Tabla 2-4, este modelo de partículas posee en total 12 parámetros a modificar. A continuación se explicará el efecto de los parámetros que generan cambios más significativos.

#### 4.1.1 Ensayos de Tracción Directa

En esta sección el objetivo principal es encontrar los micro-parámetros que afectan en mayor medida a la resistencia a la tracción de la roca.

A continuación se nombran dichos micro-parámetros, explicando cómo cambia  $\sigma_t$  al aumentar el valor de estas variables.

- **Efecto Resistencia a la tracción de los Contactos**

Como es de esperar el parámetro que modifica de gran manera a la resistencia a la tracción de la roca es la resistencia a la tracción del contacto entre partículas ( $fjm\_ts$ ), haciéndolo de manera lineal cómo es posible observar en la Figura 4-1.

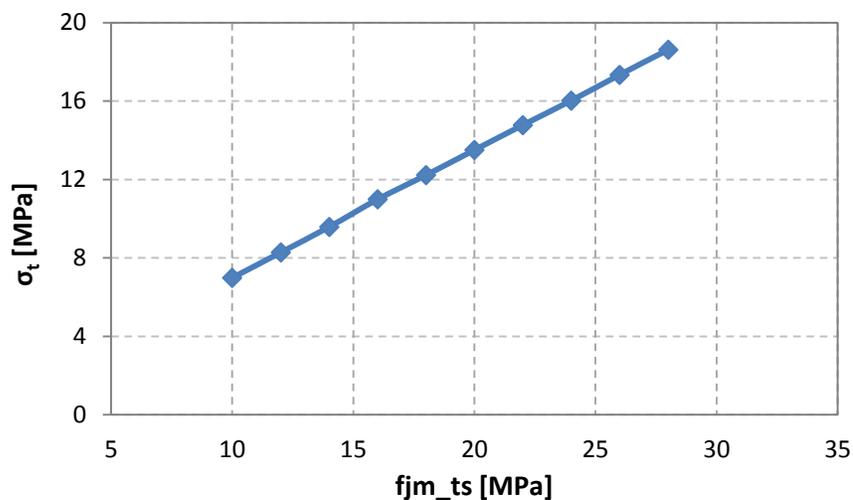


Figura 4-1: Efecto  $fjm\_ts$  en resistencia a la tracción de la roca.

- **Efecto Razón de Rigideces de los contactos**

Este parámetro disminuye la resistencia a la tracción de la roca pero no linealmente como el micro-parámetro  $fjm\_ts$ , sino que de forma exponencial (Figura 4-2), siendo también un parámetro crítico para la calibración de este macro-parámetro.

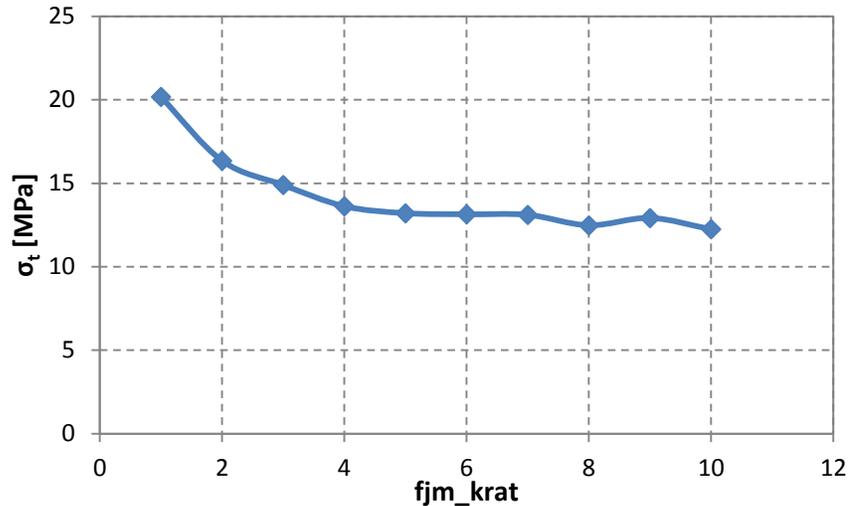


Figura 4-2: Efecto  $fjm\_krat$  en resistencia a la tracción de la roca.

#### 4.1.2 Ensayos de Compresión Uniaxial

Para los análisis de sensibilidad en ensayos de compresión uniaxial, se debe tener un criterio más riguroso para ver cuáles son los factores que inciden mayormente en la respuesta del modelo, ya que en este tipo de ensayo existen una serie de macro-parámetros a ser estudiados ( $\sigma_{ucs}$ ,  $E$ ,  $\nu$ ) por lo que es necesario estudiar cómo se ven afectados.

- **Efecto Número de Elementos en el Contacto**

Para este análisis se varió el número de elementos tanto en la dirección radial ( $N_r$ ) como circunferencial ( $N_{al}$ ). A la conclusión que se llegó en este análisis fue que al variar estos parámetros, no se generan grandes cambios en los parámetros elásticos, ni en la resistencia de la roca, pero se tiene una gran incidencia en los tiempos de simulación (Tabla 4-1), ya que al poseer una mayor cantidad de elementos por contacto, habrá que realizar un cálculo por cada uno de estos, ocupando así mayores recursos computacionales.

Tabla 4-1: Efecto N° de elementos en Flat Joint Contact en tiempo de simulación y macro-parámetros

<i>fjm_Nr</i>	<i>Fjm_Nal</i>	<i>T. de Sim. [min]</i>	<i>UCS [MPa]</i>	<i>E [GPa]</i>	<i>v</i>
1	6	251	220.7	56.7	0.31
2	6	292	216.0	56.9	0.31
3	6	320	212.5	56.9	0.31
4	6	371	208.0	57.0	0.30
5	6	425	210.8	56.8	0.31

Es por esto que se ocupó la cantidad mínima de elementos para la realización de las simulaciones, lo cual corresponde a uno en dirección radial ( $N_r = 1$ ), y tres en la dirección circunferencial ( $N_{al} = 3$ ). En la Figura 4-3 se puede ver esquemáticamente la forma que adquiere el Flat Joint Contact al tomar estos valores dichos micro-parámetros.

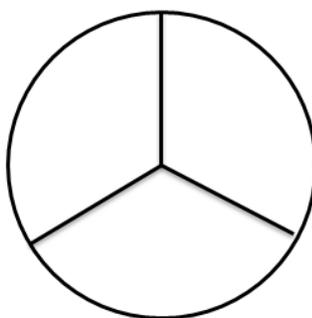


Figura 4-3: Esquema Flat Joint Contact utilizado en simulaciones.

- **Efecto Razón de Rigideces de los contactos**

Sin duda alguna este parámetro es el que afecta en mayor medida los resultados obtenidos por el ensayo uniaxial, provocando cambios tanto en los parámetros elásticos como en la resistencia (Figura 4-4a), lo cual tiene mucho sentido ya que las ecuaciones que definen el modelo son función de este parámetro. La rigidez de los contactos es la única variable capaz de modificar la razón de Poisson (Figura 4-4b), es por esto que se le da énfasis a su análisis, debido a que una de las falencias del modelo anterior es que no reproduce de buena manera dicho parámetro elástico.

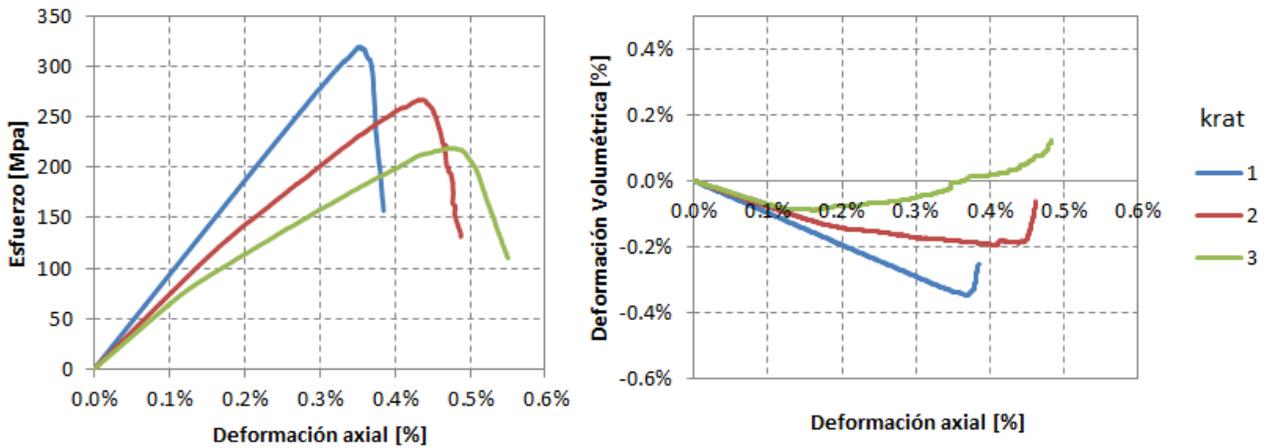


Figura 4-4: (a) Efecto rigidez en curvas esfuerzo-deformación (b) Efecto rigidez en curva deformación volumétrica.

- **Efecto cohesión de los contactos**

La cohesión de los contactos ( $f_{jm\_coh}$ ) es el micro-parámetro que permite modificar la resistencia a la compresión uniaxial de la roca. Esto hace sentido debido a que el criterio de falla de Mohr-Coulomb, al dejarlo en función de los esfuerzos principales, es la resistencia a la compresión uniaxial la que depende de la cohesión. En la Figura 4-5 es posible observar el efecto de este parámetro en la resistencia de la roca.

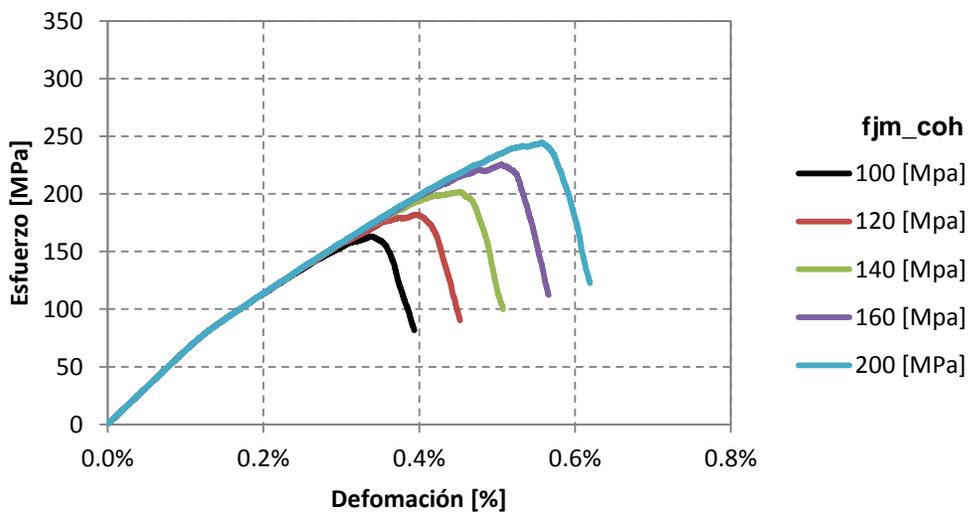


Figura 4-5: Efecto del parámetro  $f_{jm\_coh}$  en curvas esfuerzo-deformación.

Si bien el efecto más notorio de este micro-parámetro es afectar la resistencia de la roca, también provoca ciertas variaciones en los parámetros elásticos (Tabla 4-2). Al aumentar este parámetro, el módulo de Young disminuye, mientras que la razón de Poisson aumenta.

Tabla 4-2: Efecto *fjm\_coh* en macro-parámetros

<i>fjm_coh</i> [MPa]	UCS [MPa]	E [GPa]	$\nu$
100	163.2	62.6	0.17
120	182.0	60.5	0.21
140	201.6	58.6	0.25
160	225.4	57.0	0.31
180	244.6	55.7	0.33

- **Efecto módulo de Young de los contactos**

El módulo de elasticidad de los contactos, como era de intuir, es el encargado de modificar el módulo de Young de la roca. Cabe destacar que este análisis de sensibilidad se realizó con el parámetro *ba\_E* (módulo de Young de la partículas) fijo, ya que este no afecta los parámetros de resistencia ni elásticos de la roca, solo la fragilidad de la roca. En la Figura 4-6 es posible observar el efecto que tiene este micro-parámetros en las curvas esfuerzo-deformación.

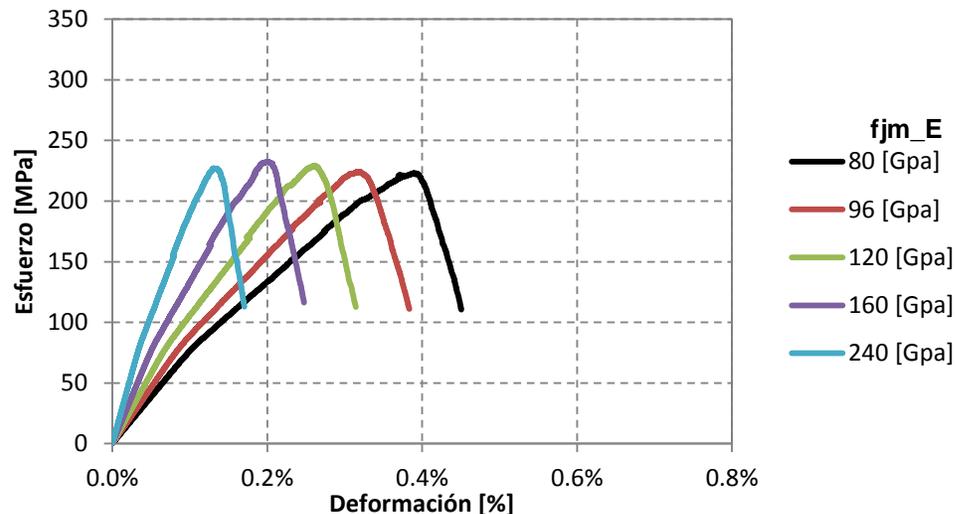


Figura 4-6: Efecto del parámetro *fjm\_E* en curvas esfuerzo-deformación.

Al igual que el parámetro de cohesión de los contactos ( $f_{jm\_coh}$ ), el módulo de elasticidad de los contactos tiene un leve efecto en los demás macro-parámetros como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 4-3: Efecto  $f_{jm\_E}$  en macro-parámetros

$f_{jm\_E}$ [GPa]	UCS [MPa]	$E$ [GPa]	$\nu$
80	223.2	69.4	0.32
96	224.1	83.0	0.32
120	229.3	103.3	0.33
160	232.5	136.7	0.33
240	227.1	205.3	0.32

Como es posible observar en la Tabla 4-3, el efecto de este parámetro en la resistencia a la compresión uniaxial no es claro ya que el valor de este varía de manera aleatoria, mientras que el efecto en la razón de Poisson es prácticamente nulo.

#### 4.2 Generación de Metodología de Calibración

Ya con el análisis de sensibilidad hecho, es posible implementar una metodología de calibración de los micro-parámetros de manera de poder replicar la respuesta de laboratorio:

- Al observar que la rigidez de los contactos afecta tanto a la resistencia a la tracción de la roca como a la resistencia a la compresión uniaxial y los parámetros elásticos, se fija su valor de manera de obtener los resultados buscados de la razón de Poisson.
- Luego de esto se fija la resistencia a la tracción de los contactos, ya que solo afecta a la respuesta del ensayo de tracción directa.
- Lo siguiente es fijar el valor del módulo de elasticidad de los contactos, debido a que su efecto en la resistencia a la compresión uniaxial no es claro, de manera que al fijar su valor, luego se modifique la cohesión de los contactos para lograr la calibración del UCS.
- Finalmente al tener calibradas las respuestas de los ensayo de tracción directa y de compresión uniaxial, se comienza con los ensayos triaxiales para obtener la envolvente de falla.
- Cada uno de estos pasos es repetido para una serie de valores del ángulo de fricción hasta obtener la envolvente que mejor represente a la experimental.

### 4.3 Calibración Micro-Parámetros

A continuación se muestran los pasos seguidos para lograr obtener una buena respuesta de los macro-parámetros de la roca, indicando cuales fueron los micro-parámetros a modificar. Cabe destacar que este trabajo al ser una comparación de la respuesta entre dos modelos de elementos discretos, se utilizaron ciertos parámetros y características de las partículas iguales a las utilizadas para la calibración del Enhanced BPM como lo son el multiplicador de radios ( $\lambda$ ), la densidad del material ( $\rho$ ), 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 ( $ba\_E/fjm\_E$ ) y la tasa de deformación ( $\dot{\epsilon}_p$ ). Además se asumieron valores de ciertos micro-parámetros los cuales son explicados a continuación:

- **Fracción de Contactos Unidos, Fallados y en estado Slit ( $\phi_B$ ,  $\phi_G$  y  $\phi_S$ )**

Estos parámetros indican la fracción de elementos unidos y fallados en el Flat Joint Contact. Como la roca a ser evaluada es compacta, se asume que todos los contactos comienzan el ensayo completamente unidos, ya que de otra manera se representarían “micro-fallas” que podrían cambiar el resultado de la simulación. Por simplicidad y como primer intento los valores que se asumieron para  $\phi_B$  y  $\phi_G$  son 1 y 0 respectivamente (es decir,  $\phi_S=0$ ).

- **Multiplicador de Radios ( $\lambda$ )**

Este parámetro es aquel que le da cierto largo al contacto entre las partículas como lo muestra la siguiente ecuación.

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

El valor utilizado para este parámetro es igual a uno, por lo que el radio del contacto equivaldrá a radio de la partícula más pequeña que comparte el Flat Joint Contact.

- **Densidad del Material ( $\rho$ )**

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 un granito típico igual a 3100 [gr/cm<sup>3</sup>].

- **Razón de Diámetro Máximo y Mínimo de Partículas ( $R_{max}/R_{min}$ )**

Según estudios realizados por diversos autores (Mas Ivars, 2010; D. Potyondy & Cundall, 2004) el valor de este parámetro es igual a 1.66, de manera de aportar en una representación frágil de la roca.

- **Razón de Módulo de deformación de partículas y de contactos ( $ba\_E/fjm\_E$ )**

Mediante recomendación de estudios hechos anteriormente con modelos de elementos discretos (Vallejos, Brzovic, Lopez, Bouzeran, & Ivars, 2013) 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. Para poder validar esta recomendación, se realizó un análisis de sensibilidad de dichas razones. En la Figura 4-7 es posible observar el efecto de la variación de la razón entre módulos de deformación.

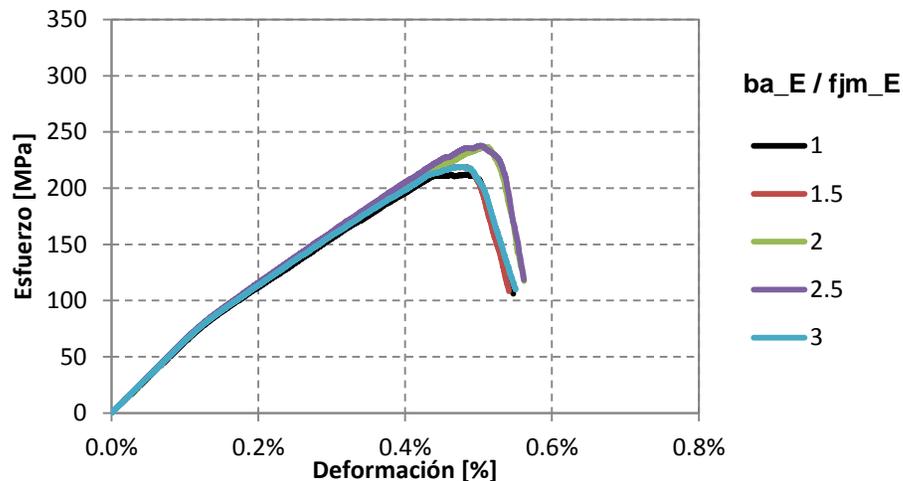


Figura 4-7: Efecto razón módulos de deformación en curvas esfuerzo-deformación.

Como es posible observar en la figura anterior, no existe un efecto notorio en la fragilidad de la curva esfuerzo-deformación al variar la razón entre los módulos de deformación. Si bien para valores de la razón igual a 2.0 o 2.5 la curva presenta una “mayor fragilidad”, la diferencia no es tan significativa. Es por esto que se decidió mantener la razón 1,5 recomendada por estudios anteriores.

- **Coefficiente de Fricción ( $\mu$ )**

Al igual que los parámetros anteriores, este por recomendación (ITASCA) posee un valor determinado. El valor de este parámetro va a cambiar dependiendo de la forma en que se generen las deformaciones en los ensayos (Sección 2.5). 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.

Para el Flat Joint Model hay que realizar un análisis aparte, debido a que en este modelo además de tener el parámetro “Coeficiente de fricción de las partículas”, también está el “Coeficiente de fricción de los contactos”. En la Figura 4-8 es posible ver el efecto que posee la fricción de los contactos. Se puede observar que no hay un efecto claro con respecto a la fragilidad de las curvas, por lo que se opta por darle un valor de 0.5 al igual que la fricción de las partículas.

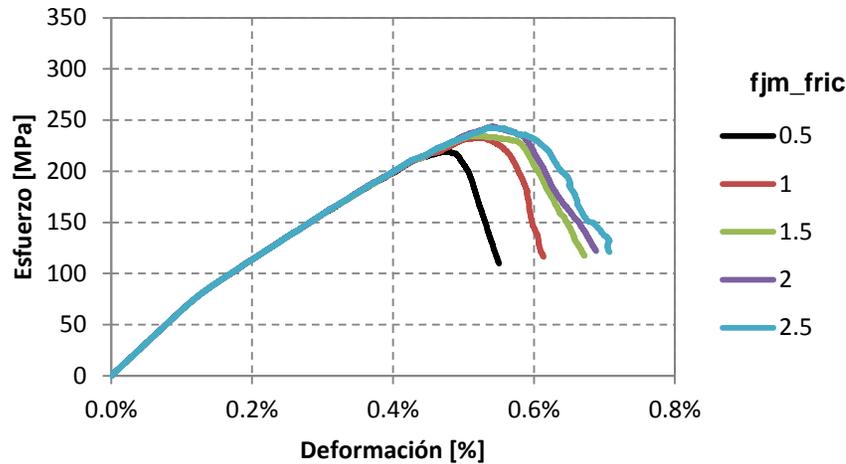


Figura 4-8: Efecto coeficiente de fricción del contacto en curvas esfuerzo-deformación.

- **Tasa de Deformación ( $\dot{\epsilon}_p$ )**

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

Es así como en estudios hechos con Enhanced BPM (Arteaga, 2015; Suzuki Morales, 2013), para una probeta de longitud inicial de 100 milímetros, se decidió trabajar con un valor de este parámetro de 0.5 debido a que disminuye los tiempos de simulación, y entrega resultados coherentes con respecto a los experimentales, es por esto que se decidió trabajar con el mismo valor en el Flat Joint Model.

- **Resolución**

La resolución corresponde al número de esferas que contiene el diámetro de la probeta sintética. Como es de esperar, al aumentar la resolución de la muestra aumenta el número de partículas en las probetas, representando de mejor manera microestructuralmente a la roca, pero aumentando los tiempos de simulación. Es por esto que se debe buscar un balance entre respuestas coherentes y tiempos de simulación. Este análisis se realizó también con el Enhanced BPM, y se concluyó que la mejor elección era de una resolución de 12 partículas dentro del diámetro. En la Figura 4-9 se muestra la resolución utilizada para los ensayos.

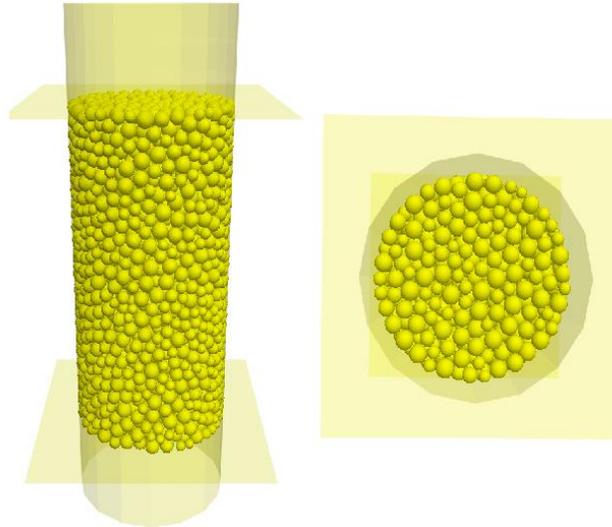


Figura 4-9: Resolución utilizada para ensayos de roca.

Como a modo de resumen, en la siguiente tabla se muestran los parámetros utilizados a priori para la calibración del modelo:

Tabla 4-4: Valores micro-parámetros previa calibración

Parámetro	Valor
N° de elementos dirección radial [ $N_r$ ]	1
N° de elementos dirección circunferencial [ $N_{nat}$ ]	3
Fracción de contactos unidos [ $\phi_B$ ]	1
Fracción de contactos fallados [ $\phi_G$ ]	0
Fracción de contactos en estado slit [ $\phi_S$ ]	0
Multiplicador de Radios [ $\lambda$ ]	1
Densidad [ $gr/cm^3$ ]	3100
Razón entre diámetro máximo y mínimo [ $D_{max}/D_{min}$ ]	1.66
Razón módulos de deformación [ $ba_E/fjm_E$ ]	1.5
Coefficiente de fricción [ $\mu$ ]	0.5
Tasa de deformación [ $\dot{\epsilon}_p$ ]	0.5
Resolución	12

### 4.3.1 Calibración Razón de Poisson

Como se dijo en la sección 4.1.2, el micro-parámetro razón de rigidez, es el único capaz de calibrar la razón de Poisson. Cabe destacar que en la calibración del modelo Enhanced BPM no se modificó este parámetro debido a que afectaba la respuesta frágil de la curva esfuerzo-deformación, pero como se observa en la Figura 4-4a, no existe una notoria modificación en la pendiente de la parte post-peak de las curvas para el caso del Flat Joint Model. Es por esta razón que se privilegió el cambio de este parámetro para obtener una mejor respuesta en la razón de Poisson.

En la Tabla 4-5 y en la Figura 4-10 es posible ver los resultados de las simulaciones, y el efecto en la razón de Poisson.

Tabla 4-5: Resultados simulaciones calibración razón de Poisson

<i>krat</i>	UCS [MPa]	E [GPa]	<i>v</i>
3.1	211.2	57.8	0.28
3.2	187.0	59.4	0.21
3.3	203.6	57.1	0.34
3.4	201.8	55.7	0.32
3.5	210.4	55.6	0.38

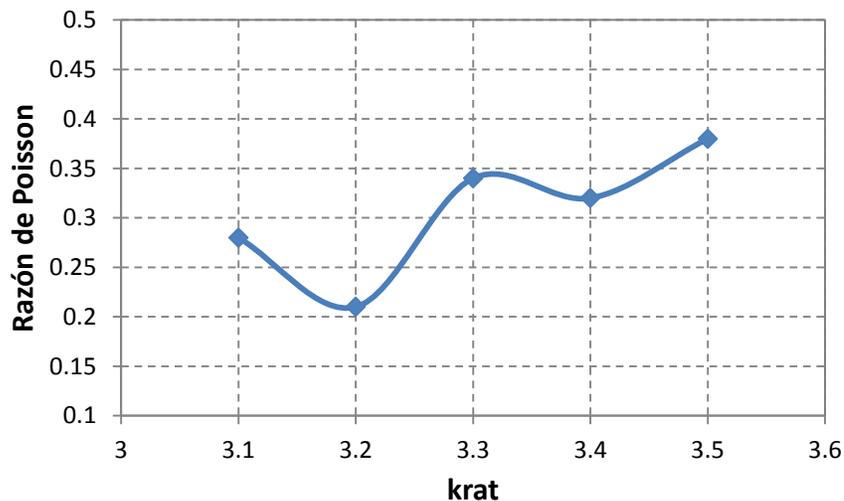


Figura 4-10: Estimación de krat para calibración razón de Poisson.

Para decidir cuál valor escoger para seguir con la calibración, fue necesario observar el efecto en la resistencia a la compresión uniaxial y en el módulo de Young. Esto porque se observa que es necesario aumentar el valor del módulo de elasticidad, lo cual tiende a un aumento del  $\sigma_{UCS}$ , el cual a su vez posee una relación inversa con la razón de Poisson, por lo que se escoge una rigidez igual a 3.5, ya que al avanzar con la calibración, el valor de  $v$  debiese disminuir, por lo que debiese tomar un valor más cercano al experimental que corresponde a 0.35.

### 4.3.2 Calibración Resistencia a la tracción

Como se demostró en el análisis de sensibilidad, el micro-parámetro a modificar para lograr la calibración de este macro-parámetro es la resistencia a la tracción de los contactos. Con la razón de rigidez fijada en 3.5, se comenzó el análisis con ensayos de tracción directa. Para esto se analizó la respuesta del ensayo para valores del micro-parámetro entre 18 [MPa] y 23 [MPa], observando que el resultado esperado se obtiene con un valor del parámetro  $fjm\_ts$  entre 20 [MPa] y 22 [MPa] (Figura 4-11). En la Tabla 4-6 se puede ver el resultado de la calibración de la resistencia a la tracción.

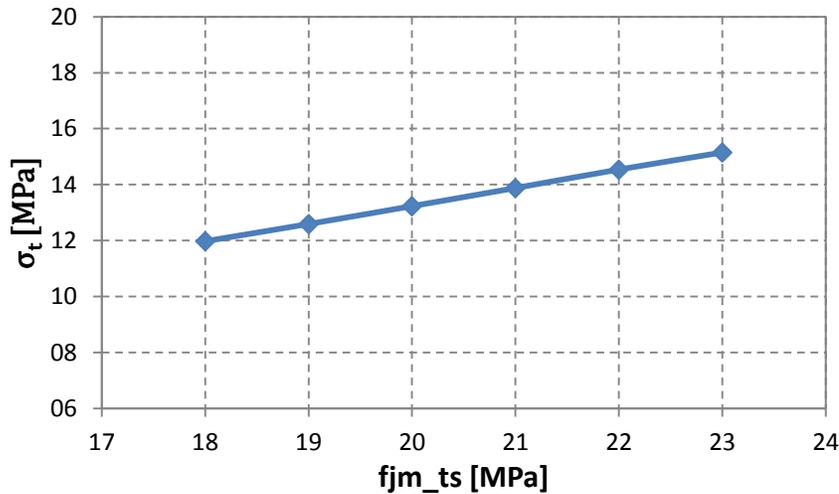


Figura 4-11: Estimación de  $fjm\_ts$  para calibración de resistencia a la tracción.

Tabla 4-6: Resultados simulaciones calibración resistencia a la tracción

$fjm\_ts$ [MPa]	$fjm\_ts\_sdesv$	$\sigma_t$ [MPa]
21.1	4.2	13.9
21.2	4.2	14.0
21.3	4.3	14.1
21.4	4.3	14.1
21.5	4.3	14.3
21.6	4.3	14.2
21.7	4.3	14.5
<b>21.8</b>	<b>4.4</b>	<b>14.4</b>
21.9	4.4	14.5
22.0	4.4	14.5

De esta manera se logra obtener el valor experimental de la resistencia a la tracción de la roca (14.4 [MPa]) con un valor del parámetro  $fjm\_ts$  igual a 21.8 [MPa].

### 4.3.3 Calibración Módulo de Young

Para la calibración del módulo de Young es necesario modificar el módulo de elasticidad de los Flat Joint Contact, pero manteniendo la razón entre el módulo de Young de las partículas y el de los contactos ( $ba\_E/fjm\_E$ ) constante como se indica en la Tabla 4-4. Para este análisis se varió el parámetro  $fjm\_E$  con valores entre 70 [GPa] y 80 [GPa] como lo muestra la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Resultados simulaciones calibración módulo de Young

<b><math>ba\_E</math> [GPa]</b>	<b><math>fjm\_E</math> [GPa]</b>	<b>UCS [MPa]</b>	<b><math>E</math> [GPa]</b>
105.0	70.0	218.3	55.7
106.5	71.0	210.2	54.7
108.0	72.0	204.8	55.5
109.5	73.0	213.1	56.3
111.0	74.0	211.8	56.4
112.5	75.0	211.9	56.3
114.0	76.0	213.3	58.4
115.5	77.0	214.4	58.4
<b>117.0</b>	<b>78.0</b>	<b>212.8</b>	<b>59.8</b>
118.5	79.0	211.7	59.7

Cabe destacar que el valor experimental del módulo de elasticidad que se quiere obtener es de 60.3 [GPa], pero hay que tomar en cuenta que al modificar la cohesión de los contactos se genera una variación en el módulo de Young. Es por esto que se escoge un valor de 78 [GPa] para el micro-parámetro  $fjm\_E$  (y por ende 117 [GPa] para  $ba\_E$ ), debido a que entrega un valor de 212.8 [MPa] y 59.8 [GPa] para el  $\sigma_{ucs}$  y  $E$  respectivamente, y por ende en el siguiente paso de calibración al tener que disminuir la cohesión de los contactos aumentará el valor del módulo de elasticidad entregado por el modelo, obteniendo un valor más cercano al experimental.

### 4.3.4 Calibración UCS

Para concluir con la calibración de los macro-parámetros de los ensayos de compresión uniaxial, se calibra la resistencia de la roca variando la cohesión de los contactos ( $fjm\_coh$ ). Como en la calibración del módulo de Young se observó una resistencia a la compresión uniaxial de 212.8 [MPa], utilizando un valor de  $fjm\_coh$  de 150 [MPa], entonces se evalúa este parámetro entre 140 [MPa] y 150 [MPa], debido a que se busca disminuir la resistencia a la compresión uniaxial (206.9 [MPa] equivale al valor experimental). En la Tabla 4-8 se adjuntan los valores de los macro-parámetros obtenidos de las simulaciones, mientras que en la Figura 4-12 es posible observar el efecto de la variación del parámetro en los resultados de la resistencia de la roca.

Tabla 4-8: Resultados simulaciones calibración UCS

<i>fjm_coh</i> [MPa]	<i>fjm_coh_s</i> desv	UCS [MPa]	E [GPa]	$\nu$
141	28.2	202.3	61.4	0.32
142	28.4	205.8	60.7	0.34
143	28.6	203.7	60.6	0.34
144	28.8	206.0	60.6	0.34
145	29.0	204.9	62.0	0.30
146	29.2	208.7	60.3	0.35
<b>147</b>	<b>29.4</b>	<b>206.6</b>	<b>60.3</b>	<b>0.34</b>
148	29.6	210.3	54.0	0.34
149	29.8	212.5	52.9	0.36

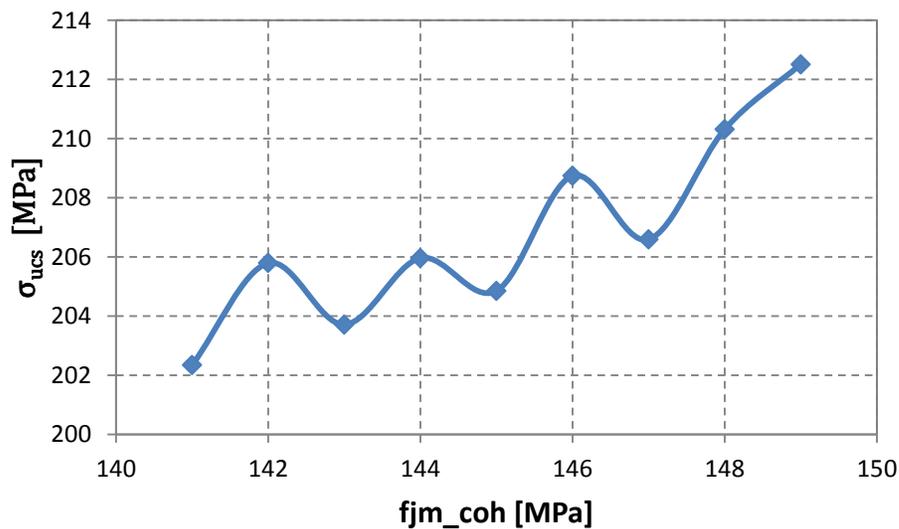


Figura 4-12: Estimación de *fjm\_coh* para calibración UCS.

Como indica la Tabla 4-8, dentro de todas las simulaciones, el valor de *fjm\_coh* que genera los mejores resultados de los parámetros elásticos y de resistencia es de 147[MPa]. Si bien los valores variaron de manera aleatoria al evaluar un rango tan pequeño (Figura 4-12), se tiene una tendencia a aumentar la resistencia, y así se obtienen valores muy cercanos a los esperados.

De esta manera a modo de resumen, los valores de los micro-parámetros utilizados para la calibración del Flat Joint Model son los siguientes:

**Tabla 4-9: Micro-Parámetros calibrados del modelo FJM**

<b>Micro-Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Número de elementos en dirección radial ( $N_r$ )	1
Número de elementos en dirección circunferencial ( $N_{Nat}$ )	3
Fracción de contactos unidos ( $\phi_B$ )	1
Fracción de contactos fallados ( $\phi_G$ )	0
Fracción de contactos en estado slit ( $\phi_S$ )	0
Resistencia a la tracción del contacto ( $\bar{\sigma}_b$ ) [MPa]	21.8
Cohesión del contacto ( $\bar{c}_b$ ) [MPa]	147
Coefficiente de fricción del contacto ( $\mu$ )	0.5
Módulo de Young del contacto ( $\bar{E}_c$ ) [GPa]	78
Razón entre rigidez normal y de corte del contacto ( $\bar{k}^n / \bar{k}^s$ )	3.5
Multiplicador de radios ( $\bar{\lambda}$ )	1

En la Tabla 4-10 se puede ver la comparación de resultados obtenidos por el Flat Joint Model y el Enhanced BPM (Arteaga, 2015) versus los datos experimentales.

**Tabla 4-10: Comparación macro-parámetros obtenidos por ambos modelos**

<b>Macro-Parámetro</b>	<b>FJM</b>	<b>EBPM</b>	<b>Laboratorio</b>
$\sigma_{ucs}$ [MPa]	206.6	207.6	206.9
$E$ [GPa]	60.3	60.4	60.3
$\nu$	0.34	0.05	0.35
$\sigma_t$ [MPa]	14.4	14.3	14.4

Si bien los resultados del modelo EBPM son bastante cercanos a los experimentales (a excepción de la razón de Poisson), el FJM es más preciso. Además soluciona el problema de calibración de la razón de Poisson donde se pasa de una diferencia de un 85.7% dada por el EBPM a una diferencia del 2.9% entregado por el FJM. Junto con esto la curva esfuerzo-deformación del ensayo uniaxial representa de mejor manera un material frágil (Figura 4-13) como lo es la roca Westerly Granite, al caer con una pendiente más pronunciada la zona post-peak de la curva.

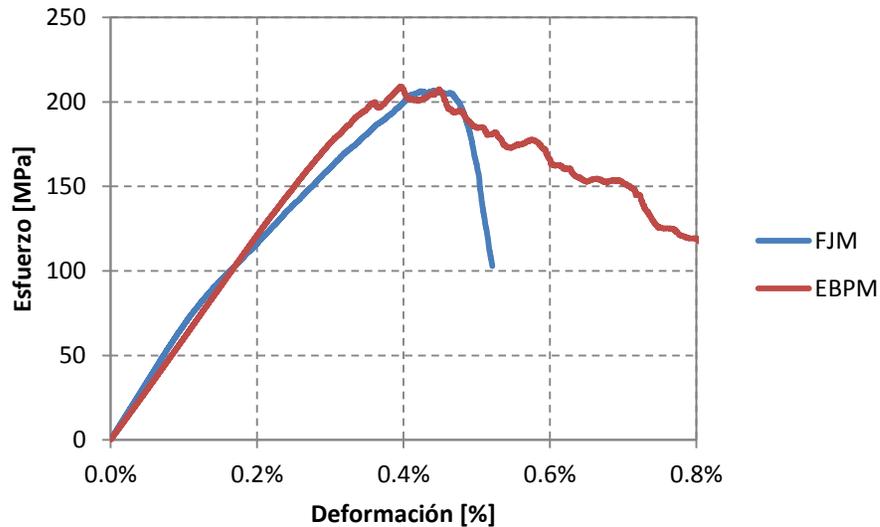


Figura 4-13: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas por ambos modelos en ensayos Uniaxiales.

## 4.4 Ensayos Triaxiales Convencionales

### 4.4.1 Calibración Envolvente de Falla

Como se observa en la Figura 3-3, la calibración del modelo termina cuando el  $m_i$  y el  $UCS$  se ajustan de la mejor manera posible, dada la envolvente entregada por el modelo. Para evaluar si el modelo está completamente calibrado, se utilizó la diferencia absoluta media (MAD), la cual nos dice que tan distintos son en promedio los valores de los pares  $\sigma_1 - \sigma_3$  entregados por el modelo Flat Joint Model con respecto a los valores experimentales.

La calibración del modelo comienza asignando el valor del micro-parámetro “ángulo de fricción”. Para esto se asignaron valores de este parámetro desde cero a cincuenta, espaciados de diez en diez. De esta manera se obtienen las siguientes diferencias absolutas entre envolventes para distintos ángulos de fricción:

Tabla 4-11: Diferencias absolutas entre envolventes experimentales y FJM

$fjm\_fa$ [°]	$m_i$	UCS [MPa]	MAD [MPa]
0	34.4	172.1	46.5
10	31.3	183.8	41.3
20	32.1	186.7	32.5
25	34.9	186.2	27.6
30	39.4	183.5	34.7
40	50.0	166.6	104.4
50	50.0	176.1	243.1

Como se observa en la Tabla 4-11, la menor diferencia debiese estar entre un ángulo de fricción de 20° y 30°. Es por esto que para lograr una mayor precisión en la calibración, se simuló el modelo con valores del parámetro  $fjm\_fa$  entre estos ángulos, obteniendo la calibración para un valor del micro-parámetro de 25°. Si bien el UCS entregado por el software Roclab es algo lejano al valor real de la roca (206.9 [MPa]), se tiene que la resistencia a la compresión uniaxial entregada por un ensayo UCS utilizando el modelo FJM obtiene valores cercanos a los 207 [MPa].

En la Figura 4-14 es posible ver las envolventes de falla entregadas por el modelo para cada uno de los casos mostrados en la Tabla 4-11. Además se pueden comparar con la envolvente experimental (curva en negro).

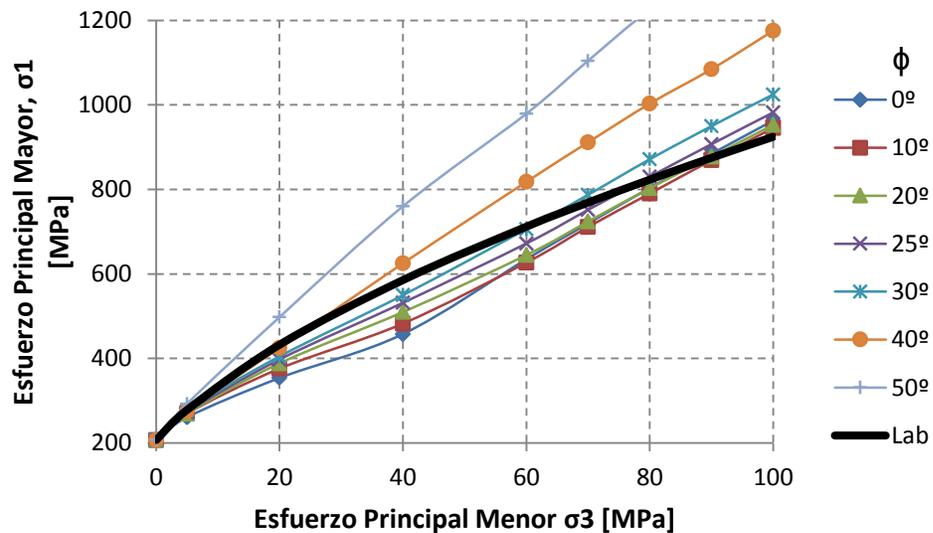


Figura 4-14: Envolventes de falla para cada valor de  $fjm\_fa$ .

Al comparar esta envolvente entregada por el Flat Joint Model con la generada por el Enhanced Bonded Particle Model, se puede observar que existe un mejor ajuste por parte del FJM, obteniendo una diferencia promedio (MAD) de 27.6 [MPa], mientras que el Enhanced BPM posee una diferencia de 35.6 [MPa]. Esta diferencia es posible observarla en la siguiente figura:

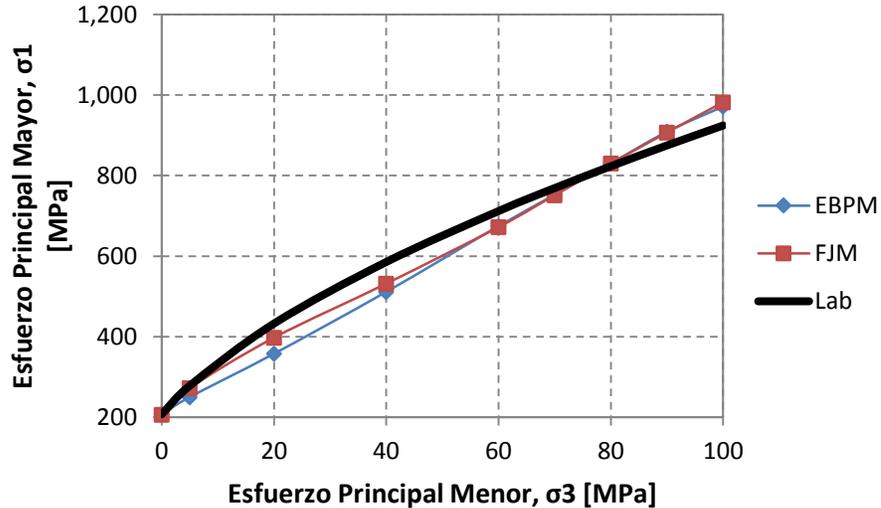


Figura 4-15: Comparación de envolventes de falla entregadas por FJM y Enhanced BPM.

Como es posible observar en la Figura 4-15, el FJM provee una mejor correlación con la envolvente experimental a confinamientos más bajos (menores a 60 MPa), mientras que a confinamientos más altos la respuesta de ambos modelos es bastante parecida.

Además de la envolvente experimental obtenida por el software Roclab al ingresar una serie de datos provenientes de distintos autores, también se cuenta con una envolvente de falla para la roca Westerly Granite obtenida por Haimson & Chang (2000). Este autor estudió el comportamiento de esta roca mediante una serie de ensayos triaxiales a distintos confinamientos, para probetas tanto cilíndricas, como prismáticas.

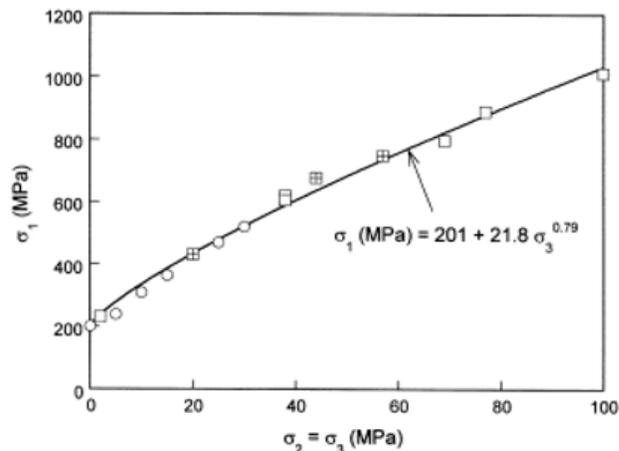


Figura 4-16: Envolvente de falla roca Westerly Granite obtenida por Haimson & Chang.

En la Figura 4-16 es posible observar la envolvente de falla obtenida por este autor, y la ecuación que la representa. En la imagen los círculos representan los ensayos hechos en probetas cilíndricas, mientras que los cuadrados los que fueron hechos en probetas prismáticas.

En la siguiente tabla comparativa es posible observar los pares  $\sigma_1 - \sigma_3$  obtenidos con el modelo FJM versus los obtenidos con la ecuación entregada por Haimson & Chang:

Tabla 4-12: Comparación pares  $\sigma_1 - \sigma_3$  FJM vs Haimson & Chang

$\sigma_3$	FJM $\sigma_1$	Haimson $\sigma_1$	Dif %
0	206.6	201.0	2.8%
5	272.5	278.7	2.2%
20	397.5	433.4	8.3%
40	531.7	602.9	11.8%
60	672.1	754.6	10.9%
70	751.6	826.3	9.0%
80	830.1	895.9	7.3%
90	907.0	963.6	5.9%
100	982.1	1029.8	4.6%

En la Figura 4-17 es posible ver estos datos graficados. Se puede ver que los datos se asemejan bastante. Al igual que en la comparación con la envolvente experimental obtenida mediante Roclab, los valores de resistencia a bajos confinamientos son los más parecidos, pero en este caso también los son los obtenidos a confinamientos altos. La diferencia radica en confinamientos medios (entre 40 y 70 MPa).

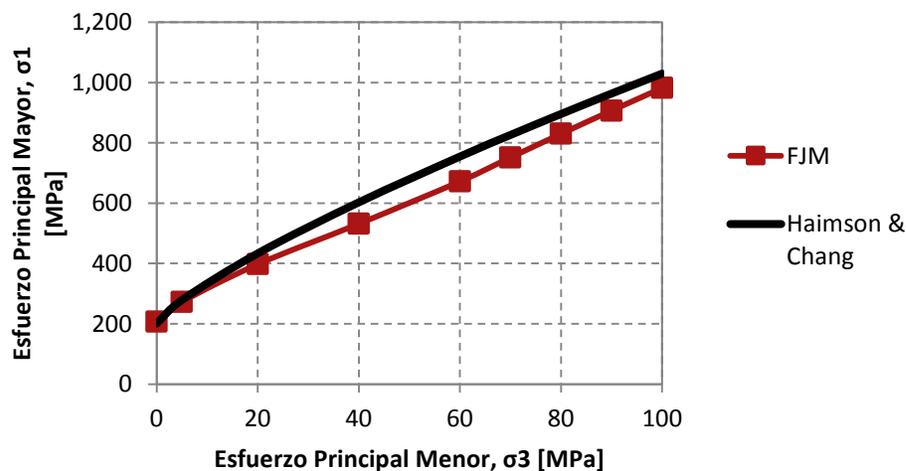


Figura 4-17: Comparación envolvente de falla FJM versus Haimson & Chang.

#### 4.4.2 Curvas Esfuerzo-Deformación

Dada la calibración de este modelo de elementos discretos, se obtuvo una serie de curvas esfuerzo-deformación para distintos confinamientos. En la Figura 4-18 es posible ver el resultado de estos ensayos triaxiales realizados mediante el Flat Joint Model.

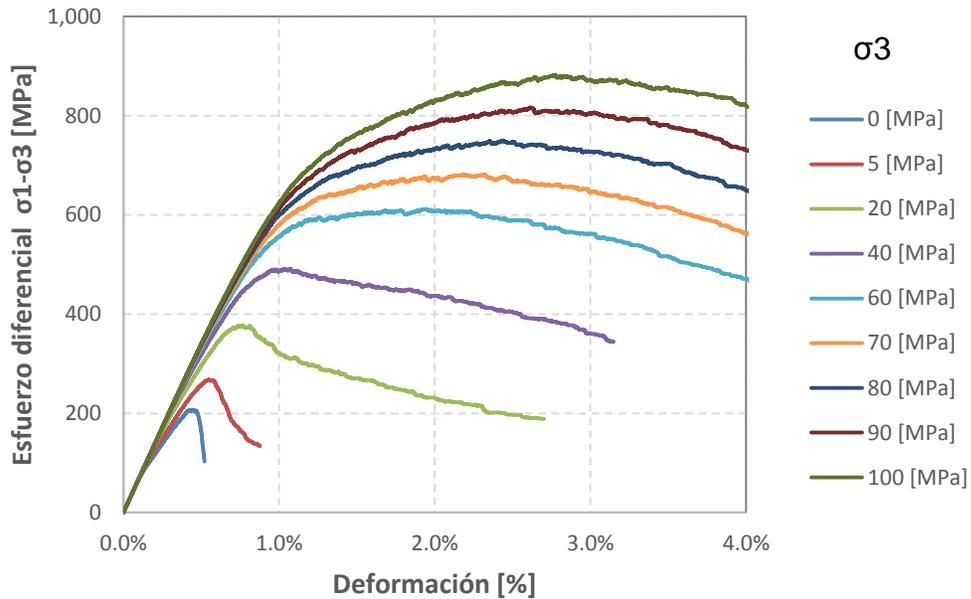


Figura 4-18: Curvas esfuerzo-deformación para distintos confinamientos obtenidas mediante FJM.

Si bien este comportamiento de transición de frágil a dúctil a medida que aumenta el confinamiento es normal en las rocas como es mencionado en la Sección 2.2.3.1, también se destaca que para rocas no porosas ni alteradas como lo es el granito Westerly, esta transición se observa a muy altos confinamientos, por lo que observando la Figura 4-18, se tendría una mala representación del comportamiento post-peak a confinamientos sobre los 40 [MPa], ya que es a esta presión de confinamiento aproximadamente que comienza la transición frágil-dúctil.

A continuación se presenta una comparación de las respuestas de los modelos Enhanced BPM y FJM con respecto a las curvas experimentales. En la Figura 4-19 y la Figura 4-21 se observan curvas esfuerzo-deformación obtenidas a confinamientos de 5 [MPa] y 100 [MPa] respectivamente en donde se comparan con curvas experimentales obtenidas por Kawakata & Shimada (2000), mientras que en la Figura 4-20 se observan curvas esfuerzo-deformación obtenidas a una presión de confinamiento de 60 [MPa], las cuales son comparadas con la curva experimental obtenida por Haimson & Chang (2000).

#### 4.4.2.1 Ensayo Triaxial, Confinamiento 5 [MPa]

Al comparar la respuesta de ambos modelos en un ensayo triaxial con confinamiento de 5 [MPa], se aprecia que el Flat Joint Model representa de mejor manera a la curva experimental que el Enhanced Bonded Particle Model. Si bien ambos modelos ajustan bastante bien la parte pre-peak, el FJM es el único capaz de darle un comportamiento frágil a la curva. Esto es posible verlo en la Figura 4-19.

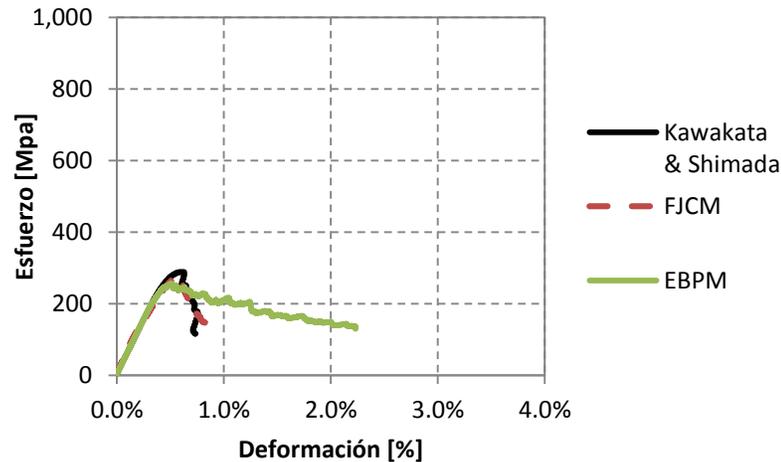


Figura 4-19: Curvas esfuerzo-deformación ensayo triaxial convencional, confinamiento 5 [MPa] (Kawakata & Shimada, 2000).

#### 4.4.2.2 Ensayo Triaxial, Confinamiento 60 [MPa]

Con respecto al análisis de ensayos triaxiales a un confinamiento de 60 [MPa], se observa que la respuesta de ambos modelos es bastante parecida (Figura 4-20), con la diferencia de que el FJM alcanza un punto más alto en la parte lineal de la curva que el Enhanced BPM. En conclusión ambos modelos no son capaces de replicar el comportamiento frágil de esta roca a tal confinamiento.

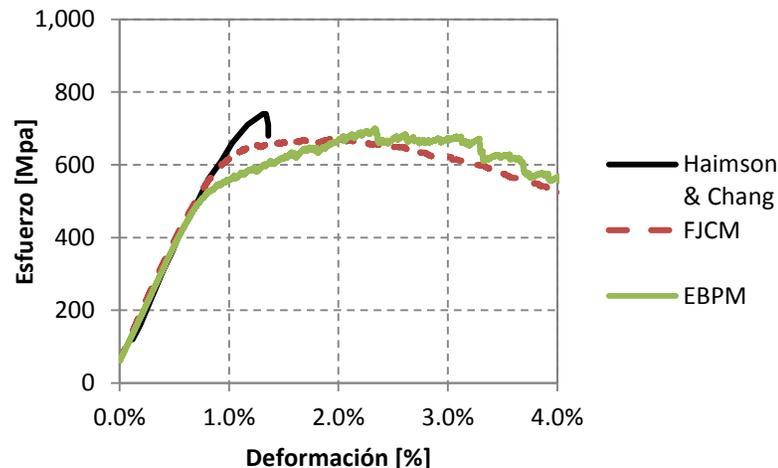


Figura 4-20: Curvas esfuerzo-deformación ensayo triaxial convencional, confinamiento 60 [MPa] (Haimson & Chang, 2000).

#### 4.4.2.3 Ensayo Triaxial, Confinamiento 100 [MPa]

Por último al comparar las curvas obtenidas en un ensayo triaxial con un confinamiento de 100 [MPa], se observa que ambas son prácticamente idénticas (Figura 4-21), con la diferencia que la curva del FJM posee un módulo de deformación levemente mayor al entregado por el Enhanced BPM.

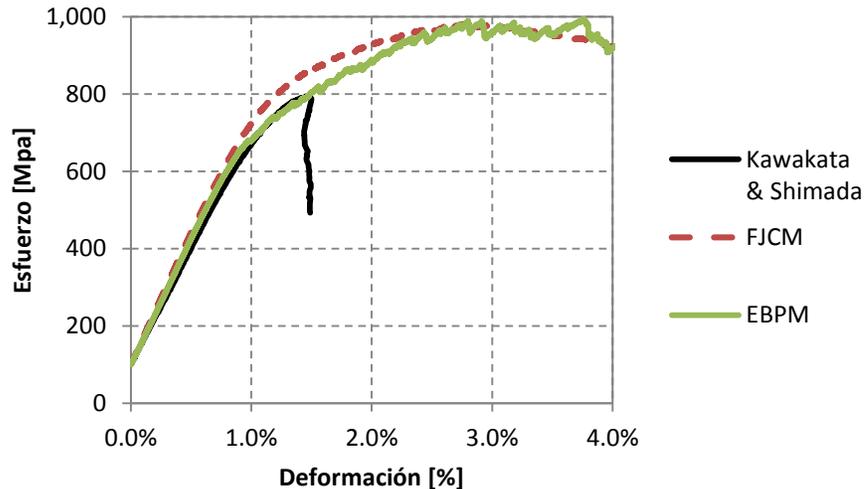


Figura 4-21: Curvas esfuerzo-deformación ensayo triaxial convencional, confinamiento 100 [MPa] (Kawakata & Shimada, 2000).

#### 4.4.3 Módulo de Young

En esta sección se estudia el cambio que presenta el módulo de Young al aumentar el confinamiento en los ensayos triaxiales convencionales. Según estudios experimentales realizados por Kawakata & Shimada (2000), el módulo de elasticidad cambia con la presión de confinamiento según la siguiente ecuación:

$$E = 44\sigma_3 [GPa] + 60.3 [GPa]$$

Los resultados de la variación del módulo de Young según el confinamiento tanto para el Enhanced BPM y el FJM son mostrados en la Tabla 4-13. Esta tabla de valores se ve representada gráficamente en la Figura 4-22. Es notorio que el Enhanced BPM representa de mejor manera los resultados experimentales del módulo de elasticidad, con variaciones promedio del 1%, pero el FJM no lo hace de mala manera, ya que la diferencia máxima con los valores obtenidos por Kawakata es del 7%.

Tabla 4-13: Resultados variación Módulo de Young según confinamiento

$\sigma_3$ [MPa]	Experimental E [GPa]	EBPM E [GPa]	FJM E [GPa]
0	60.3	60.7	60.3
5	60.5	60.7	61.6
20	61.2	61.3	65.2
40	62.1	62.3	66.8
60	62.9	63.0	67.4
70	63.4	63.3	67.5
80	63.8	63.6	67.5
90	64.3	64.0	67.5
100	64.7	64.2	67.6

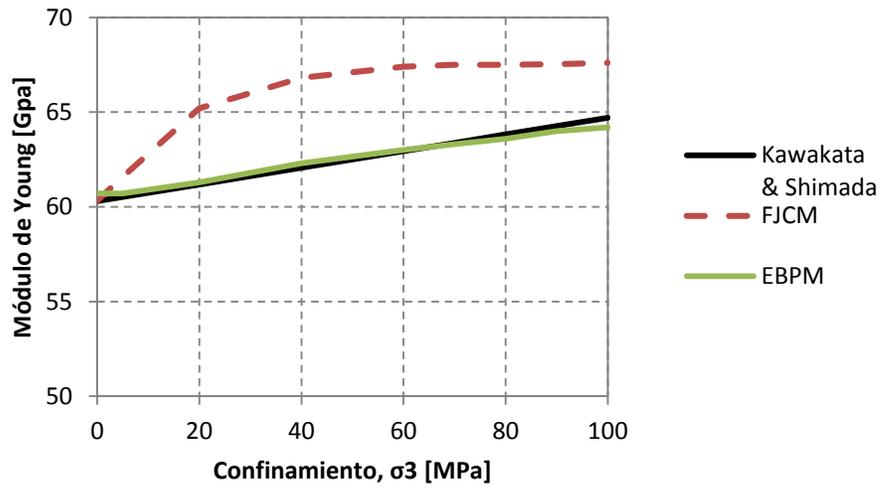


Figura 4-22: Comportamiento módulo de Young según confinamiento.

#### 4.4.4 Razón de Poisson

Al igual que con el módulo de elasticidad, Kawakata & Shimada (2000) estudiaron el comportamiento del módulo de corte (G) con el confinamiento mediante ensayos triaxiales convencionales, estimando que el comportamiento experimental de este parámetro está dado por la siguiente ecuación:

$$G = 18.9\sigma_3 [GPa] + 22.2 [GPa]$$

De esta ecuación se desprende también el comportamiento de la razón de Poisson, ya que existe una relación entre estos parámetros dada por la siguiente ecuación:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Utilizando estas dos ecuaciones además de la relación propuesta para el módulo de Young, se obtiene la siguiente expresión para la razón de Poisson en función del confinamiento:

$$\nu = \frac{3.1\sigma_3 + 7.95}{18.9\sigma_3 + 22.2}$$

En la Tabla 4-14 es posible ver los valores obtenidos de las razones de Poisson de los ensayos triaxiales mediante ambos modelos de elementos discretos, en donde es posible observar que el FJM obtiene valores de este parámetro más cercanos a los experimentales calculados por la ecuación derivada de Kawakata & Shimada.

Tabla 4-14: Resultados variación razón de Poisson según confinamiento

$\sigma_3 [MPa]$	Experimental $\nu$	EBPM $\nu$	FJM $\nu$
0	0.36	0.09	0.34
5	0.36	0.09	0.33
20	0.35	0.09	0.23
40	0.35	0.09	0.19
60	0.35	0.09	0.18
70	0.35	0.09	0.18
80	0.35	0.09	0.18
90	0.34	0.09	0.17
100	0.34	0.09	0.17

En la Figura 4-23 es posible ver de manera gráfica la comparación del comportamiento de la razón de Poisson obtenida por cada modelo de partículas. Si bien los resultados obtenidos por el FJM no siguen la tendencia lineal que entrega el comportamiento experimental, se obtienen valores mayores, y por ende más cercanos a los experimentales, de la razón de Poisson. A partir de un confinamiento de 40 [MPa] aproximadamente se tiene un comportamiento prácticamente lineal de esta variable, con un valor casi constante de 0,18.

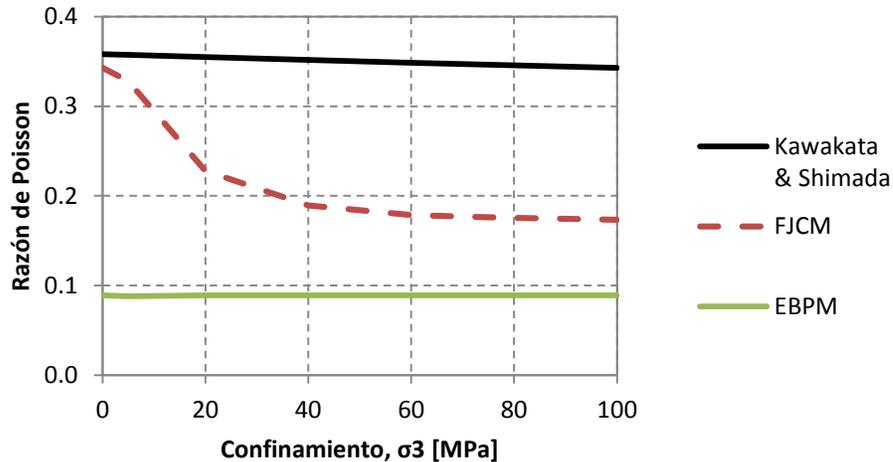


Figura 4-23: Comportamiento razón de Poisson según confinamiento.

#### 4.4.5 Umbrales de Daño ( $\sigma_{ci}$ , $\sigma_{cd}$ y $\sigma_{peak}$ )

Como se mencionó en la Sección 4.4.1 el FJM es el modelo que ajusta de mejor manera la resistencia peak con respecto a la envolvente experimental, sobre todo en confinamientos bajos (menores a 60 [MPa]), lo que se ve reflejado en una menor diferencia absoluta media con respecto al Enhanced BPM.

Para obtener los valores de  $\sigma_{ci}$  y  $\sigma_{cd}$  experimentales con los cuales se comparan ambos modelos, se utilizaron las curvas esfuerzo-deformación entregadas por Kawakata & Shimada y Haimson & Chang. En la Tabla 4-15 se aprecian los valores experimentales para las curvas de Kawakata & Shimada, mientras que en la Tabla 4-16 los de la curva de Haimson & Chang.

Tabla 4-15: Umbrales de daño experimentales para confinamientos de 5 [MPa] y 100 [MPa]

<b>Kawakata &amp; Shimada</b>		
$\sigma_3$ [MPa]	$\sigma_{ci}$ [MPa]	$\sigma_{cd}$ [MPa]
5	91 / 92	171 / 181
100	196 / 229 / 241 / 305	542 / 563 / 574 / 590

Tabla 4-16: Umbrales de daño experimentales para confinamiento de 60 [MPa]

<b>Haimson &amp; Chang</b>		
$\sigma_3$ [MPa]	$\sigma_{ci}$ [MPa]	$\sigma_{cd}$ [MPa]
60	160	510

Para la estimación del  $\sigma_{ci}$ , se tiene que los modelos entregan de manera intrínseca en sus resultados el valor obtenido para el esfuerzo de iniciación de daño para cada ensayo. En la Tabla 4-17 se muestran los resultados del esfuerzo  $\sigma_{ci}$  obtenidos por ambos modelos. Cabe destacar que valores típicos para el esfuerzo  $\sigma_{ci}$  con respecto a la resistencia peak fluctúan entre 30% y 60% (Cai et al., 2004), por lo que en promedio ambos modelos estiman de buena manera la iniciación de daño.

Tabla 4-17: Resultados  $\sigma_{ci}$  entregados por Enhanced BPM y FJM

$\sigma_3$ [MPa]	<b>Enhanced BPM</b>			<b>FJM</b>		
	$\sigma_{peak}$ [MPa]	$\sigma_{ci}$ [MPa]	$\sigma_{ci}/\sigma_{peak}$	$\sigma_{peak}$ [MPa]	$\sigma_{ci}$ [MPa]	$\sigma_{ci}/\sigma_{peak}$
0	208	45	22%	207	51	25%
5	250	74	29%	273	68	25%
20	358	124	35%	398	112	28%
40	511	174	34%	532	170	32%
60	674	212	31%	672	233	35%
70	752	228	30%	752	262	35%
80	830	243	29%	830	290	35%
90	909	257	28%	907	318	35%
100	971	272	28%	982	346	35%

En la Figura 4-24 se aprecia una comparación gráfica entre los resultados del EBPM, FJM y valores experimentales. Si bien se observa una mejor aproximación del Enhanced BPM a los valores de laboratorio, cabe destacar que ambos modelos sobre estiman las resistencias peak a altos confinamientos, por lo que está bien que los valores de iniciación de daño sean mayores a los experimentales. Es más, los valores de la razón  $\sigma_{ci}/\sigma_{peak}$  son más cercanos a los propuestos por Cai et al. (2004) en el Flat Joint Model que en el Enhanced Bonded Particle Model.

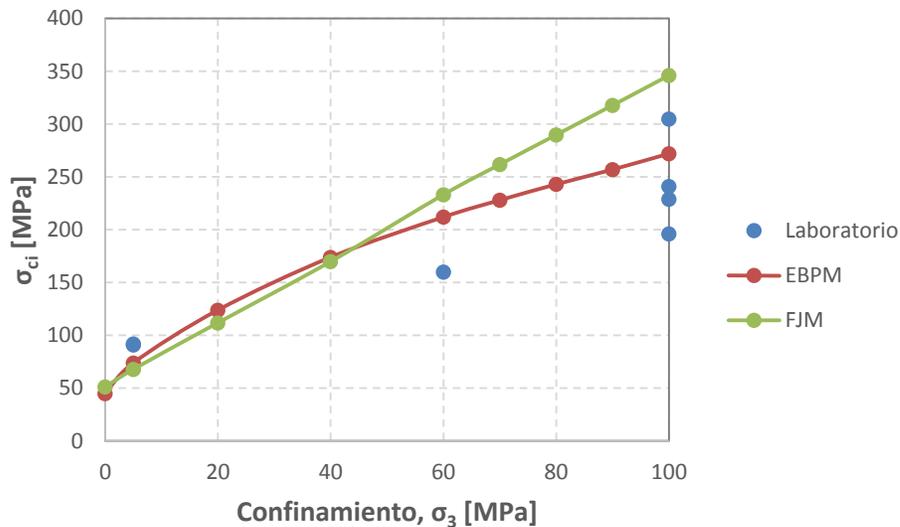


Figura 4-24: Comparación entre  $\sigma_{ci}$  obtenido por modelos de PFC<sup>3D</sup> y datos de laboratorio.

Además de comparar con los datos experimentales de Kawakata & Shimada y Haimson & Chang, también existe un estudio realizado por Brace & Martin con la roca Westerly granite (Brace & Martin, 1968), en donde estima que la iniciación de daño está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{ci} = A\sigma_{ucs} + B\sigma_3$$

$$A: 0,3 - 0,5 \quad B: 1,4 - 2,6 \quad \sigma_{ucs} = 206,9 \text{ [MPa]}$$

De esta manera, en la Figura 4-25 se grafican los casos extremos de esta ecuación. Se puede observar que los valores de  $\sigma_{ci}$  de ambos modelos se encuentran dentro del rango estipulado por Brace & Martin (1968).

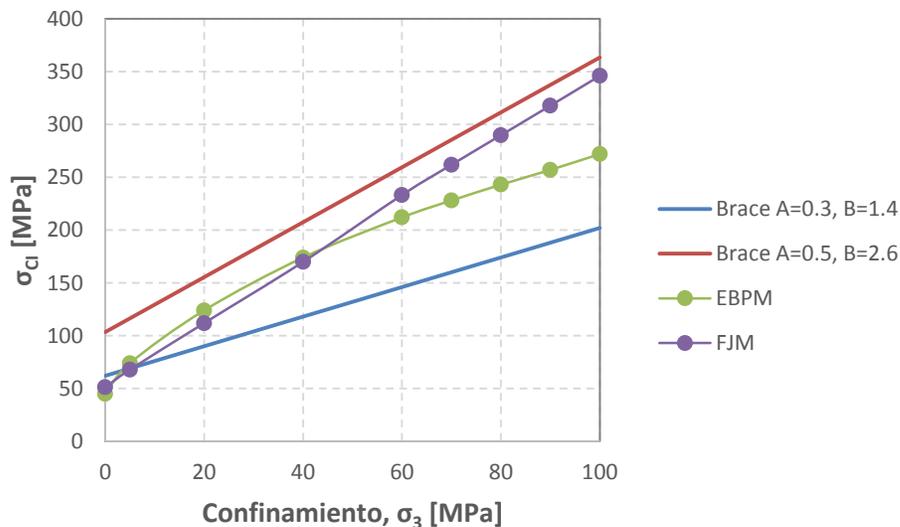


Figura 4-25: Comparación entre  $\sigma_{ci}$  obtenido por los modelos de PFC<sup>3D</sup> y curvas de Brace & Martin.

Con lo que respecta a la estimación de  $\sigma_{cd}$ , los modelos en PFC<sup>3D</sup> no lo entregan como resultados del ensayo, por lo que es necesario medirlo a partir de las curvas esfuerzo-deformación. Como es sabido, el esfuerzo  $\sigma_{cd}$  coincide con el punto en que la curva de deformación volumétrica pasa de un comportamiento contractivo a dilatante. De esta manera en la Tabla 4-18 se muestran los resultados de la estimación de  $\sigma_{cd}$  para el Enhanced BPM y el FJM. Cai et al. (2004) también estimó un rango de valores en los cuales se encuentra la razón entre  $\sigma_{cd}$  y  $\sigma_{peak}$ , el cual se encuentra entre 65% y 85%.

Tabla 4-18: Resultados  $\sigma_{cd}$  entregados por Enhanced BPM y FJM

$\sigma_3$ [MPa]	Enhanced BPM			FJM		
	$\sigma_{peak}$ [MPa]	$\sigma_{cd}$ [MPa]	$\sigma_{cd}/\sigma_{peak}$	$\sigma_{peak}$ [MPa]	$\sigma_{cd}$ [MPa]	$\sigma_{cd}/\sigma_{peak}$
0	208	145	70%	207	89	43%
5	250	222	89%	273	107	39%
20	358	326	91%	398	251	63%
40	511	432	84%	532	407	76%
60	674	536	80%	672	560	83%
70	752	587	78%	752	604	80%
80	830	638	77%	830	638	77%
90	909	683	75%	907	687	76%
100	971	736	76%	982	752	77%

A modo de facilitar la comparación entre las respuestas de ambos modelos, en la Figura 4-26 se grafica el comportamiento del  $\sigma_{cd}$  con respecto al confinamiento. Los valores obtenidos por ambos modelos comienzan a tener un comportamiento muy similar a partir de un confinamiento de 40 [MPa]. Si bien el FJM subestima el valor del umbral de daño para los casos en que el confinamiento es de 0[MPa] (Ensayo de Compresión Uniaxial) y 5 [MPa], luego los valores alcanzan el rango propuesto por Cai et al. (2004).

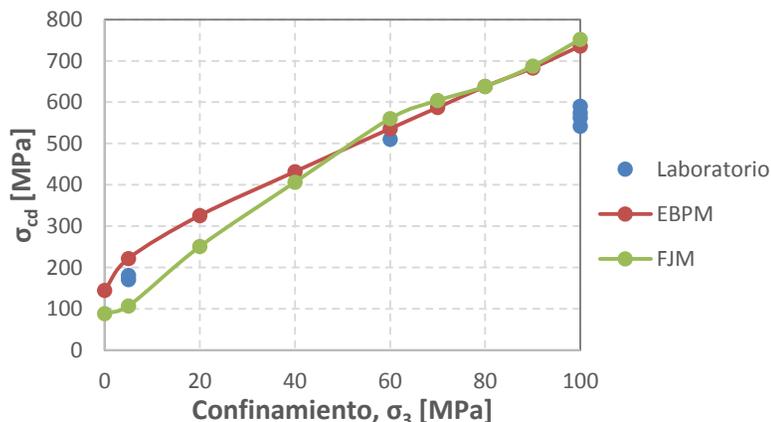


Figura 4-26: Comparación entre  $\sigma_{cd}$  obtenido por modelos de PFC<sup>3D</sup> y datos de laboratorio.

#### 4.4.6 Ángulo de Dilatancia

Según estudios del efecto del confinamiento en el ángulo de dilatancia mediante ensayos triaxiales de roca (Yuan & Harrison, 2004), dicho ángulo disminuye al aumentar el esfuerzo principal menor ( $\sigma_3$ ), lo cual es coherente con la teoría de transición frágil-dúctil (Figura 4-27).

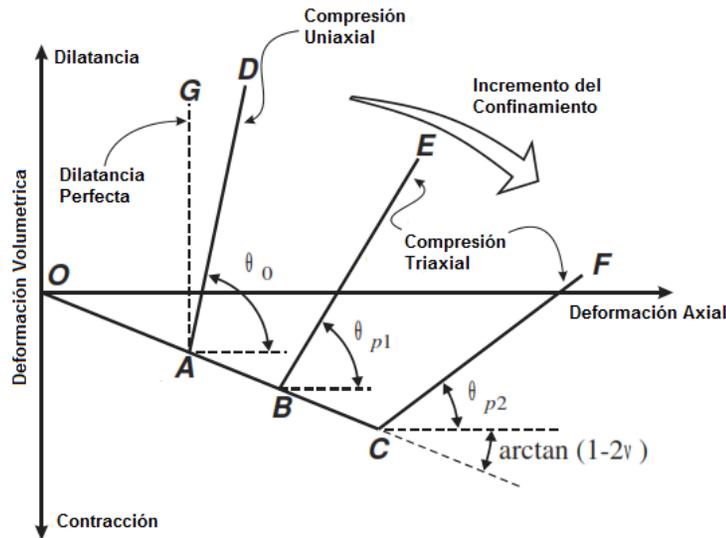


Figura 4-27: Comportamiento ángulo de dilatancia con respecto al confinamiento (Yuan & Harrison, 2004).

Para lograr una comparación con los datos experimentales, se estimaron los ángulos de dilatancia para las curvas volumétricas obtenidas por Kawakata & Shimada (2000) y Haimson & Chang (2000). En la Figura 4-28 es posible ver el comportamiento de este parámetro entregado por cada uno de los modelos. Se observa que las respuestas son bastante parecidas (diferencias no mayores al 8%), y que se ajustan de buena manera a los datos experimentales, sobrestimando un poco el valor de este ángulo a confinamientos mayores.

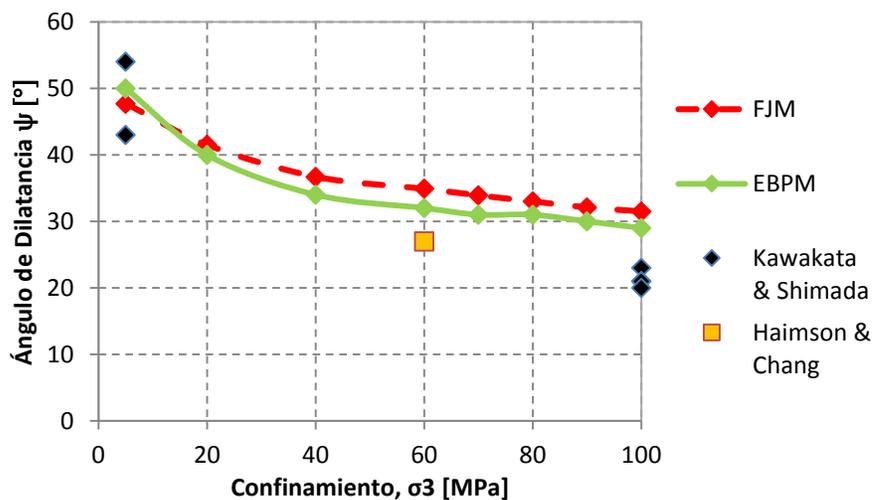


Figura 4-28: Comportamiento ángulo de dilatancia según confinamiento.

#### 4.4.7 Ángulo de Fractura

Haimson & Chang (2000) mediante ensayos triaxiales convencionales hechos a la roca Westerly granite estudio el efecto del confinamiento en el ángulo de fractura (Figura 4-29), concluyendo que este disminuye a medida que aumenta el esfuerzo principal menor.

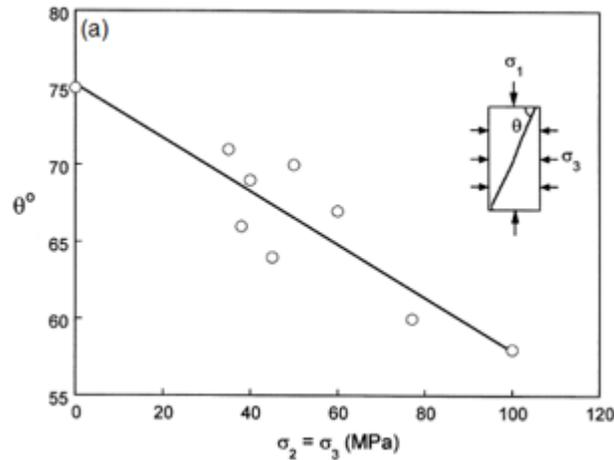


Figura 4-29: Efecto del confinamiento en el ángulo de fractura del granito Westerly (Haimson & Chang, 2000).

Lo ideal para estimar el ángulo de fractura es observando el plano de falla de la probeta, lo cual es muy difícil en PFC<sup>3D</sup> debido a que no es posible ver los contactos fallados al interior de la probeta (Figura 4-30), siendo imposible definir un plano de falla.

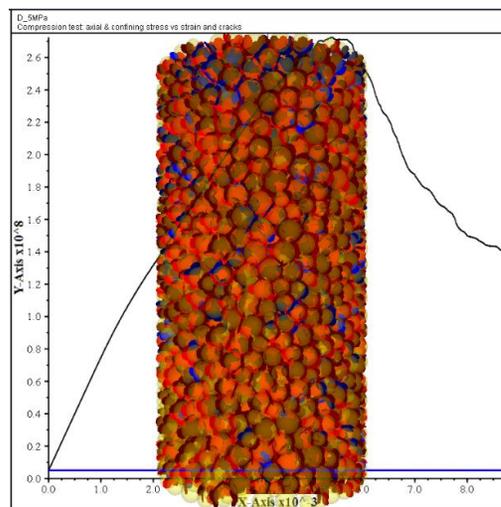


Figura 4-30: Imagen de probeta al finalizar ensayo triaxial a confinamiento de 5 [MPa] utilizando FJM.

Es por esto que se utilizó una relación matemática entregada por el círculo de Mohr (Figura 4-31), en donde relaciona el ángulo de fractura con el ángulo de fricción de la roca según el criterio Mohr-Coulomb. Para la estimación del ángulo de fricción, se utilizó el software Roclab, en el cual se ingresaron los sets  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  obtenidos por los distintos ensayos triaxiales realizados con el Flat Joint Model.

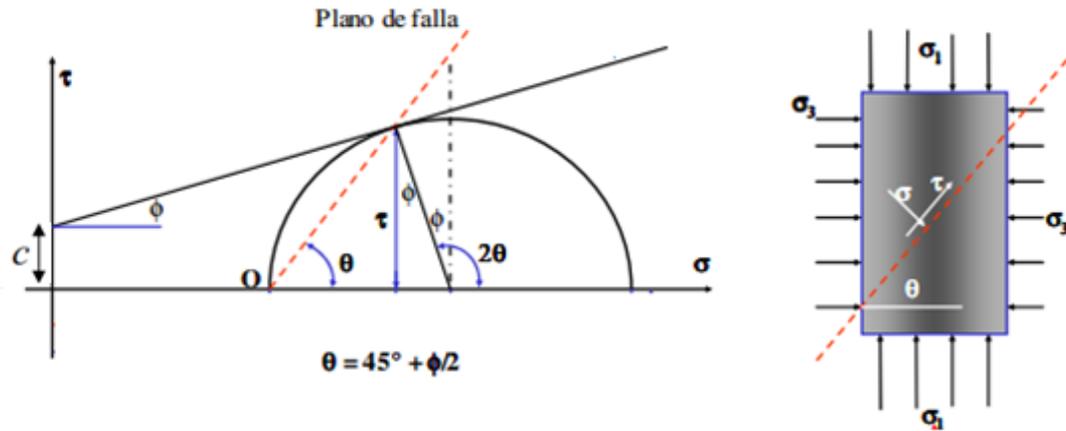


Figura 4-31: Relación entre ángulo de fractura y ángulo de fricción de la roca.

De esta manera se obtiene una serie de valores de ángulos de fricción y por ende mediante la relación de Mohr una serie de valores para el ángulo de fractura listados en la Tabla 4-19, en donde se observa que la tendencia de ambos modelos es bastante parecida.

Tabla 4-19: Resultados ángulos de fractura modelos Enhanced BPM y FJM

$\sigma_3$ [MPa]	Enhanced BPM		FJM	
	$\phi$ [°]	$\vartheta$ [°]	$\phi$ [°]	$\vartheta$ [°]
5	49.7	70	53.6	72
20	49.8	70	49.6	70
40	50.9	70	48.2	69
60	51.2	71	49.3	70
70	50.6	70	50.8	70
80	50.7	70	50.5	70
90	48.7	69	50.1	70
100	46.4	68	49.9	70

Al igual que Haimson & Chang, Mogi (2007) también estudio el efecto del confinamiento en el ángulo de fractura, obteniendo también una serie de datos. Es así como en la Figura 4-32 se graficaron los puntos experimentales y los obtenidos por los modelos de PFC<sup>3D</sup>, con sus respectivas líneas de tendencia. De esta figura se puede concluir que los modelos presentan prácticamente la misma tendencia, donde se sobre estima el valor del ángulo de fractura para confinamientos mayores a los 40 [MPa].

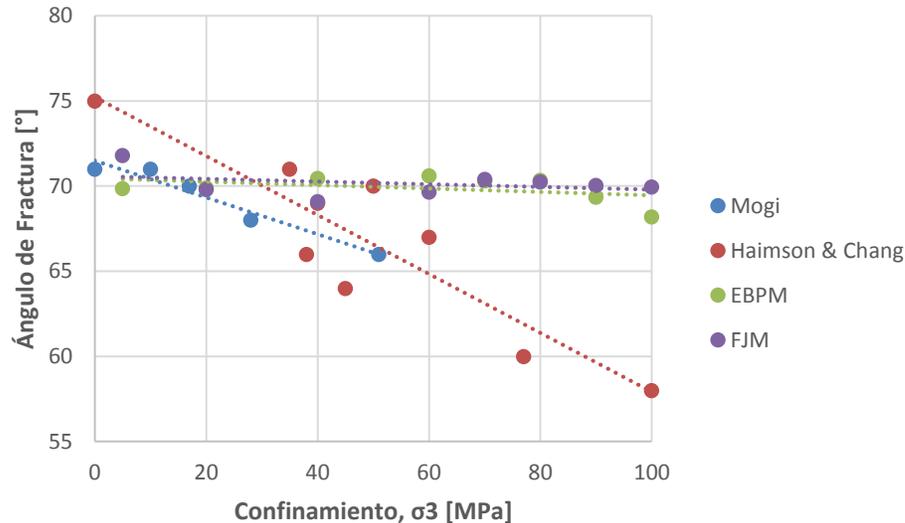


Figura 4-32: Comparación ángulos de fractura obtenidos por modelos de PFC<sup>3D</sup> versus datos de laboratorio.

#### 4.4.8 Módulo Post-Peak

Para estimar el módulo post-peak, se hizo una regresión lineal a la parte posterior a la resistencia máxima de las curvas esfuerzo-deformación a distintos confinamientos. De esta manera la pendiente de dicha regresión lineal corresponde al módulo post-falla. En la Tabla 4-20 se muestran los valores obtenidos por cada modelo para cada confinamiento, mientras que en la Figura 4-33 se observa gráficamente como es la variación que sufre este parámetro a medida que aumenta la presión de confinamiento tanto para el Flat Joint Model y el Enhanced Bonded Particle Model. 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. En la Tabla 4-20 se presentan los resultados del módulo post-peak obtenidos de las curvas esfuerzo-deformación de los ensayos triaxiales convencionales, a medida que se aumentó el confinamiento.

Tabla 4-20: Resultados variación módulo post-peak según confinamiento

$\sigma_3$	EBPM $E_{\text{post-peak}}$ [GPa]	FJM $E_{\text{post-peak}}$ [GPa]
0	24.5	121.9
5	10.4	46.7
20	8.3	8.8
40	5.7	6.3
60	5.1	7.4
70	4.7	8.1
80	5.1	8.1
90	5.8	9.0
100	7.6	9.2

El FJM genera curvas con mayor modulo post-peak hasta un confinamiento aproximado de 20 [MPa], donde los resultados pasan a ser muy parecidos. Esto es de esperar debido a que con el FJM se obtienen curvas frágiles a bajos confinamientos, por lo que la parte post-peak de la curva cae con una pendiente mayor. Si bien a partir de un confinamiento de 20 [MPa] los resultados son similares, el FJM obtiene valores levemente mayores por lo que se concluye que de cierta manera las curvas son menos dúctiles que las entregadas por el Enhanced BPM.

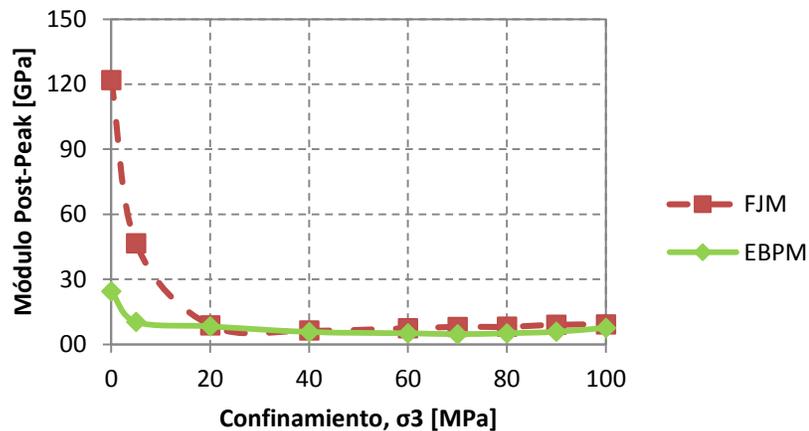


Figura 4-33: Comportamiento módulo post-peak según confinamiento.

#### 4.4.9 Implicancia del $f_{jm\_krat}$ en la respuesta triaxial

A modo de ver el efecto del micro-parámetro  $f_{jm\_krat}$  en la respuesta de los ensayos triaxiales, se realizaron ensayos con un valor de este parámetro igual a 1.4, ya que en la calibración del Enhanced Bonded Particle Model se asumió este valor por un presunto efecto en la respuesta frágil de las curvas esfuerzo-deformación. En la Figura 4-34, Figura 4-35 y Figura 4-36, se observa gráficamente una comparación para curvas obtenidas de ensayos triaxiales a confinamientos de 5, 20 y 40 [MPa] respectivamente.

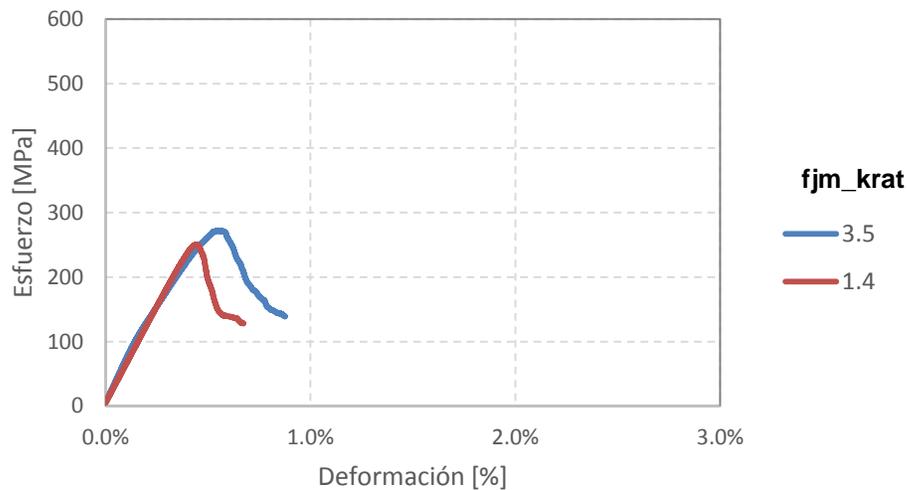


Figura 4-34: Efecto parámetro  $f_{jm\_krat}$  en ensayo triaxial, confinamiento 5 [MPa].

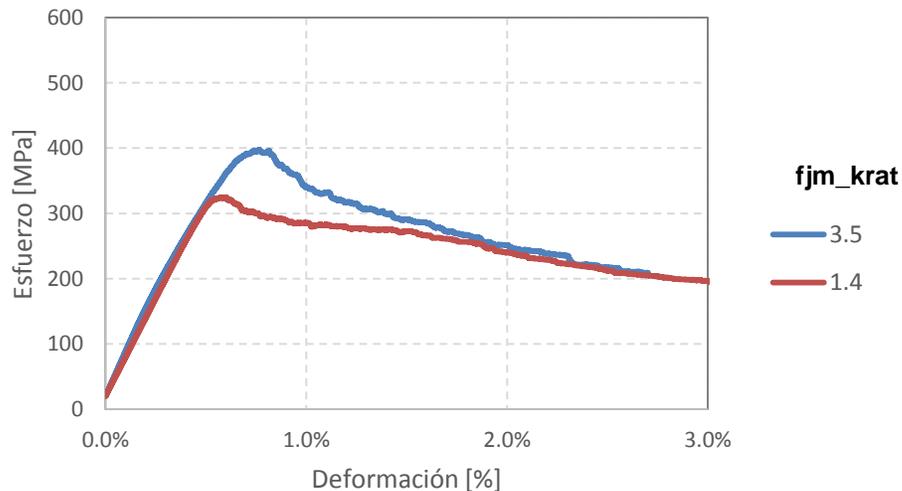
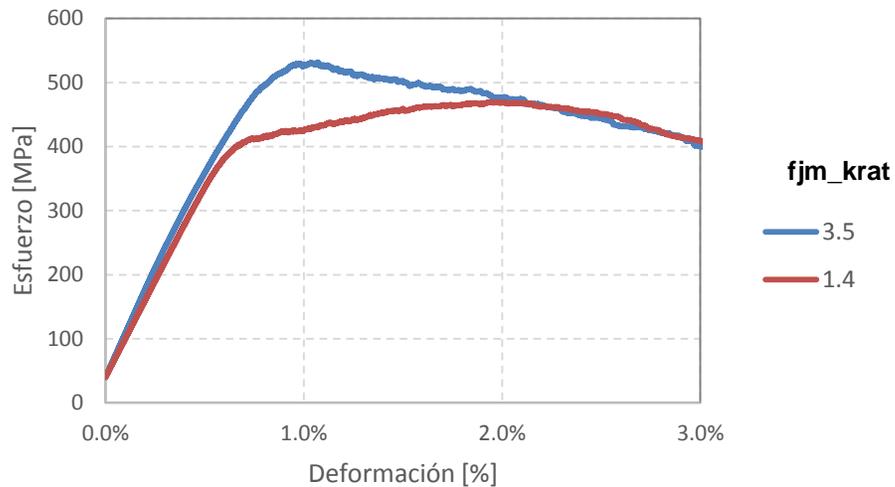


Figura 4-35: Efecto parámetro  $f_{jm\_krat}$  en ensayo triaxial, confinamiento 20 [MPa].



**Figura 4-36: Efecto parámetro fjm\_krat en ensayo triaxial, confinamiento 40 [MPa].**

Como es posible ver en estas figuras, la respuesta de las curvas son muy parecidas a muy bajos confinamientos (5 [MPa]), pero a partir de los 20 [MPa] ya la diferencia en las curvas es notoria. Para el ensayo con confinamiento de 40 [MPa] la curva en la que se utilizó un valor de 3.5 para el fjm\_krat sigue teniendo un comportamiento frágil a diferencia de la que se utilizó un valor de 1.4 en donde ya presenta una respuesta dúctil. Es por esto que se concluye que la opción escogida para la calibración fue la correcta, ya que representa de mejor manera el comportamiento frágil de la roca.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados entregados por el Flat Joint Model indican que hay un gran avance con respecto a los resultados entregados por el Enhanced Bonded Particle Model. En primer lugar se logra una mejor representación de la envolvente de falla experimental, al tener una diferencia absoluta media (MAD) de 27.6 [MPa] versus los 35.6 [MPa] entregado por el Enhanced BPM. Esto se debe a que el FJM posee una mejor respuesta a confinamientos menores a los 60 [MPa] en donde se obtienen valores de la resistencia peak más cercanos a los de laboratorio.

Ambos modelos presentan respuestas bastante similares a confinamientos mayores a 60 [MPa], en donde se sobre estima la resistencia peak de las curvas esfuerzo-deformación. Cabe destacar que los ensayos de laboratorio en roca intacta son bastante variables, por lo que no está claro decir que la representación a confinamientos mayores sea mala por parte de los modelos de elementos discretos.

Con lo que respecta a los ensayos de compresión uniaxial, si bien el Enhanced BPM responde de buena manera al calcular los parámetros de resistencia ( $\sigma_{ucs}$  y  $\sigma_t$ ) y el módulo de Young, el FJM lo hace de manera más precisa y permite solventar la deficiencia de la estimación de la razón de Poisson al pasar de una diferencia del 86% a tan solo una merma del 3%.

Si bien la respuesta de la razón de Poisson no sigue en su todo la tendencia experimental propuesta por Kawakata & Shimada, se observa que a confinamientos mayores a 40 MPa se comienza a tener el comportamiento esperado para este parámetro. Además se tiene un avance al obtener siempre valores más cercanos por parte del FJM a los obtenidos en Laboratorio.

En general la estimación de los umbrales de daño por parte de ambos modelos son bastante parecidos, y se encuentran dentro de los rangos normales como lo indican investigaciones de laboratorio (Cai et al., 2004).

Finalmente podemos decir que el Flat Joint Model, a diferencia del Enhanced Bonded Particle Model, es capaz de representar el comportamiento de una roca, al poder obtener una respuesta frágil de las curvas esfuerzo-deformación, reflejando de buena manera su comportamiento post-peak. Si bien para el caso de la roca Westerly granite no se pudo mantener este comportamiento a mayores confinamientos, se logró un gran avance al poder replicar las curvas experimentales a valores bajos del esfuerzo principal menor.

A modo de recomendación, se sugiere el utilizar este modelo en la aplicación de la técnica Synthetic Rock Mass, la cual interactúa al modelo de partículas con un modelo de discontinuidades (Discrete Fracture Network), permitiendo el estudio del comportamiento de la roca a escala macizo rocoso.

Además se incentiva a estudiar el efecto de la variación de los micro-parámetros  $\phi_B$  (fracción de contactos unidos),  $\phi_G$  (fracción de contactos fallados) y  $\phi_S$  (fracción de contactos en estado slit) para evaluar su implicancia en el resultado de los distintos ensayos de roca.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Arteaga, R. (2015). Modelamiento Numérico del Comportamiento Triaxial Verdadero de Roca Intacta Mediante Elementos Discretos y sus Implicancias en el Diseño Minero.
- Brace, W. (1964). Brittle Fracture of Rocks. State of Stress in the Earth's Crust. 111–175. (New York, American Elsevier Publishing Comp).
- Brace, W., & Martin, R. (1968). *A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity*. Paper presented at the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.
- Cai, M., Kaiser, P., Tasaka, Y., Maejima, T., Morioka, H., & Minami, M. (2004). Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5), 833-847.
- Cho, N. a., Martin, C., & Sego, D. (2007). A clumped particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(7), 997-1010.
- Cundall, P. A. (1971). *The measurement and analysis of accelerations in rock slopes*. Imperial College London (University of London).
- Cundall, P. A., & Hart, R. D. (1992). Numerical modelling of discontinua. *Engineering computations*, 9(2), 101-113.
- Haimson, B., & Chang, C. (2000). A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(1), 285-296.
- Heard, H. C., Abey, A., Bonner, B., & Schock, R. (1974). *Mechanical behavior of dry Westerly Granite at high pressure*: California Univ., Livermore (USA). Lawrence Livermore Lab.
- Hoek, E., & Brown, E. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186.
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (2000). *Engineering rock mechanics-an introduction to the principles*: Elsevier.
- Itasca. (2008). PFC3D (Particle Flow Code en 3 dimensiones). Versión 4.0. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis.
- Johnson, B., Friedman, M., Hopkins, T., & Bauer, S. (1987). *Strength and microfracturing of Westerly granite extended wet and dry at temperatures to 800*

*C and pressures to 200 MPa*. Paper presented at the The 28th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS).

Kawakata, H., & Shimada, M. (2000). Theoretical approach to dependence of crack growth mechanism on confining pressure. *Earth, planets and space*, 52(5), 315-320.

Luengo, J. (2014). Efecto Escala en el Modelamiento de Roca Intacta Mediante Elementos Discretos.

Mas Ivars, D. (2010). Bonded particle model for jointed rock mass. PhD thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology (KTH);, 2010. TRITA-LWR PHD 1058. [/http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-12055S](http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-12055S).

Mogi, K. (1971). Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. *Journal of Geophysical Research*, 76(5), 1255-1269.

Mogi, K. (2007). *Experimental rock mechanics*: CRC Press.

Paterson, M. S., & Wong, T.-f. (2005). *Experimental rock deformation-the brittle field*: Springer Science & Business Media.

Potyondy. (2010a). BPM Improvements to Match Macroproperties of Hard Rock. In I. ITASCA Consulting Group (Ed.).

Potyondy. (2010b). PFC3D\_EV Description. In I. ITASCA Consulting Group (Ed.).

Potyondy. (2012). A flat-jointed bonded-particle material for hard rock. 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

Potyondy. (2013a). PFC3D Flat-Joint Contact Model (version 1). In I. ITASCA Consulting Group (Ed.).

Potyondy. (2013b). PFC Bonded-Particle Materials. In I. ITASCA Consulting Group (Ed.).

Potyondy. (2014). Material-Modeling Support in PFC. In I. ITASCA Consulting Group (Ed.).

Potyondy, D., & Cundall, P. (2004). A bonded-particle model for rock. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41(8), 1329-1364.

RockScience. (2013). RocLab (Version 1.0).

Shimada, M., Cho, A., & Yukutake, H. (1983). Fracture strength of dry silicate rocks at high confining pressures and activity of acoustic emission. *Tectonophysics*, 96(1), 159-172.

Suzuki Morales, K. E. (2013). Aplicación de la técnica Synthetic Rock Mass a escala de laboratorio.

- Vallejos, J., Brzovic, A., Lopez, C., Bouzeran, L., & Ivars, D. M. (2013). *Application of the Synthetic Rock Mass approach to characterize rock mass behavior at the El Teniente Mine, Chile*. Paper presented at the Proceedings of the 3rd International FLAC/DEM Symposium, Itasca Consulting Group, Hangzhou, China.
- Yuan, S.-C., & Harrison, J. (2004). An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 41(4), 679-686.