



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

**EFFECTO ESCALA EN EL MODELAMIENTO DE ROCA INTACTA MEDIANTE  
ELEMENTOS DISCRETOS**

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

**JUAN BAUTISTA LUENGO CERDA**

**PROFESOR GUÍA:**

**JAVIER VALLEJOS MASSA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

**RAÚL GORMAZ ARANCIBIA**

**JAVIER CORNEJO GONZÁLEZ**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2014**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TITULO DE: Ingeniero Civil de Minas  
POR: Juan Bautista Luengo Cerda  
FECHA: 01/06/2014  
PROFESOR GUIA: Javier Vallejos Massa**

## **EFFECTO ESCALA EN EL MODELAMIENTO DE ROCA INTACTA MEDIANTE ELEMENTOS DISCRETOS**

El efecto escala corresponde a una disminución de la resistencia y propiedades de deformación de la roca a medida que se incrementa el volumen del espécimen. Este efecto es causado por la mayor probabilidad de encontrar estructuras y defectos en la roca. Las principales técnicas de modelamiento numérico no incluyen este fenómeno en sus simulaciones, lo que motiva a investigar metodologías que permitan replicar tal efecto.

El objetivo de esta memoria es evidenciar e inducir el efecto escala en modelos de elementos discretos. Para esto se dispone del software *PFC3D Versión 4.00-182* (64 bit) para realizar ensayos de compresión uniaxial, tracción directa y compresión bajo confinamiento. Para la calibración del modelo de elementos discretos se utilizan los datos de ensayos de laboratorio de la roca *Westerly Granite*. La inducción del efecto escala se efectúa a través de dos metodologías: (i) liberación de vínculos entre partículas de manera aleatoria, (ii) modificación de micro-parámetros que definen al modelo.

Se concluye que el modelo Bonded Particle Model utilizado por el software *PFC3D* permite replicar la resistencia y propiedades de deformación de la roca estudiada, exceptuando el comportamiento *post-peak*. Con respecto al efecto escala, éste no viene incorporado, por lo que la implementación se realiza con las metodologías descritas anteriormente. La liberación de vínculos produce disminución en la resistencia UCS pero no genera los mismos efectos para otros sets de micro-parámetros, necesitando en algunos casos liberar más del 100% de los vínculos para replicar la ley de escalamiento de Hoek & Brown. La modificación de micro-parámetros permite replicar la ley de escalamiento para cualquier set de micro-parámetros, utilizando como inputs el diámetro equivalente y resistencia a la compresión uniaxial de una probeta de 50 cm de diámetro de la roca en estudio.

Este trabajo permite progresar en la implementación del efecto escala en *PFC3D* para roca intacta y podría ser el inicio para la implementación en la técnica Synthetic Rock Mass (SRM) de este efecto, con el fin de obtener resistencias distintas para los bloques que conforman un macizo rocosos en función de sus tamaño. Es necesario estudiar el modo de traspasar el código utilizado en *PFC3D* a la técnica SRM, e identificar las ventajas, desventajas y las posibles limitaciones de la metodología propuesta.

**A mi familia.**

## **Agradecimientos**

*El presente trabajo de memoria se realizó en el marco del proyecto Fondecyt Iniciación #11110187: "Constitutive modeling of intact rock behavior under true triaxial loading conditions using a discrete element approach", desarrollándose por el Departamento de Ingeniería de Minas y el Advanced Mining Technology Centre (AMTC) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.*

*Los primeros agradecimientos recaen en el grupo de diseño minero del AMTC por hacer los días de trabajo alegres. A Kimie Suzuki por su ayuda constante. A los pesistas por ser mis sparrings durante todo momento.*

*Agradezco al profesor guía, Javier Vallejos, por la ayuda brindada en el tiempo de desarrollo de la memoria.*

*Finalmente, agradezco a mi familia por ser el pilar fundamental de todo y a amigos/as por acompañarme en todo este camino.*

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
	Motivación y Objetivos .....	1
	Alcances .....	2
	Metodología .....	2
	Contenidos de la memoria .....	3
2	ANTECEDENTES .....	4
2.1	Modelamiento Numérico .....	4
2.2	Método de Elementos Discretos (DEM) .....	5
2.3	Synthetic Rock Mass laboratory ( <i>SRMlab</i> ) .....	6
2.3.1	Bonded Particle Model.....	6
2.3.2	Discrete Fracture Network (DFN) .....	12
2.3.3	Smooth Joint Contact Model.....	13
2.4	<i>Particle Flow Code (PFC3D)</i> .....	13
2.4.1	Resolución .....	14
2.4.2	Modelo de contactos.....	15
2.5	Ensayos en <i>PFC3D</i> .....	16
2.5.1	Final Platen Strain Rate (PSR) .....	17
2.6	<i>Clumps</i> .....	18
2.7	Efecto Escala .....	19
2.8	PFC y Efecto Escala .....	21
2.9	Liberación de Vínculos .....	27
3	METODOLOGÍA .....	30
3.1	PSR.....	30

3.2	Cálculo de resolución de partículas .....	32
3.3	Análisis de sensibilidad .....	33
3.4	Calibración .....	34
3.4.1	Roca a calibrar.....	35
3.5	Verificación de Efecto Escala en <i>PFC3D</i> .....	38
3.6	Inducción de Efecto Escala .....	38
3.6.1	Liberación de vínculos .....	38
3.6.2	Modificación de microparámetros .....	42
4	ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	44
4.1	Análisis de sensibilidad. ....	44
4.1.1	Módulo de Young de partículas ( <i>ba_Ec</i> ).....	45
4.1.2	Coeficiente de fricción ( <i>ba_fric</i> ) .....	48
4.1.3	Módulo de Young de vínculos ( <i>pb_Ec</i> ): .....	50
4.1.4	Cohesión de vínculos ( <i>pb_coh</i> ): .....	52
4.1.5	Esfuerzo normal en vínculos ( <i>pb_sn</i> ): .....	54
4.1.6	Razón de rigidez ( <i>Krat</i> ).....	56
4.1.7	Ángulo de fricción ( <i>Pb_phi</i> ).....	57
4.1.8	.Efecto de la resolución de partículas .....	59
4.2	Calibración roca intacta.....	60
4.2.1	Validación modelo <i>Enhanced</i> calibrado.....	61
	Curvas de esfuerzo-deformación .....	63
4.3	Verificación de efecto escala.....	66
4.4	Inducción de efecto escala en <i>PFC3D</i> .....	68
4.4.1	Liberación de vínculos .....	68
4.4.2	Modificación de microparámetros .....	75

5	CONCLUSIÓN .....	88
6	RECOMENDACIONES .....	89
7	BIBLIOGRAFÍA .....	90
8	ANEXOS .....	91
8.1	Inducción de efecto escala.....	91
8.1.1	Código de Liberación de Vínculos .....	91
8.1.2	Código de Modificación de Micro-parámetros .....	92
8.1.3	Principales datos obtenidos por set simulado.....	96

## Índice de Figuras

Figura 1-1.	Componentes de <i>SRMlab</i> que forma parte de la muestra sintética, (Mas Ivars 2010). .....	1
Figura 2-1.	Circunstancias de falla de un macizo rocoso, Jing (2003). .....	5
Figura 2-2.	Elementos del modelo BP, (Potyondy and Cundall 2004).....	6
Figura 2-3:	Envolvente de falla según el criterio de Mohr Coulomb, (Suzuki 2013) 7	
Figura 2-4.	Contact bond.....	8
Figura 2-5.	Tipos de fallas, (Cho et al. 2007) .....	10
Figura 2-6.	Efecto de la rotación de partículas, (Cho, Martin and Segro 2007) .....	10
Figura 2-7.	Vínculos BPM y momento de partículas .....	11
Figura 2-8.	DFN's presentes en material sintético en 3D (izquierda) y 2D (derecha), (Suzuki 2013). .....	12
Figura 2-9.	Smooth Joint Contact Model (Mas Ivars, Potyondy, Pierce and Cundall 2008).....	13
Figura 2-10.	Ciclo de cálculo en <i>PFC3D, Manual Usuario PFC3D</i> .....	14
Figura 2-11.	Resolución de 7 partículas. Diámetro probeta 50 [mm], altura 100 [mm] .....	15
Figura 2-12.	Resolución de 9 partículas. Diámetro probeta 50 [mm], altura 100 [mm] .....	15

Figura 2-13. Componente de un Contacto, Manual Usuario PFC3D.....	16
Figura 2-14. Esquema sistemas de aplicación de esfuerzos (a) y curvas esfuerzo deformación generadas (b) (Suzuki 2013) .....	17
Figura 2-15. <i>Clúster</i> de partículas para el modelamiento de granos irregulares en roca frágil, (Cho, Martin and Segó 2007). .....	18
Figura 2-16. Lógica <i>Clump Stamp</i> , (Cho, Martin and Segó 2007).....	19
Figura 2-17. Curvas Esfuerzos vs Deformación, (Harrison and Hudson 1996). ....	19
Figura 2-18. Efecto escala, Hoek & Brown (1981) .....	20
Figura 2-19. Curva de escalamiento no confinado, (Yoshinaka, Osada, Park, Sasaki and Sasaki 2008).....	21
Figura 2-20. Esfuerzo versus deformación para cada probeta de simulación(Diederichs 1999) .....	23
Figura 2-21. Iniciación de falla vs ancho de muestra .....	24
Figura 2-22. Simulaciones con variación de tamaño de fractura.....	24
Figura 2-23. : Arreglo de partículas, (Koyama and Jing 2007). .....	26
Figura 2-24. Macro-propiedades en simulaciones PFC, (Koyama and Jing 2007). .....	26
Figura 2-25. Cambio en la porosidad en ensayos UCS. Izquierda distribución uniforme. Derecha distribución <i>power-law</i> , (Schöpfer, Abe, Childs and Walsh 2009). .....	27
Figura 2-26. Respuesta en ensayos UCS, de tracción directa (a) y efecto en macro-propiedades (b), frente al porcentaje de vínculos liberados. ....	28
Figura 3-1. Efecto de PSR en ensayos de compresión uniaxial.....	30
Figura 3-2. Efecto PSR en zona estable. ....	31
Figura 3-3. Diagrama de Calibración Modelo PFC3D. ....	34
Figura 3-4. Envoltorio de falla roca <i>Westerly Granite</i> . ....	37
Figura 3-5. Curva esfuerzo-deformación de ensayos triaxiales, confinamiento de 5 y 100 [MPa] (Kawakata and Cho 1999). Confinamiento de 60 [MPa] (Haimson and Chang 2000).....	37



Figura 3-6. (a) Esquema general entre los elementos del software <i>PFC3D</i> . (b) Recorrido de los vínculos, activando y desactivando su función.....	39
Figura 3-7. Respuesta de UCS frente a la liberación de vínculos .....	40
Figura 3-8. Metodología para implementar el efecto escala en <i>PFC3D</i> .....	41
Figura 4-1. UCS caso base modelo <i>Enhanced</i> .....	45
Figura 4-2. Variación de $ba_{Ec}$ .....	46
Figura 4-3. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro $ba_{Ec}$ .....	47
Figura 4-4. Variación de $ba_{fric}$ .....	48
Figura 4-5. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro $ba_{fric}$ . .....	49
Figura 4-6. Variación de $pb_{Ec}$ .....	50
Figura 4-7. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro $pb_{Ec}$ .....	51
Figura 4-8. Variación de $pb_{coh}$ .....	52
Figura 4-9. Variación del módulo de Young promedio frente a la variación de $pb_{Coh}$ .....	53
Figura 4-10. Variación de $pb_{sn}$ .....	54
Figura 4-11. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro $pb_{sn}$ . .....	55
Figura 4-12. Variación de $Krat$ .....	56
Figura 4-13. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro $kn/ks$ .....	57
Figura 4-14. Variación ángulo de fricción .....	58
Figura 4-15. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro $\Phi$ .....	59
Figura 4-16. Efecto de la resolución en ensayos UCS .....	60
Figura 4-17. Envoltorio de falla generada en <i>PFC3D</i> comparado con la base de datos trabajada.....	62
Figura 4-18. Comparación curva esfuerzo-deformación en ensayos triaxiales ( $\sigma_3=5$ [MPa]) .....	63
Figura 4-19. Comparación curva esfuerzo-deformación en ensayos triaxiales ( $\sigma_3=60$ [MPa]) .....	63

Figura 4-20. Comparación curva esfuerzo-deformación en ensayos triaxiales ( $\sigma_3=100$ [MPa]) .....	64
Figura 4-21. Relación entre iniciación de daño y daño crítico con respecto al esfuerzo de compresión uniaxial .....	66
Figura 4-22. Simulaciones del set de microparámetros calibrados a distintos diámetros.....	67
Figura 4-23. Tipo de daño que se genera en ensayos UCS. Curvas promedios de 10 simulaciones.....	68
Figura 4-24. Respuesta de ensayo UCS frente a la liberación vínculos y cambio en la resolución. ....	69
Figura 4-25. Respuesta de ensayo de tracción directa frente a la liberación vínculos y cambio en la resolución.....	69
Figura 4-26. Variación de la razón UCS/Td frente a la liberación de vínculos. ....	70
Figura 4-27. Principales diferencias en ensayos de tracción y compresión. ....	71
Figura 4-28. Relación entre porcentaje de vínculos liberados y UCS. ....	72
Figura 4-29. Efecto del diámetro de la muestra en la resistencia a la compresión máxima, $\sigma_{ci}$ y $\sigma_{cd}$ . ....	73
Figura 4-30. Cambio en la respuesta de la resistencia máxima uniaxial frente al cambio de diámetro de la probeta. ....	74
Figura 4-31. Efecto generado sobre el módulo de Young tangencial al 75% y 50% del <i>peak</i> .....	74
Figura 4-32. Tipo de daño que se genera en ensayos UCS a distintos diámetros, utilizando liberación de vínculos. Curvas promedios de 10 simulaciones. ....	75
Figura 4-33. Efecto de la modificación de microparámetros en la resistencia UCS. ....	77
Figura 4-34. Variabilidad de la resistencia UCS. (a) Set calibrado, (b) set por defecto. ....	78
Figura 4-35. Diferencia entre las curvas de esfuerzo de formación a resolución 12 y 6. ....	80
Figura 4-36. Variabilidad de la resistencia a la tracción directa. (a) set calibrado, (b) set por defecto. ....	81

Figura 4-37. Diferencia entre las curvas de tracción directa, resolución 12 y 6.....	83
Figura 4-38. Variación de la razón UCS/Td. (a) set calibrado, (b) set por defecto.	84
Figura 4-39. Efecto del diámetro de la muestra en la resistencia a la compresión máxima, sci y scd. ....	85
Figura 4-40. Cambio en la respuesta de la resistencia máxima uniaxial frente al cambio de diámetro de la probeta. ....	86
Figura 4-41. Efecto generado sobre el módulo de Young tangencial al 75% y 50% del peak.....	86
Figura 4-42. Tipo de daño que se genera en ensayos UCS a distintos diámetros, utilizando modificación de micro-parámetros. Curvas promedios de 10 simulaciones.....	87

## Índice de Tablas

Tabla 2-1. Micropropiedades modelo BPM, partículas.....	11
Tabla 2-2. Micro-propiedades de los vínculos del modelo BPM.....	12
Tabla 2-3. Principales características por simulación.....	21
Tabla 2-4. Datos utilizados para el cálculo de la resolución.....	22
Tabla 2-5 Parámetros utilizados en simulaciones, (Koyama and Jing 2007). ....	25
Tabla 3-1. Macro-parámetros para cada PSR utilizado.....	31
Tabla 3-2. Parámetros de caso base para el cálculo de PSR. ....	31
Tabla 3-3. Valor de PSR que inducen la velocidad de placas necesarias.....	32
Tabla 3-4. Características macro de <i>westerly granite</i> .....	35
Tabla 3-5. Datos obtenidos de literatura .....	36
Tabla 3-6. Diámetros utilizados para presenciar efecto escala. ....	38
Tabla 4-1. Descripción de parámetros. ....	44
Tabla 4-2. Resumen de los principales datos analizados. ....	46
Tabla 4-3. Resumen de los principales datos analizados .....	48
Tabla 4-4. Resumen de los principales datos analizados. ....	50

Tabla 4-5. Resumen de los principales datos analizados .....	52
Tabla 4-6. Resumen de los principales datos analizados .....	54
Tabla 4-7. Resumen de los principales datos analizados .....	56
Tabla 4-8. Principales macroparámetros obtenidos .....	58
Tabla 4-9. Parámetros por cada resolución estudiada. ....	60
Tabla 4-10. Parámetros finales de calibración modelo <i>Enhanced</i> .....	61
Tabla 4-11. Macroparámetros calibrados modelo <i>enhanced</i> .....	62
Tabla 4-12. Macroparámetros de las simulaciones realizadas.....	64
Tabla 4-13. Valores de daño generado en las muestras de <i>PFC3D</i> . ....	65
Tabla 4-14. Principales características de las probetas ensayadas .....	66
Tabla 4-15. Criterio necesario para inducir efecto escala. ....	72
Tabla 4-16. Micro-parámetros de ajuste, <i>PFC3D</i> . ....	76
Tabla 4-17. Set de microparámetros utilizados en las simulaciones. ....	76
Tabla 4-18. Valores UCS por resolución, set calibrado. ....	79
Tabla 4-19. Desviación estándar por resolución, set calibrado. ....	79
Tabla 4-20. Valor de Td por resolución, set calibrado. ....	82
Tabla 4-21. Desviación estándar por resolución, set calibrado. ....	82
Tabla 8-1. Ensayos UCS para distintos diámetros de probeta, set calibrado.....	96
Tabla 8-2. Ensayos UCS para distintos diámetros de probeta, set default .....	96
Tabla 8-3. Ensayos UCS para distintos diámetros de probeta, set 3. ....	97
Tabla 8-4. Ensayos UCS para distintos diámetros de probeta, set 4. ....	97

# 1 INTRODUCCIÓN

## Motivación y Objetivos

El software que permite crear y testear muestras sintéticas de rocas para el modelamiento de macizos rocosos es el software *Synthetic Rock Mass laboratory (SRMlab)*. Este software responde, previa calibración, a las macro-propiedades de la roca estudiada. Los componentes del método SRM corresponden a:

1. *Bonded Particle Model*, desarrollado por Potyondy y Cundall (2004) para simular la deformación y fractura frágil de roca intacta.
2. *Discrete fracture network*, utilizado para representar estructuras in situ del macizo rocoso.
3. *Smooth Joint contact Model*, desarrollado por Mas Ivars (2008) y Potyondy (2010). Esta técnica permite el deslizamiento de partículas a lo largo de un plano previamente definido.

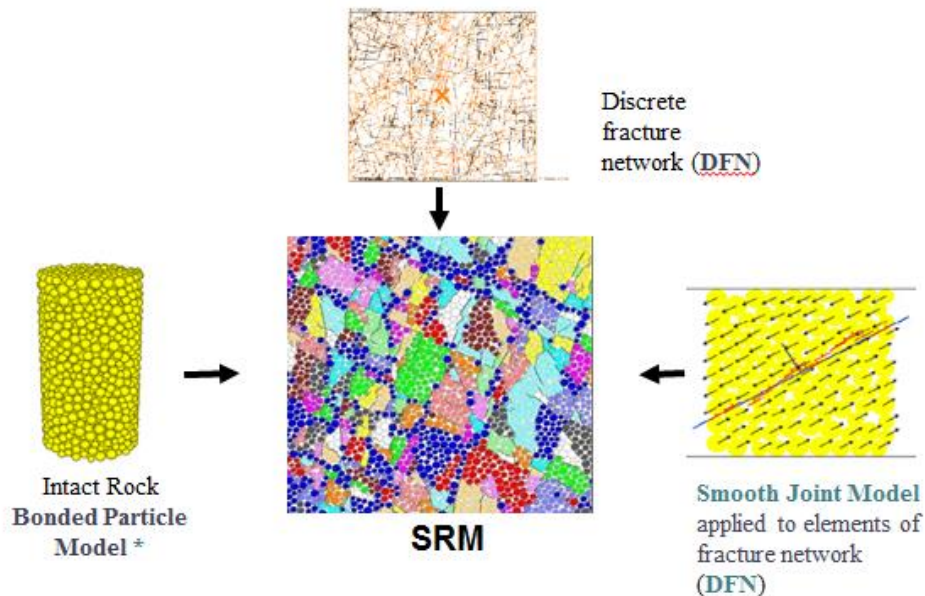


Figura 1-1. Componentes de *SRMlab* que forma parte de la muestra sintética, (Mas Ivars 2010).

Los ensayos disponibles en *SRMlab* corresponden a los siguientes: (i) tracción directa, (ii) UCS, (iii) triaxial convencional, (iii) corte directo y (iv) triaxial desconfinado. Los ensayos (i), (ii) y (iii) son utilizados en el desarrollo del presente informe.

La representación de distintas litologías se realiza a través de la calibración de microparámetros que definen al modelo, con el objetivo de representar los macroparámetros de la roca (UCS, Td, Poisson, etc.). La resistencia UCS de cada bloque dependerá únicamente de los microparámetros que definan al bloque, no

así, del volumen que este tenga, por lo que existirán bloques de una misma litología, con volúmenes distintos entre sí, que presenten una resistencia a la compresión uniaxial idéntica, es decir, no existe efecto escala. Luego la resistencia global del bloque ensayado corresponderá al promedio de los UCS de cada bloque que compone el macizo, sobre estimando la resistencia de bloques mayor tamaño y subestimando la resistencia a bloques de un tamaño menor.

La presente memoria tiene por objetivos:

#### General

- Desarrollar una metodología que permita evidenciar e incorporar el efecto de escala en modelos de elemento discretos basados en la mecánica de partículas

#### Específicos

- Realizar simulaciones en *PFC3D* para evidenciar la presencia del efecto de escala en muestras sintéticas de roca intacta.
- Desarrollar una metodología que permita mantener la porosidad y la resolución al cambiar la escala de las simulaciones.
- Comparar los datos y resultados, de efecto escala, con valores experimentales.

#### Alcances

Se utilizará el software PFC para simular y evidenciar el efecto escala al variar el diámetro de las probetas sintéticas de roca intacta. Se trabajará con el modelo incorporados en *PFC3D: Enhanced model*. No se considerará la opción de utilizar Clumps en el estudio, debido a que este utiliza BPM *enhanced* como base, se considera que es válido para ambos.

#### Metodología

El desarrollo del estudio del efecto escala se divide en las siguientes 3 etapas:

1. *Análisis de sensibilidad del modelo BPM*: En esta etapa del estudio se realizan simulaciones para determinar la relación entre los micro-parámetros del software y si influencia en los principales macro-parámetros de la muestra sintética.

$$\text{Macro - parámetro } (UCS, Td, E, v) = f(\text{param1}, \text{param2}, \dots, \text{param } n)$$

Para cumplir con este objetivo se realizan ensayos de compresión uniaxial, tracción directa y triaxial, utilizando diferentes valores de micro-parámetros y utilizando diferentes configuraciones de partículas en una muestra (número de semillas).

2. *Calibración de la muestra sintética*: El objetivo de esta etapa es replicar los macro-parámetros de la roca en estudio, Westerly Granite, en la muestra sintética. Para ello se utilizarán datos de laboratorio de ensayos triaxiales, tracción directa y UCS, se ajustará la envolvente de falla con el software *Rocklab* y se contrastarán las envolventes de PF3D y de la literatura.
3. *Evidencia e inducción de efecto escala*: Una vez calibrado el modelo se realiza una serie de ensayos UCS a diferentes tamaño con el objetivo de presenciar efecto escala. De no encontrar tal efecto se inducirá a través de dos mecanismos: (i) liberación de vínculos, (ii) modificación de micro-parámetros.

## **Contenidos de la memoria**

Los contenidos del presente trabajo se describen a continuación:

**Capítulo 1:** Motivo de la realización de la memoria, planteamiento de los objetivos que se deben cumplir y la metodología que se empleará.

**Capítulo 2:** Describe detalladamente los principales tópicos relacionado con el estudio de efecto escala, abarcando desde modelamiento numérico, principales métodos numéricos utilizados, hasta el detalle de los microparámetros que definen los modelos y trabajos previos relacionados. Este capítulo ofrece las herramientas para la debida comprensión del informe.

**Capítulo 3:** Se describe la metodología de las 3 etapas, mencionadas anteriormente. Se incluyen dos acápite en este punto, uno de ellos corresponde a cálculo de la velocidad de las placas que aplican esfuerzo en la muestra sintética (PSR), y el otro al cálculo de la resolución de partículas contenidas en la muestra.

**Capítulo 4:** Se realiza un análisis de los principales resultados obtenidos en las simulaciones realizadas.

Las conclusiones y recomendaciones se encuentran desarrolladas en los **Capítulos 5 y 6** respectivamente.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Modelamiento Numérico

El modelamiento numérico es una representación teórica que permite replicar fenómenos naturales para su comprensión y estudio de su comportamiento.

Algunos problemas de ingeniería se pueden representar utilizando un modelo adecuado que contenga un número infinito de componentes, esto requiere la utilización de elementos infinitesimales. Estos sistemas, denominados continuos, son representados a través de ecuaciones diferenciales y tienen infinitos grados de libertad. Otros tipos de problemas pueden estar representados por un número finito de componentes. Estos sistemas, llamados discretos, pueden ser determinados a través de interrelaciones bien definidas entre los componentes individuales.

En mecánica de roca existen diferentes aplicaciones de métodos numéricos, los cuales se pueden clasificar de acuerdo a:

#### *Métodos Continuos*

- Método de diferencias finitas (DFM)
- Método de elementos finitos (FEM)
- Método de elementos de borde (BEM)

#### *Métodos Discontinuos*

- Método de elementos discretos (DEM)
- Métodos de redes de fractura discreta (DFN)

#### *Modelos híbridos (continuo/discontinuo)*

- Híbrido FEM/BEM
- Híbrido DEM/DEM
- híbrido FEM/DEM
- Otros modelos híbridos

La revisión de estos métodos se puede encontrar en el artículo de Jing (2003).

Una diferencia importante entre los métodos discretos y continuos recae en el tratamiento de la compatibilidad de las condiciones de desplazamiento. En el caso continuo, se debe cumplir esta condición entre los elementos internos; caso distinto para elementos discontinuos, donde la compatibilidad de desplazamiento no es requerida entre los elementos, la cual es reemplazada por las condiciones de contacto entre bloques.



La elección entre el método continuo o discreto se basa principalmente en los problemas de escala y geometría de fractura. Jing (2003) ilustra distintas circunstancias de modo de fractura en un macizo rocoso, Figura 2-1. En este artículo se recomienda utilizar el método continuo para el caso (a) y (d), donde se presenta un macizo sin estructuras o con muchas fracturas. También es posible utilizar este método en macizos con un número bajo de estructuras, que no estén abiertas y que no exista total separación entre bloques, (b). El método discreto es más idóneo en el caso de un macizo con un número moderado de estructuras, (c).

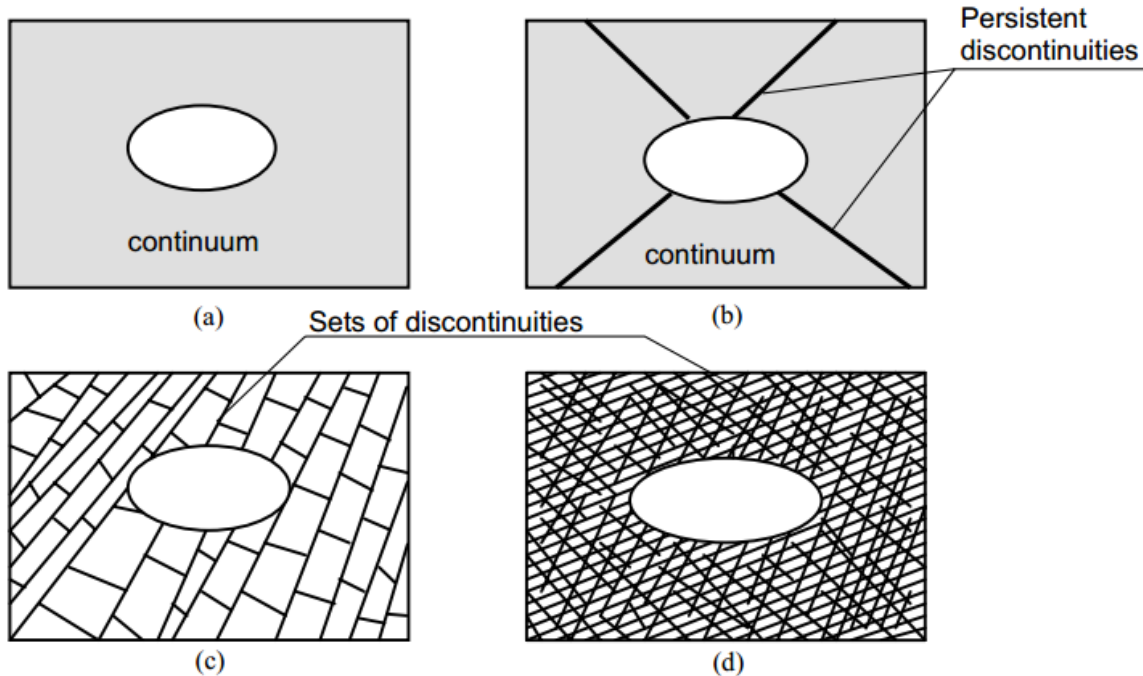


Figura 2-1. Circunstancias de falla de un macizo rocoso, Jing (2003).

## 2.2 Método de Elementos Discretos (DEM)

Corresponde a la capacidad de representar múltiples movimientos. Este método permite desplazamientos y rotaciones finitas de cuerpos discretos (esferas/discos), detectando y reconociendo, de manera completa, nuevos contactos a lo largo del ciclo de cálculo, (Cundall 1971). Esta técnica se encuentra implementada en el software *PFC2D* y *PFC3D*, la que en un comienzo se utilizó para problemas de mecánica de rocas, pero posteriormente se aplicó a suelos, (1979).

La esencia de este método se basa en la representación de medios fracturados a través de un arreglo de bloques formados por fracturas conectadas, resolviendo las ecuaciones de movimiento de cada bloque.

La interacción entre partículas se trata como un proceso dinámico con estados de equilibrio, estado que se logra cuando se obtiene un balance en las fuerzas

internas. Las partículas responden a la segunda ley de Newton y a la ley de fuerza-desplazamiento en cada cálculo.

### 2.3 Synthetic Rock Mass laboratory (*SRMLab*)

*SRMLab* es una herramienta que permite estudiar el efecto que produce las discontinuidades en un macizo rocoso de gran escala (10-100 m): Esta metodología utiliza como base al software *PFC3D*, el cual permite estudiar el modo de falla del macizo rocoso, su resistencia, deformación, comportamientos *post-peaks*, etc.

Los componentes del *SRMLab* corresponden a los siguientes:

1. Bonded Particle Model, desarrollado por Potyondy y Cundall (2004) para simular la deformación y fractura frágil de roca intacta.
2. Discrete fracture network, utilizado para representar estructuras in situ del macizo rocoso.
3. Smooth Joint contact Model, desarrollado por Mas Ivars (2008) y Potyondy (2010). Esta técnica permite el deslizamiento de partículas a lo largo de un plano definido.

#### 2.3.1 Bonded Particle Model

Este modelo simula el comportamiento mecánico de partículas esféricas (o discos) unidas a través del contacto entre ellas. La interacción entre partículas se produce solo en los contactos suaves, estos contactos poseen rigideces normales y de corte, (Potyondy and Cundall 2004).

Cada esfera puede ser unida con otra a través de un vínculo, llamado *parallel bond*. Este vínculo posee rigidez normal y de corte.

Se consideran deformables las partículas y los vínculos, La ruptura se produce a través del vínculo que los une. En la realidad las esferas simulan los granos de la roca y los vínculos el cemento.

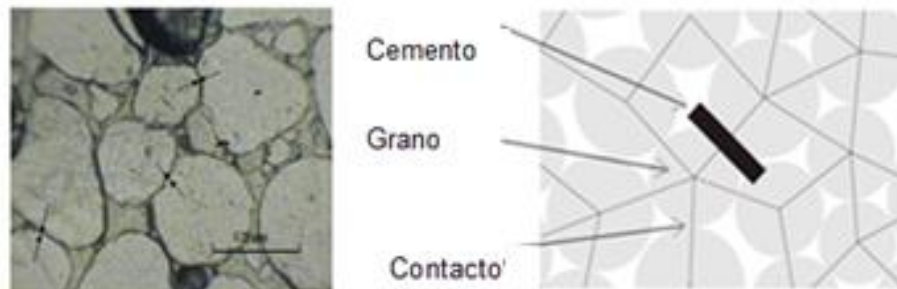


Figura 2-2. Elementos del modelo BP, (Potyondy and Cundall 2004).

Se debe tener en cuenta que el comportamiento de un modelo sintético se parece al de una roca, pero no es correcto asociar una partícula de PFC a un grano de roca. El arreglo de partículas con contactos es un modelo válido microestructuralmente, pero no debe confundirse con la estructura interna de la roca.

Existen 2 variaciones de BPM: (1) standard (Potyondy and Cundall 2004) y *Enhanced*, (Potyondy 2011). En BPM standard la aplicación de esfuerzo se distribuye en los contactos y en el cemento entre cada partícula; en cambio, la versión mejorada, *Enhanced*, distribuye los esfuerzos en el cemento, traspasando la carga a los contactos entre partículas solo cuando el cemento falla.

Las limitaciones del modelo standard corresponden a (Potyondy and Cundall 2004):

- No es capaz de reproducir ángulos de fricción de la roca intacta mayores a 30°.
- No reproduce razones entre UCS y resistencia a la tracción superiores a 4.1
- Reproduce una envolvente de falla lineal.

Los cambios realizados por la versión *Enhanced* son los siguientes:

1. Respecto al criterio utilizado para determinar los esfuerzos máximos de tracción y de corte se considera que el momento no contribuye ( $\bar{\beta} = 0$ ), es decir, se utilizan sólo las fuerzas normales y de corte:

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

2. Se utiliza el criterio de falla de Mohr-Coulomb (Figura 2-3), el cual considera que la resistencia al corte del PB es función de la cohesión ( $\bar{c}$ ) y del ángulo de fricción ( $\bar{\phi}$ ). En este caso se incluye la influencia del confinamiento en el criterio de falla por corte, ya que el criterio de falla del modelo estándar considera  $\bar{\phi} = 0$ , por lo que la resistencia al corte sólo queda definida por la cohesión.

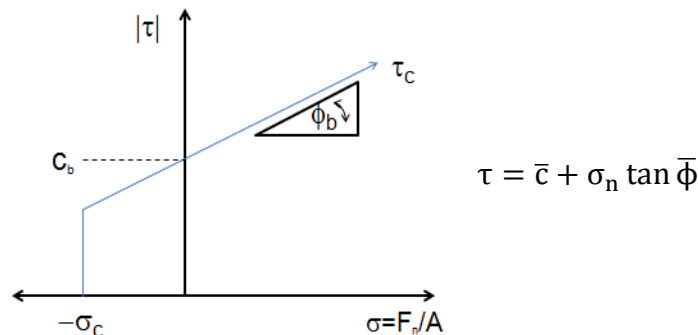


Figura 2-3: Envolvente de falla según el criterio de Mohr Coulomb, (Suzuki 2013)

3. Se determina un nuevo modo de transferencia de carga al fallar un PB. El modelo BPM estándar considera que la carga es repartida entre los contactos y el cemento, mientras que el *Enhanced* BPM considera que el cemento soporta toda la carga hasta fallar y luego la traspassa al contacto entre partículas.

### Contact Bond (CB)

Este tipo de contacto se produce entre partículas y se puede entender como pares de resortes que poseen rigideces normales y de corte. Las partículas pueden superponerse y rotar en su posición, debido a que este tipo de contacto no presenta una resistencia al momento, Ver Figura 2-4.

Entre partículas existe la fuerza de contacto  $F_i$ , (Potyondy and Cundall 2004), que representa la acción y reacción entre partículas. Esta interacción puede verse como un resorte, con una rigidez normal y otra de corte. Estas partículas tienen la capacidad de superponerse, al producirse esto, la zona de contacto se define en la zona central del volumen superpuesto ( $x_i^c$ ).

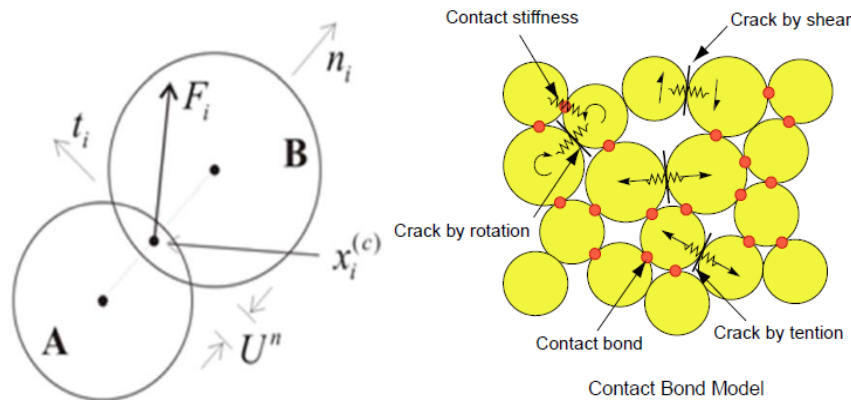


Figura 2-4. Contact bond

Se define  $F_i$  como:

$$F_i = F^n n_i + F^s t_i$$

Donde:

$F^n$ : Fuerza normal.

$F^s$ : Fuerza de corte.

$n_i, t_i$ : Vector unitario que define el plano de contacto.

La fuerza normal se define por:

$$F^n = K^n U^n$$

Donde:

$K^n$ : Contacto normal de rigidez.

$U^n$ : Superposición.

Por otro lado el contacto normal de rigidez está dado por:

$$K^n = \frac{k_n^A k_n^B}{k_n^A + k_n^B}$$

Con  $k_n^A$  y  $k_n^B$  rigidez normal de la partícula.

El otro componente de  $F_i$ ,  $F^s$ , se determina de manera incremental.  $F^s$  toma el valor de cero cuando el contacto se forma. En la siguiente secuencia se genera un incremento del desplazamiento de corte, esto produce un incremento en la fuerza elástica de corte,  $\Delta F^s$ .

$$\Delta F^s = -k^s \Delta U^s$$

Con:

$$k^s = \frac{k_s^A k_s^B}{k_s^A + k_s^B}$$

Donde  $k_s^A$  y  $k_s^B$  rigidez de corte de la partícula.

Respecto a las propiedades elásticas de las partículas, se define una rigidez normal y una de corte a partir del módulo de Young, diámetro y de la razón entre estas rigideces, (Potyondy and Cundall 2004):

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

Por otro lado las partículas también pueden fallar por tracción como por corte. La primera se produce por desconfinamiento, donde las partículas pierden el contacto; el segundo ocurre cuando las partículas giran, esto producto de que no existe resistencia al momento, (Potyondy and Cundall 2004).

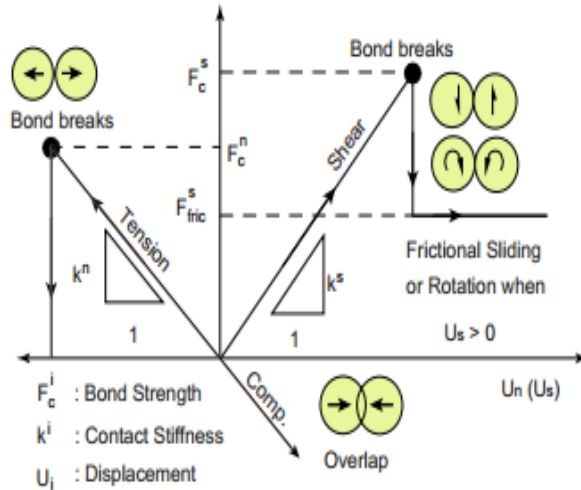


Figura 2-5. Tipos de fallas, (Cho et al. 2007)

Con respecto a la rotación de partículas, (Cho, Martin and Segoo 2007), se realizaron simulaciones de ensayo uniaxial para partículas con y sin rotación. Se evidenció que las partículas con rotación presenta un UCS de 329 [MPa]; en cambio para las velocidad de rotación igual a cero un UCS de 2846[MPa]. Fueron calibradas con el mismo set de microparámetros.

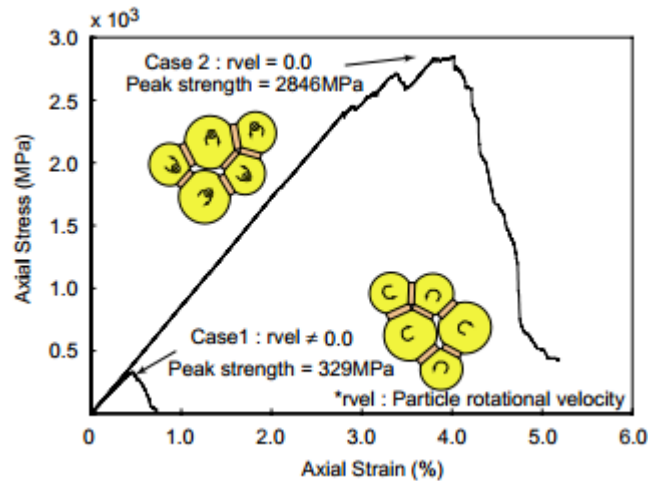


Figura 2-6. Efecto de la rotación de partículas, (Cho, Martin and Segoo 2007)

## Microparámetros

Se señala en estudios, (Potyondy and Cundall 2004), que los parámetros que definen el modelo BPM son:

Tabla 2-1. Micro-propiedades modelo BPM, partículas.

Símbolo Fish	Simbología	Descripción
ba_Ec	$E$	Módulo de deformación de las partículas [GPa].
ba_Krat	$k^n/k^s$	Razón entre la rigidez normal y la de corte de las partículas.
ba_rho	$\rho$	Densidad de las partículas [kg/m <sup>3</sup> ].
ba_fric	$\mu$	Coefficiente de fricción entre las partículas.
Dmin	$D$	Diámetro medio de las partículas, asumiendo una distribución uniforme [m].
mg_Rrat	$D_{max}/D_{min}$	Razón entre los diámetros máximo y mínimo de las partículas. Afecta al empaquetamiento de las partículas.

### Parallel Bond (PB)

Otro elemento que conforma este modelo es el cemento, el cual vincula a dos partículas [ $F_i$ ] asociado a un momento [ $M_i$ ]. Este mecanismo actúa en paralelo con el deslizamiento o CB, además evita la rotación entre partícula, presentándose como resistencia. Este modelo establece una relación elástica entre partículas que pueden deslizarse entre sí, considerando resortes uniformemente distribuidos sobre una región rectangular con cierta rigidez normal y de corte.

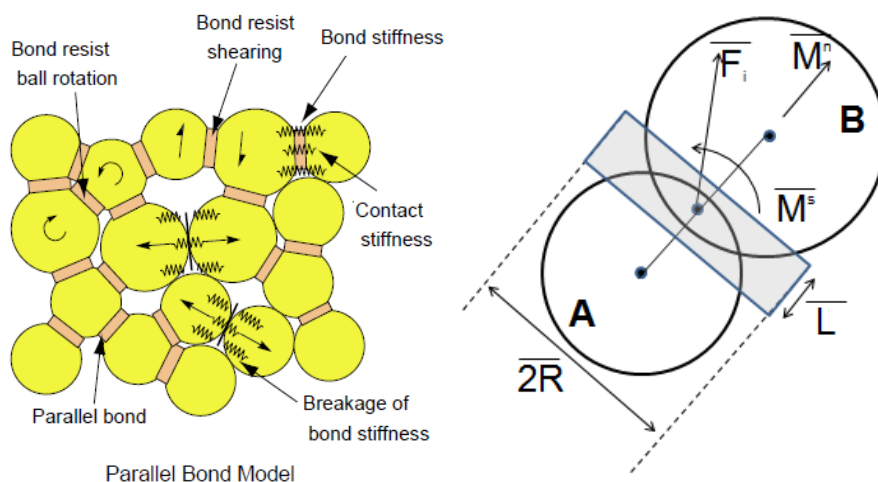


Figura 2-7. Vínculos BPM y momento de partículas

La rigidez del cemento normal y de cizalle se define como:

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

En el modelo *Enhanced* la razón  $\bar{k}^n$  y  $\bar{k}^s$  deben ser igual a uno, por otro lado, para operar en *PFC3D* el módulo de Young de las partículas,  $E_c$ , debe ser mayor que el módulo de Young del cemento,  $\bar{E}_c$ , para obtener un comportamiento frágil.

Los parámetros asociados al cemento dentro del modelo BPM *enhanced* son los siguientes:

### Microparámetros

Tabla 2-2. Micro-propiedades de los vínculos del modelo BPM.

Simbología	Descripción
$\bar{E}_c$	Módulo de deformación de los vínculos [GPa].
$\bar{k}^n / \bar{k}^s$	Razón entre la rigidez normal y la de corte de los vínculos.
$\bar{\sigma}_c$	Resistencia a la tracción [MPa]
$\bar{c}$	Cohesión [MPa]
$\bar{\beta}$	Modo de transferencia de carga.
$\bar{\lambda}$	Factor multiplicador del radio

### 2.3.2 Discrete Fracture Network (DFN)

Este componente permite el modelamiento de las estructuras presentes en el macizo rocoso, utilizando la información recolectada del elemento en estudio. Esta herramienta permite ubicar una estructura en cualquier punto del material sintético. El DFN se genera a partir de información obtenida en terreno como sondajes, túneles, líneas de detalle o ventanas de mapeo, ver Figura 2-8:

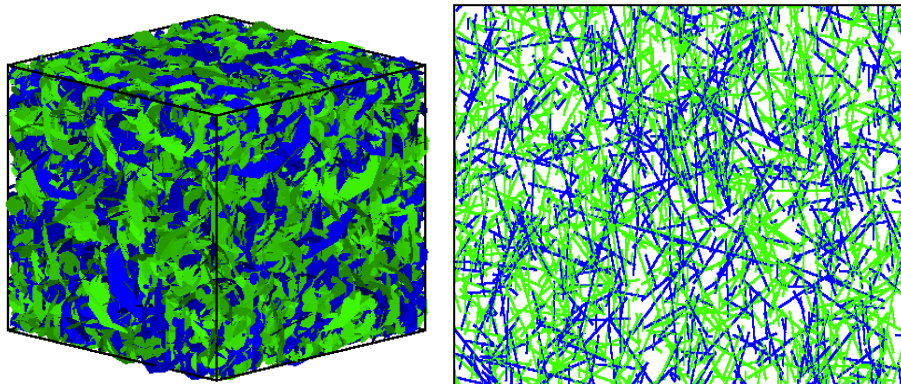


Figura 2-8. DFN's presentes en material sintético en 3D (izquierda) y 2D (derecha), (Suzuki 2013).



Para la construcción de un DFN estocásticos se necesita lo siguiente:

- Orientación y número de sets estructurales.
- Largo de las estructuras.
- Intensidad de fracturamiento.

### 2.3.3 Smooth Joint Contact Model

Los *smooth joints contacts* introduce, al arreglo de partículas, una superficie lisa en que la orientación y posición de las partículas no influyen en la aplicación de esta metodología. Como lo grafica la implementación de esta herramienta permite la superposición de los contactos y pasar por sobre el otro, sin necesidad de moverse alrededor.

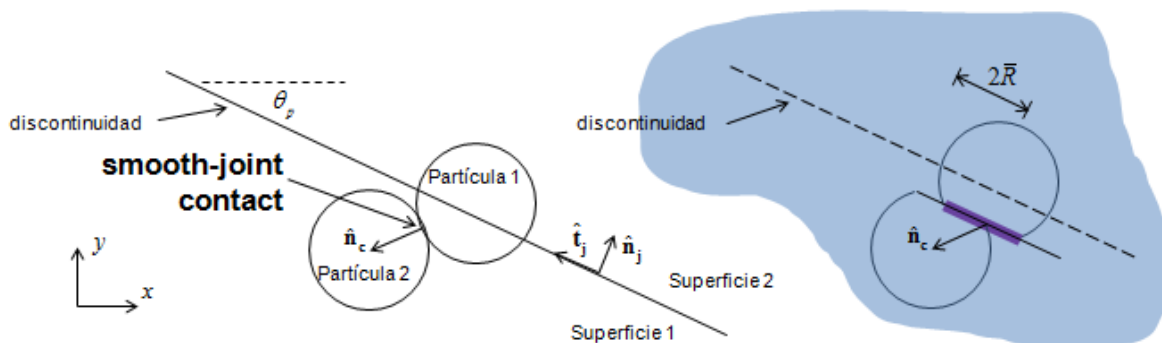


Figura 2-9. Smooth Joint Contact Model (Mas Ivars, Potyondy, Pierce and Cundall 2008).

### 2.4 Particle Flow Code (PFC3D)

*PFC3D* es una herramienta utilizada para el modelamiento de materiales granulares utilizando cuerpos rígidos y forma regular (circular 2D, esférica 3D). El modelamiento de rocas se realiza a través de un arreglo de partículas esféricas de diámetros variables que se mantienen en contacto. Este modelo está compuesto por partículas distintas que se desplazan de manera independiente unas de otras, interactuando solo en los puntos de contactos o en interfaces entre partículas. En los contactos de cada partícula existen las componentes normal y de corte, como también fricción.

Los principales supuestos en *PFC3D* son los siguientes:

1. Partículas consideradas como cuerpos rígidos.
2. Contacto entre partículas ocurren en áreas extremadamente pequeñas (contacto puntual).
3. Comportamiento en los contactos se definen por un contacto suave (soft-contact), lo que permite el traslape de partículas en el punto de contacto.

4. La magnitud del traslape está relacionada con la fuerza de contacto, a través de la ley de fuerza-desplazamiento, y los traslapes son pequeños en relación al tamaño de partícula.
5. Vínculos pueden existir entre contacto de partículas.
6. Todas las partículas son esféricas.

El ciclo de cálculo en *PFC3D* se basa en un algoritmo paso a paso en el cual se aplica, repetitivamente, la ley de movimiento de cada partícula, ley de fuerza de desplazamiento en cada contacto y la posición de las paredes, ver Figura 2-10.

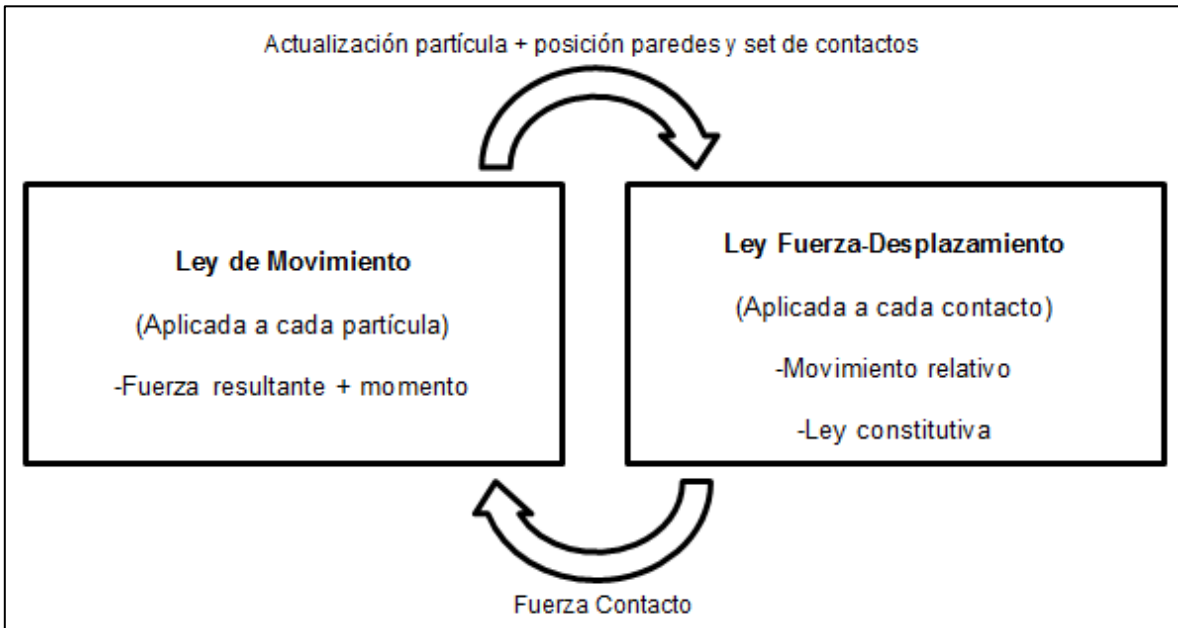


Figura 2-10. Ciclo de cálculo en *PFC3D*, *Manual Usuario PFC3D*.

### 2.4.1 Resolución

Corresponde al número de partículas contenidas en el diámetro de la probeta simulada. Se utiliza con el objetivo de cuantificar el número de partículas presentes en la muestra. En la Figura 2-11 y Figura 2-12 se observan dos probetas, del mismo tamaño y con distintas resoluciones:

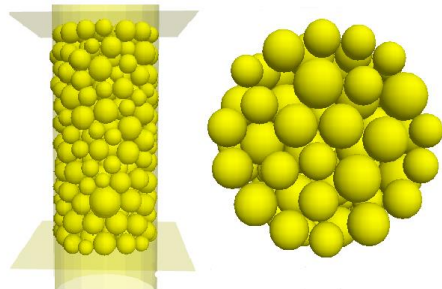


Figura 2-11. Resolución de 7 partículas. Diámetro probeta 50 [mm], altura 100 [mm]

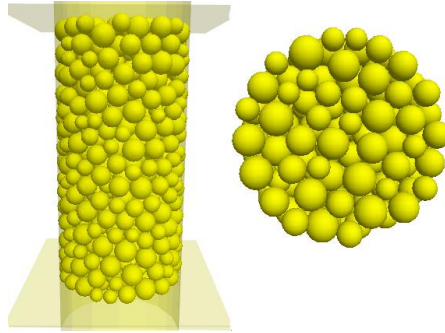


Figura 2-12. Resolución de 9 partículas. Diámetro probeta 50 [mm], altura 100 [mm]

La resolución es determinada por el diámetro de la probeta, el radio mínimo de partículas y la relación entre radio máximo y mínimo. El diámetro de las partículas satisface una distribución uniforme dentro de los rangos  $[D_{min}, D_{max}]$ , (Potyondy and Cundall 2004). Para determinar  $R_{min}$  se ingresa el diámetro promedio de las partículas que satisfacen la resolución requerida. En la Ecuación 2-1 se detallan las expresiones utilizadas:

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

#### Ecuación 2-1. Determinación de Radio Mínimo y Máximo de Partículas

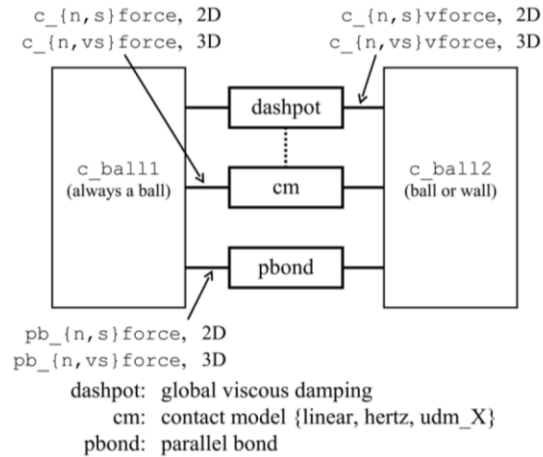
En *PFC3D* el *UCS* y módulo de Young incrementa a medida que la resolución aumenta, en cambio la resistencia a la tracción directa disminuye. La razón de Poisson no se ve afectada al variar el número de partículas contenidas en el diámetro, (Mas Ivars 2010).

*PFC3D* permite una resolución mínima de 5 partículas contenidas en el diámetro de la probeta; en cambio, no existe una resolución máxima de partículas. Un alto número de partículas genera un aumento en la duración de las simulaciones, pero permite representar de mejor manera la roca intacta en estudio. En el presente informe se recomienda trabajar con una resolución de 12 partículas, número que une velocidad de simulación y representación del material.

### 2.4.2 Modelo de contactos

El comportamiento de un determinado material simulado está asociado a la implementación de un modelo de contacto a cada contacto existente entre las partículas. La zona de contacto se compone de *parallel bond* (cemento) y *dashpot*

(amortiguadores). Estas componentes definen el comportamiento fuerza-desplazamiento. En la Figura 2-13 se detallan estos mecanismos:



**Figura 2-13. Componente de un Contacto, Manual Usuario PFC3D.**

PFC otorga los siguientes tipos de modelos de contactos: (i) Modelo estándar de contacto, (ii) Modelo *Hertz*. También se dispone de otros modelos alternativos como: (i) Modelo dúctil simple, (ii) Modelo *smooth joint*, (iii) Modelo *displacement-softening*, (iv) Modelo *Burger*, (v) Modelo *hysteretic-damping*.

## 2.5 Ensayos en PFC3D

En *PFC3D* es posible realizar ensayos de compresión, confinados y desconfiados, tracción directa y tracción indirecta brasileño. La aplicación de esfuerzo se puede realizar a través de placas (Wall Servo) o estrato de partículas (*Full Strain*), ver Figura 2-14. La principal diferencia entre estos dos sistema radica en que el *full strain* reduce los tiempos de simulación hasta diez veces en comparación al sistema de placas. Se observa que las curvas generadas por estos sistemas son similares, (Mas Ivars 2010).

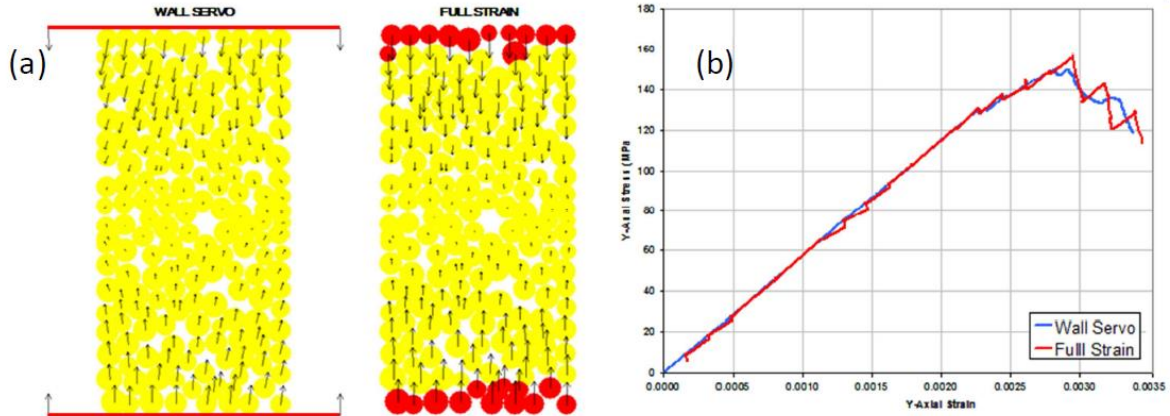


Figura 2-14. Esquema sistemas de aplicación de esfuerzos (a) y curvas esfuerzo deformación generadas (b) (Suzuki 2013)

Las mediciones de esfuerzo y deformación se realizan de tres formas diferentes. El primero corresponde a mediciones en base a las paredes presente en los ensayos. El segundo esquema de medición corresponde a esferas de medición, que están contenidas en el interior de las probetas. Por último, el tercer esquema se basa en el espécimen, utilizando partículas de medición (a nivel de esferas).

### 2.5.1 Final Platen Strain Rate (PSR)

Al igual que en ensayos de laboratorio, es necesario aplicar esfuerzo a una tasa de deformación adecuada con el fin de no sobrecargar la roca rápidamente. Al controlar este parámetro, en *PFC3D*, se evita generar efectos dinámicos en las simulaciones. Este parámetro solo se utiliza cuando los esfuerzo se aplican a través de placas.

La velocidad de las placas está determinada por la siguiente expresión:

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

Ecuación 2-2. Velocidad de placas.

Donde:

$v_p$ : Velocidad placas [mm/s].

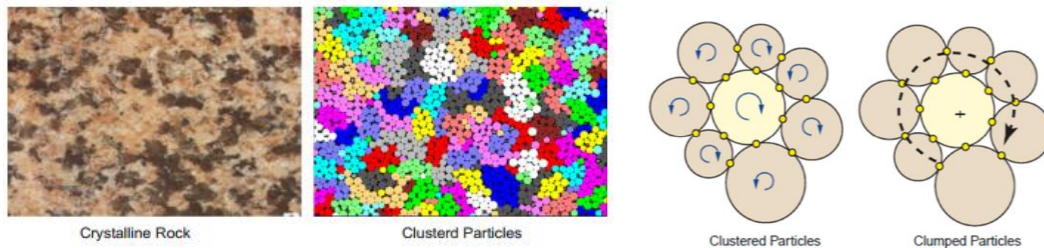
$\dot{\epsilon}$ : Tasa de aplicación de esfuerzo [1/s].

$L_0$ : Largo inicial probeta [mm].

Luego es necesario determinar la velocidad de placas,  $v_p$ , que no genera efecto dinámicos en la muestra, que estará determinado implícitamente por el diámetro ensayado en las simulaciones.

## 2.6 Clumps

Este modelo se define como conjunto de partículas pegadas que se comportan como un solo cuerpo rígido en un grupo. Estas partículas pueden traslaparse en cualquier grado, como un cuerpo deformable que no se romperá, sin importar las fuerzas que actúan sobre él, (Cho, Martin and Segó 2007). También pueden actuar como una sola partícula que tiene una forma irregular pero que se mueve como un cuerpo rígido, (Cho, Martin and Segó 2007). Los mecanismos de rotación pueden generar *clúster* o *clumps* de partículas, esta lógica permite generar granos irregulares que, aplicando diferentes propiedades, permite simular litologías distintas.



**Figura 2-15. Clúster de partículas para el modelamiento de granos irregulares en roca frágil, (Cho, Martin and Segó 2007).**

La diferencia principal que caracteriza este modelo corresponde la capacidad de rotación de las partículas. Los clúster pueden rotar entre sí a distintas velocidades, en cambio, un *clumps* no lo puede realizar, rotando como un conjunto.

La lógica *clumps* utiliza el máximo tamaño de un *clump* para representar un grano de roca, por lo que los autores consideran que es una limitante, (Cho, Martin and Segó 2007). Es por esto que se introduce el concepto de "*Clump Stamp*". Esta metodología introduce áreas circulares que encierran un número de partículas, permite un aumento en el número de partículas contenidas en un *clumps*. La Figura 2-16 detalla lo antes mencionado:

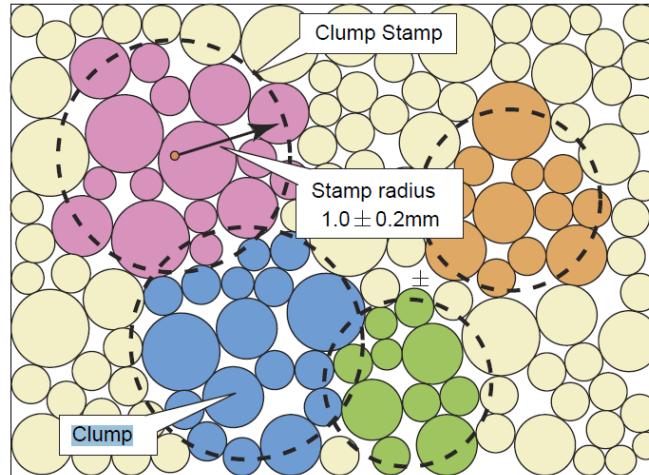


Figura 2-16. Lógica *Clump Stamp*, (Cho, Martin and Segó 2007)

Las geometrías generadas al implementar la lógica *clumps* se acercan a los granos presente en una roca intacta, por lo que las esferas por sí sola no representan adecuadamente la geometría de esta, afectando la dilatación y la fricción debido a la rugosidad, (Jensen and Al. 1999; Thomas and Bray 1999). Se ha corroborado que esta lógica aumenta el deslizamiento por fricción en el plano de corte, (Guo and Morgen 2004).

## 2.7 Efecto Escala

Este efecto está relacionado a la naturaleza discontinua de los macizos rocosos. Las propiedades y resistencias están ligadas directamente con las uniones y estructuras de origen geológico que estén presentes. Normalmente las muestras de laboratorio son mucho más pequeñas que los bloques de roca intacta en un macizo rocoso, no incluyendo muchas veces estructuras que afectan la resistencia de la muestra. Por esta razón, las propiedades de material intacto en una muestra de SRM deben reflejar la escala del bloque promedio y no las de una muestra.

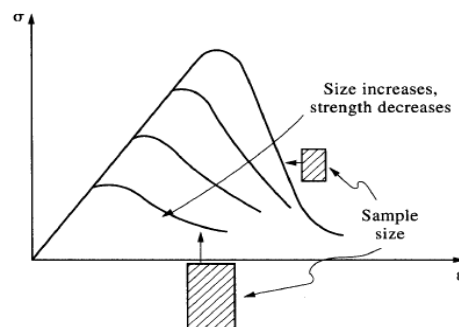


Figura 2-17. Curvas Esfuerzos vs Deformación, (Harrison and Hudson 1996).

La Figura 2-17 representa la disminución de la resistencia en probetas a medida que aumentan de tamaño, manteniendo la relación altura/diámetro constante, (Harrison and Hudson 1996). Anteriormente se desarrolló una relación empírica para escalar la resistencia no confinada en base a resultados de laboratorio, siendo ampliamente utilizada en minería, Hoek & Brown (1981):

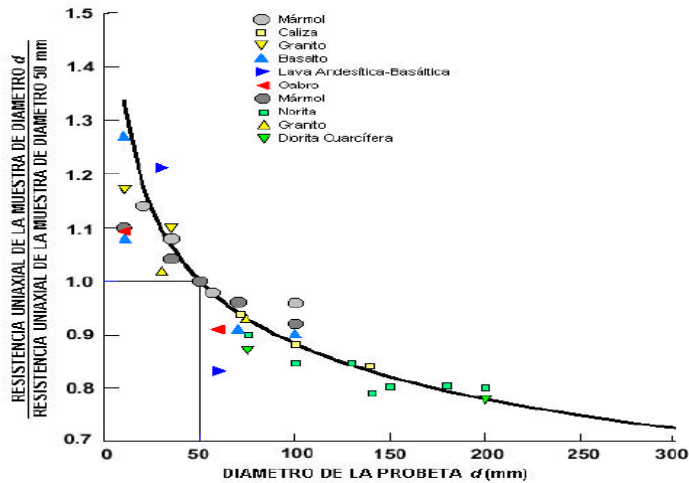


Figura 2-18. Efecto escala, Hoek & Brown (1981)

$$UCS = UCS_{50} \left( \frac{d}{d_{50}} \right)^{-0,18}$$

Ecuación 2-3. Curva escalamiento no confinado, Hoek & Brown (1981)

En donde  $\sigma_{c,50}$  corresponde a la resistencia a la compresión uniaxial de una probeta cilíndrica de diámetro 50 mm, y  $\sigma_c$  es la resistencia de una muestra de diámetro específico. Otros estudios, (Yoshinaka et al. 2008), proponen la siguiente relación:



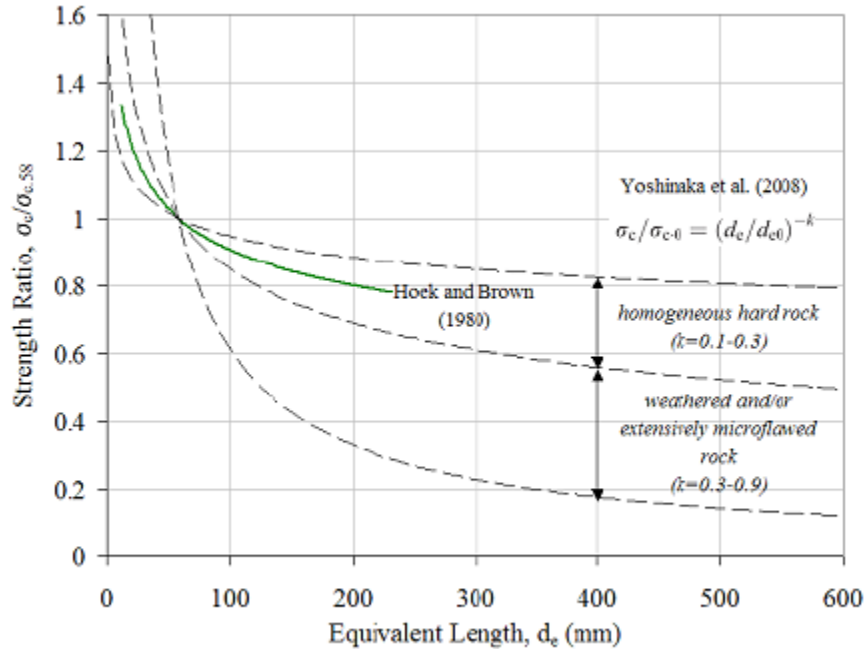


Figura 2-19. Curva de escalamiento no confinado, (Yoshinaka, Osada, Park, Sasaki and Sasaki 2008).

$$\frac{UCS(d)}{UCS(d_0)} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^{-k}$$

Ecuación 2-4. Efecto escala (Yoshinaka, Osada, Park, Sasaki and Sasaki 2008).

Con esta ecuación, se comparan resultados de ensayos de laboratorio y de terreno en un amplio rango de tipos de roca, resistencias, tamaños y formas de roca. De esto se obtuvo como resultado que el valor de  $k$  depende directamente de la presencia de micro defectos, teniendo un valor entre 0,1 y 0,3 para rocas homogéneas y entre 0,3 y 0,9 para rocas alteradas. La comparación con la relación de Hoek and Brown indica que esta última sólo sirve para estimar la resistencia de rocas homogéneas, sobreestimando los resultados en rocas muy fracturadas.

## 2.8 PFC y Efecto Escala

Se han realizado simulaciones en *PFC2D*, (Diederichs 1999), explorando la iniciación de grietas y acumulación en un material con una dimensión característica. En la Tabla 2-3 se detalla los datos utilizados en cada simulación:

Tabla 2-3. Información de Modelamiento PFC2D.

Sample	BS00	BS01	BS10*	BS02	BS03	BS04	BS05	BS06
	BA00	BSA1	BA10*	BSA2	BSA3	BSA4	BSA5	BSA6
Width	15	30	45	60	90	120	150	180
Height, mm	37.5	75	112.5	150	225	300	375	450
# of discs	73	276	608	1066	2373	4193	6527	9377
contact pairs	190	676	1436	2329	5782	9184	14309	20603

Utilizando las dimensiones de las probetas y el número de discos se determina la resolución utilizada en cada caso:

$$Resolución = \frac{D_{probeta}}{D_{particulas}}$$

**Ecuación 2-5. Determinación de la resolución de probetas.**

$$A_{probeta} = \pi r^2 * N_p$$

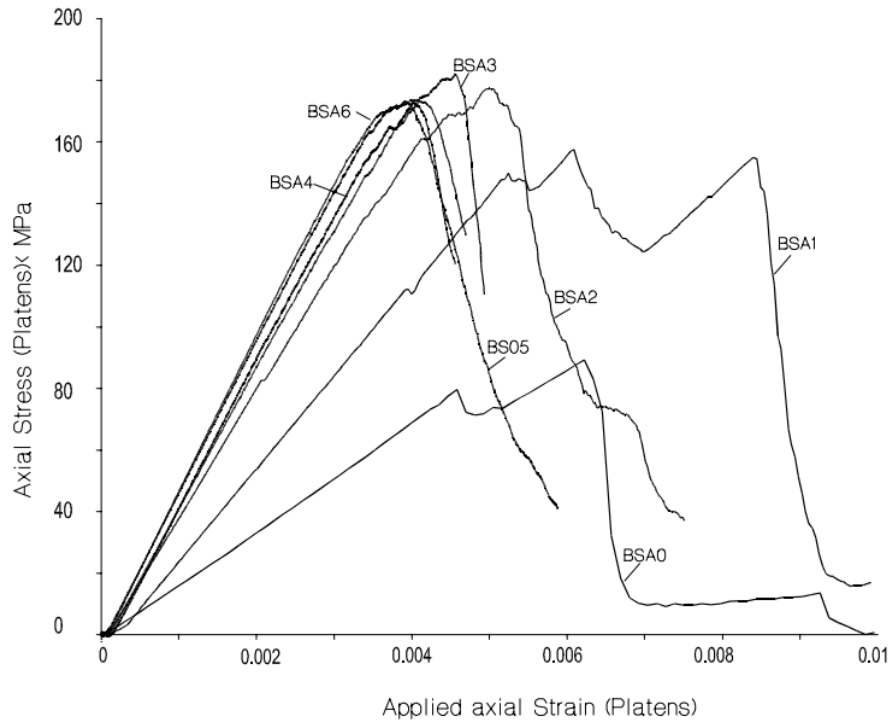
**Ecuación 2-6. Cálculo de área de probeta.**

Donde  $N_p$  corresponde al número de partículas (discos) en la probeta. Despejando  $r$  se determina el radio promedio de los discos, y luego se determina la resolución de cada simulación. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 2-4. Datos utilizados para el cálculo de la resolución**

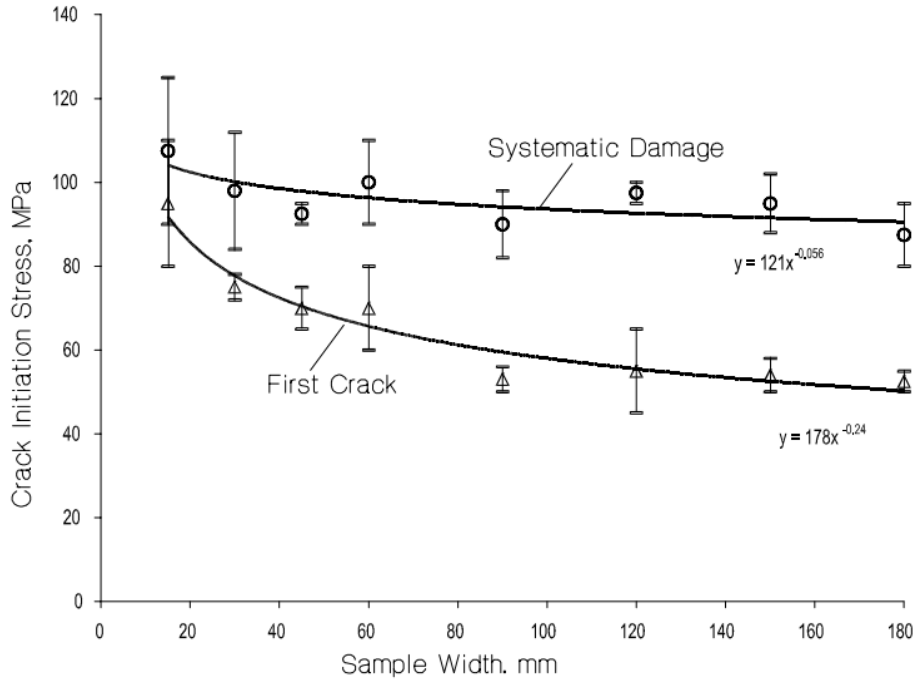
Parámetros/Simulación	1	2	3	4	5	6	7	8
Área probeta [mm <sup>2</sup> ]	562,5	2250	5062,5	9000	20250	36000	56250	81000
Radio promedio[mm]	1,57	1,61	1,63	1,64	1,65	1,65	1,66	1,66
Resolución	4,79	9,31	13,82	18,30	27,30	36,29	45,28	54,28

Generando las siguientes curvas de esfuerzo versus deformación:



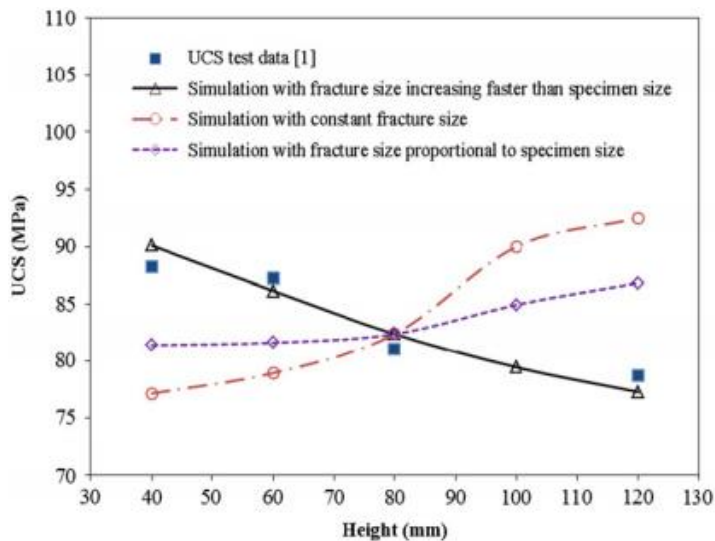
**Figura 2-20. Esfuerzo versus deformación para cada probeta de simulación(Diederichs 1999)**

Se evidencia en estas simulaciones que no existe presencia de efecto escala. Se observa que la muestra BSA0, la cual debiera presentar la mayor resistencia a la compresión, posee el menor UCS. Esto se debe al aumento de libertad de rotación y de traslación para partículas individuales dentro de un ensamblaje pequeño (Diederichs 1999). No se considera el efecto de la resolución en las muestras, parámetro que puede ayudar a disminuir la desviación estándar de los datos de iniciación de falla.



**Figura 2-21. Iniciación de falla vs ancho de muestra**

Zhang et al. (2011) realiza una extensa revisión de las expresiones que relacionan el UCS con el tamaño de la muestra, tanto para datos experimentales como de forma teórica, dando paso al estudio del efecto escala utilizando *PFC3D*. El autor realiza ensayos uniaxiales de compresión variando el tamaño de fractura de la probeta. Obtuvo los siguientes resultados:



**Figura 2-22. Simulaciones con variación de tamaño de fractura**

Es posible modelar el efecto escala aumentando el tamaño de fractura más rápido que el tamaño de probeta. Debido a que en la realidad, el efecto escala corresponde a la mayor probabilidad de existir estructuras que fallen a través de los granos o alrededor de ellos (contactos), se debe considerar en trabajos futuros inducir este efecto en los contactos que unen las esferas del *PFC3D* (cemento).

Se han realizado simulaciones en *PFC2D* utilizando datos de roca de un túnel de Äspö, Suecia, para generar un arreglo sintético con los microparámetros de diorita, (Koyama and Jing 2007):

Los parámetros utilizados son los siguientes:

**Tabla 2-5 Parámetros utilizados en simulaciones, (Koyama and Jing 2007).**

	Case I	Case II	Case III
Ball density (kg/cm <sup>3</sup> )	2670	2670	2670
Minimum ball radius, $R_{min}$ (mm)	0.35	0.35	0.35
Ball size ratio, $R_{max}/R_{min}$	1.5	2.0	3.0
Number of balls	8898	6179	3476
Ball-ball contact Young's modulus, $E_c$ (Gpa)	70	71	70
Ball stiffness ratio, $k_n/k_s$	4	4	4
Young's modulus of parallel bond, $\bar{E}_c$ (Gpa)	70	71	70
Parallel bond stiffness ratio, $\lambda$	4	4	4
Particle friction coefficient, $\mu$	0.5	0.5	0.5
Parallel bond normal strength, mean, $\bar{\sigma}_c$ (Mpa)	502	537	540
Parallel bond normal strength, std. dev, $\bar{\sigma}_c$ (Mpa)	0	0	0
Parallel bond shear strength, mean, $\bar{\tau}_c$ (Mpa)	125.5	134.25	135
Parallel bond shear strength, std. dev, $\bar{\tau}_c$ (Mpa)	0	0	0

Cabe destacar que los parámetros calibrados representan las macropropiedades de la roca en estudio (Módulo de Young, UCS, Poisson), pero no el comportamiento *post-peak* de la roca. Se observa que la razón de rigidez de las partículas y vínculos es 4, lo que implica que la roca tendrá un comportamiento dúctil, además no considera la desviación estándar para la componente de la fuerza normal y de corte.

Otro factor a considerar es la resolución utilizada. Se detalla en la Figura 2-23 la distribución de partículas utilizada, en la que no se observa una resolución constante al aumentar el tamaño de la probeta. Se considera que este factor influye en la desviación estándar para tamaños de probeta pequeños, Figura 2-24.

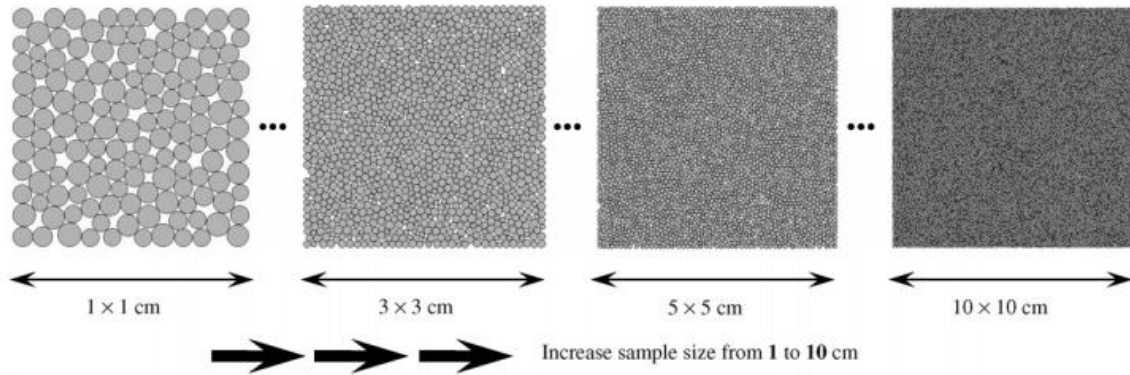


Figura 2-23. : Arreglo de partículas, (Koyama and Jing 2007).

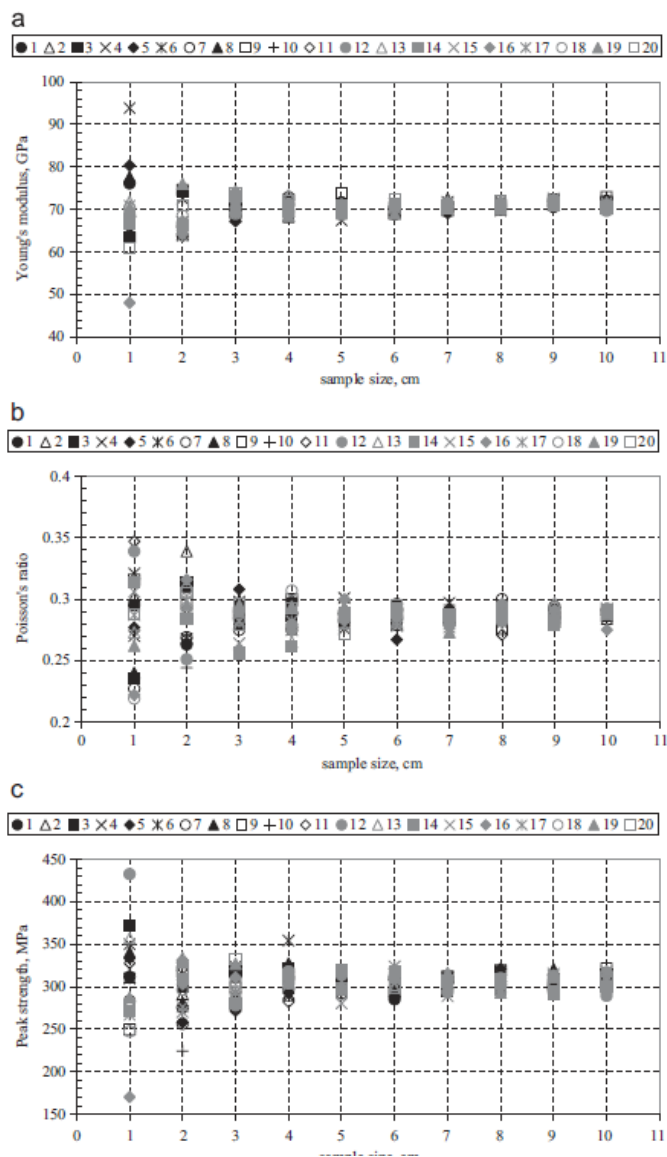
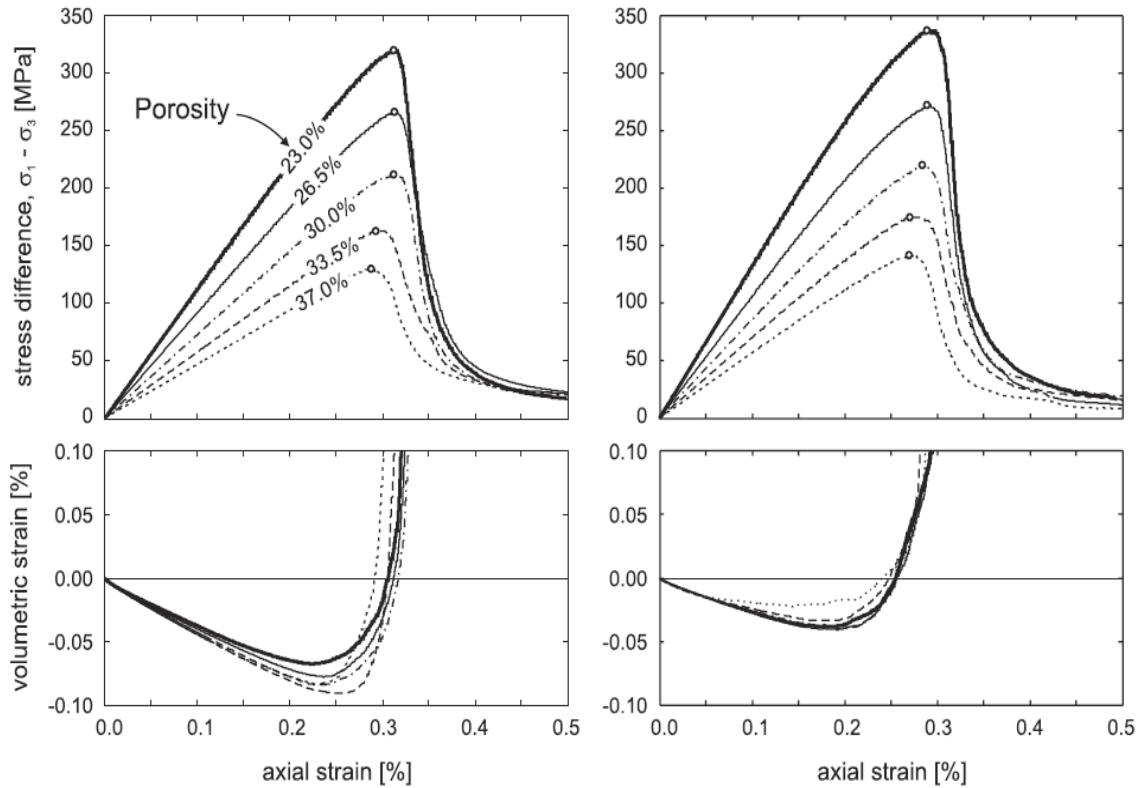


Figura 2-24. Macro-propiedades en simulaciones PFC, (Koyama and Jing 2007).

El cambio en la resolución en probetas produce una variación en la porosidad de la roca simulada. La Figura 2-25 exhibe el efecto de la porosidad en ensayos uniaxiales de compresión. Estos análisis, (Schöpfer et al. 2009), se hicieron con una distribución de partículas uniforme y *power-law*:



**Figura 2-25. Cambio en la porosidad en ensayos UCS. Izquierda distribución uniforme. Derecha distribución *power-law*, (Schöpfer, Abe, Childs and Walsh 2009).**

La respuesta de los ensayos uniaxiales de compresión simulados responde a los datos empíricos, esto para ambas distribuciones de partículas.

## 2.9 Liberación de Vínculos

Con respecto a la liberación de vínculos, Schöpfer (2009) incorporó porcentajes de partículas no unidas a ensayos de compresión uniaxial y de tracción directa, Figura 2-26:

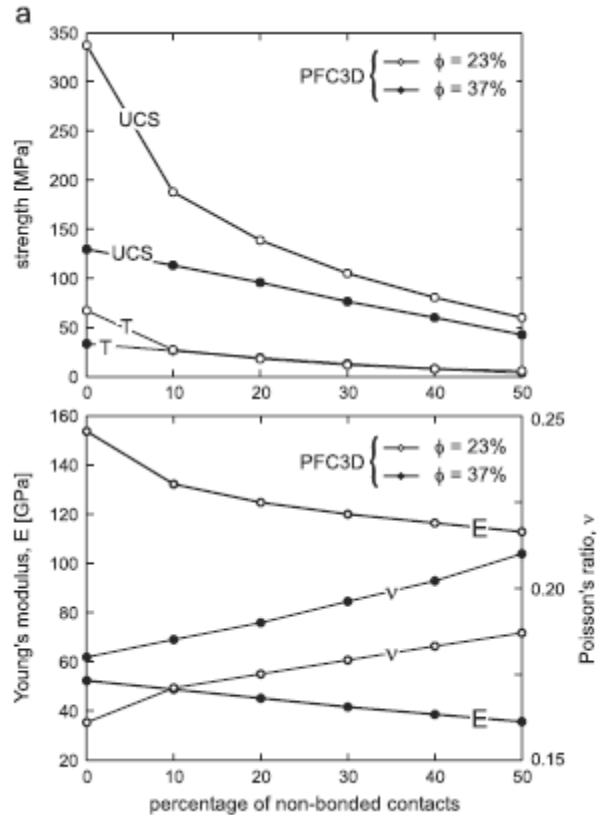


Figura 2-26. Respuesta en ensayos UCS, de tracción directa (a) y efecto en macro-propiedades (b), frente al porcentaje de vínculos liberados.

El aumento del porcentaje de contactos no unidos influye en las resistencias a la compresión uniaxial y a la tracción directa, obteniendo un aumento en la relación UCS/Td, y además, las macro-propiedades módulo de Young decrece frente al aumento de partículas desunidas, y la razón de Poisson disminuye. Se debe tener en cuenta que la porosidad también afecta a los parámetros antes mencionados.

## Discusiones y Conclusiones

La revisión bibliográfica realizada entrega los siguientes puntos:

- Gran avance ha generado la implementación de métodos numéricos y avances computacionales en el intento de replicar la mecánica de rocas. El refinamiento y post-utilización de esta técnica será de gran ayuda a la industria minera, disminuyendo los costos en ensayos de rocas y/o observar el comportamiento geomecánico de un bloque de roca.
- La técnica *BPM Standard* presenta limitaciones en la calibración de la roca a estudiar. El modelo *Enhanced* suple estas falencias, pero aún no incorpora el efecto escala en su código.



- Se ha intentado implementar efecto escala en *PFC3D* con metodologías que no se acercan a la física del fenómeno. Claro ejemplo de lo mencionado es lo implementado por Zhang (2011) con grietas que aumenta sus tamaños a medida que crece el espécimen.
- Pese a existir evidencia de liberación de vínculos por parte de Shopfer (2009), resulta extraño que no se haya implementado este criterio para inducir efecto escala en *PFC3D*.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 PSR

La aplicación de esfuerzos en ensayos uniaxial de laboratorio se debe realizar a una tasa tal que no se genere rupturas abruptas, es necesario replicar el mismo efecto en *PFC3D*. Para esto es necesario seguir el siguiente procedimiento:

Procedimiento:

1. Variar PSR en órdenes de magnitud con el objetivo de observar cambios en curvas de ensayos uniaxiales, Figura 3-1. Utilizar el mismo número de semilla en cada simulación para no incluir variabilidad al conjunto de simulaciones.

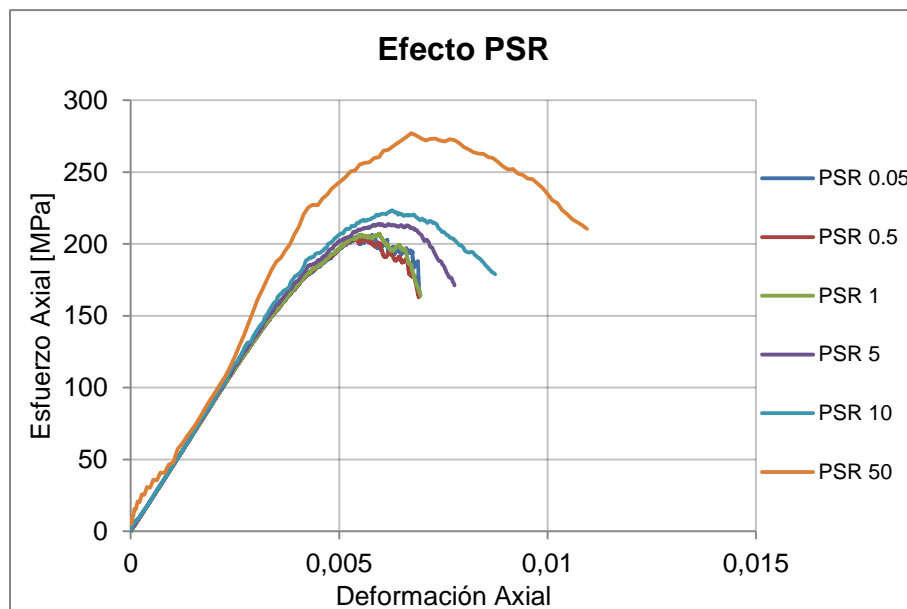


Figura 3-1. Efecto de PSR en ensayos de compresión uniaxial.

2. Observar y determinar el PSR máximo donde las curvas simuladas poseen un comportamiento y macro-propiedades similares, Figura 3-2.

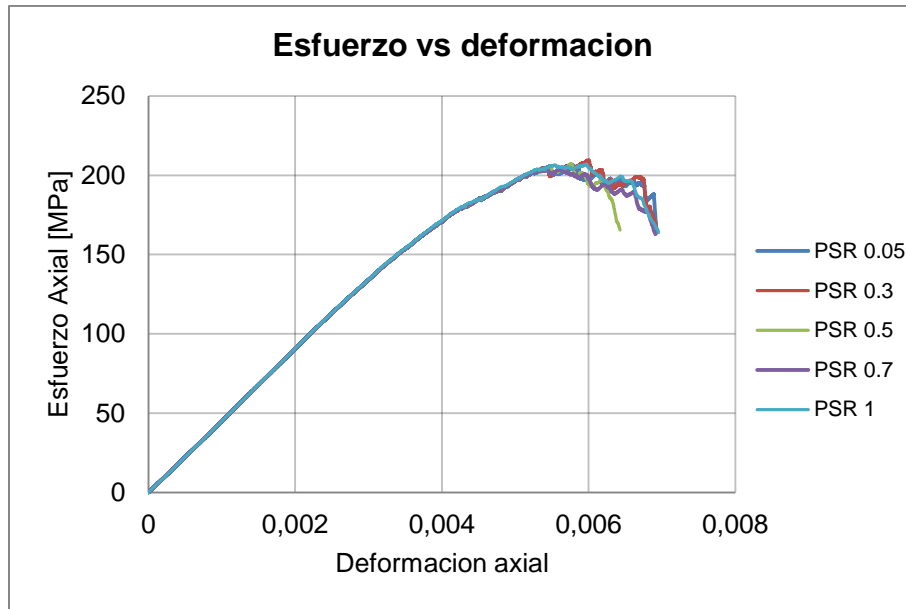


Figura 3-2. Efecto PSR en zona estable.

La principales diferencia de esta zona se resumen en la Tabla 3-1:

Tabla 3-1. Macro-parámetros para cada PSR utilizado.

PSR	UCS [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Razón de Poisson
0,05	206	47,49	0,048
0,3	210	47,49	0,048
0,5	207	47,49	0,048
0,7	204	47,46	0,048
1	207	47,44	0,048
Promedio	207	47,47	0,048
Desv Est.	1,8	0.02	0,0

Se determina que con PSR de 1 se cumple la condición requerida.

- Determinar los PSR, a distintos tamaños de probetas, que mantienen constante  $v_p$ . Para ello se utiliza la Ecuación 2-2, y como caso base una probeta de 50 [mm] de diámetro y 100 [mm] de altura. La Tabla 3-2 resume el cálculo realizado:

Tabla 3-2. Parámetros de caso base para el cálculo de PSR.

Parámetros base	Valores
Alto [mm]	100
Diámetro [mm]	50
PSR	1
Velocidad de placas [mm/s]	50

Para los siguientes diámetros se impone una velocidad de placas de 50 [mm/s] y se determina el PSR que satisface la condición, ver Tabla 3-3:

**Tabla 3-3. Valor de PSR que inducen la velocidad de placas necesarias.**

Diámetros de probeta [mm]	PSR
5	10,00
10	5,00
15	3,33
20	2,50
25	2,00
50	1,00
500	0,10
5000	0,01

Se considera que para valores menores a 50 [mm] se utilizará un PSR igual a 1, para asegurar la ausencia de efectos dinámicos.

4. Aplicar los resultados a simulaciones posteriores para presenciar efecto escala.

Consideraciones:

- Se utiliza un número de semilla e igual para todas las simulaciones realizadas.

### 3.2 Cálculo de resolución de partículas

Despejando la resolución de la Ecuación 3-1 y reemplazando en la Ecuación 2-1 se obtiene una expresión que determinar el radio mínimo necesario para satisfacer la resolución requerida, Ecuación 3-2

$$D_{promedio\ partículas} = \frac{D_{probeta}}{Resolución}$$

**Ecuación 3-1. Relación entre diámetro de partículas y resolución.**

$$R_{min} = \frac{\left(\frac{D_{probeta}}{Resolución}\right)}{1 + \frac{D_{max}}{D_{min}}}$$

**Ecuación 3-2. Determinación de radio mínimo con respecto a la resolución.**

Posteriormente se realizan ensayos de compresión uniaxial y/o tracción directa, con el mismo número de semillas, variando la resolución. El objetivo es observar y determinar la resolución mínima en que las curvas de esfuerzo-deformación y las macro-propiedades poseen un comportamiento y valor similar. Se recomienda realizar simulaciones con una resolución de 12 partículas (Itasca).

Para determinar la porosidad de la muestra sintética se utiliza el comando *et3\_poros* en la ventana de comando de *PFC3D*, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** El hecho de mantener la misma cantidad de partículas a diferentes diámetros de probeta implica que el valor de la porosidad se mantenga constante. Por lo tanto queda a criterio del usuario determinar la resolución a utilizar y su porosidad correspondiente.

### 3.3 Análisis de sensibilidad

Se utilizan parámetros por default, como base, para observar cómo influyen micro-parámetros en los valores UCS y de resistencia a la tracción. Para esto se considera lo siguiente:

- Número de semillas variables en todas las simulaciones realizadas, con el objetivo de agregar variabilidad al estudio.
- No se considera la relación  $Ba_{Ec}=1,5*Pb_{Ec}$ .
- La probeta posee las siguientes dimensiones:
  - Radio: 25 [mm]
  - Altura: 100 [mm]

Mismo análisis fue realizado por Suzuki (2013), estos resultados serán utilizados en el análisis con el objetivo de determinar si en *PFC3D* las macro-propiedades (UCS, módulo de Young, razón de Poisson) están determinadas por los mismos micro-parámetros del estudio.

La metodología utilizada es la siguiente:

1. Se realizan 150 simulaciones en *PFC3D* con distintos valores de micro-parámetros y número de semillas.
2. Una vez terminadas las simulaciones se exportan los valores del esfuerzo máximo de compresión uniaxial, Módulo de Young, razón de Poisson y resistencia a la tracción para cada caso.
3. Realizar tres gráficos por cada micro-parámetro analizado, donde se contrasten la macro-propiedad (UCS, módulo de Young, Razón de Poisson) con el micro-parámetro de interés, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Posteriormente se determinan los micro-parámetros que influyen en las macro-propiedades con el objetivo de encontrar la siguiente relación:

$$UCS = f(mP_1, mP_2, \dots, mP_n)$$

Donde  $mP_i$  corresponde a la micro-propiedad de interés.

### 3.4 Calibración

El modelamiento de roca intacta en *PFC3D* requiere de la calibración de microparámetros con el fin de replicar las macro-propiedades asociadas a la roca en estudio. Se recomienda seguir los siguientes pasos para la calibración de roca intacta, (Itasca).

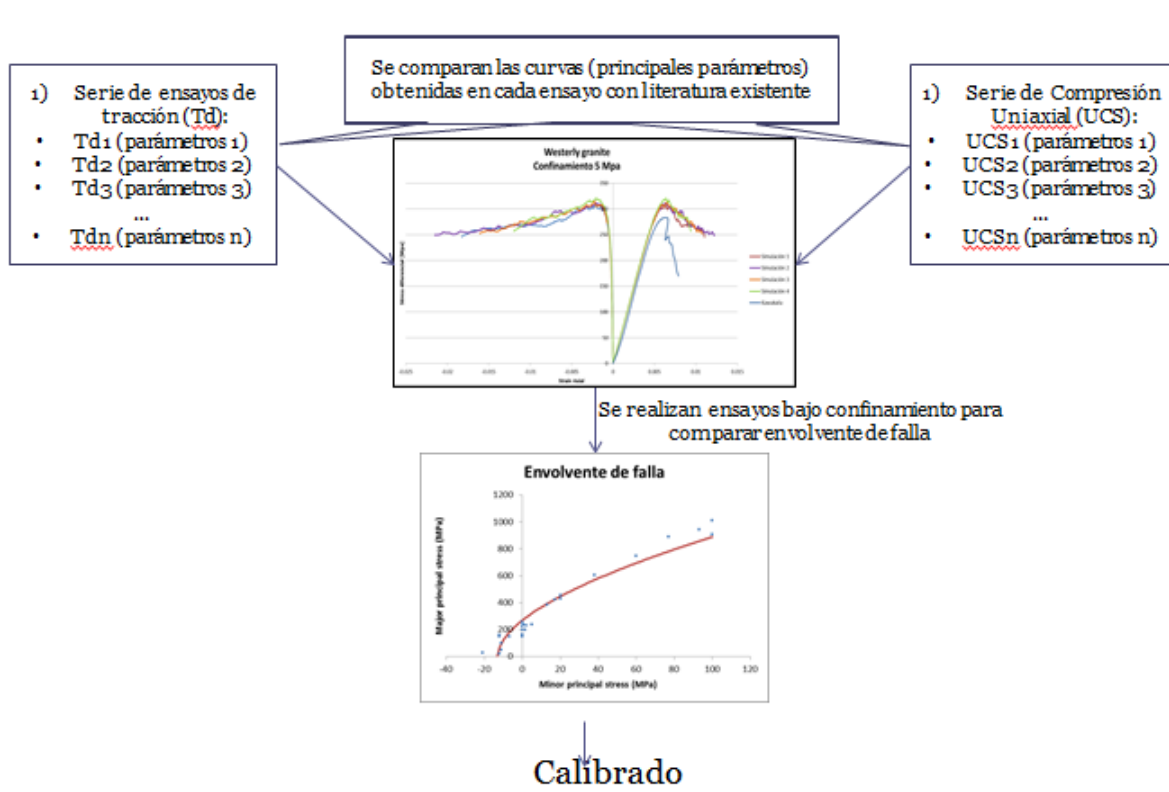


Figura 3-3. Diagrama de Calibración Modelo PFC3D.

1. Simular un ensayo de tracción directa para calibrar el valor del microparámetros  $\bar{\sigma}_c$  ajustando el valor de la resistencia a la tracción. Es recomendable considerar un valor para la desviación estándar igual al 20% del valor considerado.
2. Simular un ensayo de compresión uniaxial para calibrar los microparámetros  $E_b$  (módulo de elasticidad de partículas) y  $\bar{E}_c$  (módulo de elasticidad de los vínculos). De acuerdo a comunicación directa con Itasca, se recomienda considerar la siguiente relación entre ellos:

$$1,5 * \bar{E}_c = E_b$$

Adicionalmente, se realiza una calibración preliminar de los parámetros de la resistencia al corte de los contactos,  $c$  y  $\phi$  (comenzando con  $\phi = 0$ ) de manera de ajustar la resistencia a la compresión uniaxial de la probeta. Se recomienda utilizar un valor de la desviación estándar de  $c$  igual al 20% del valor considerado.

3. Simular ensayos de compresión triaxial a distintos confinamientos para obtener la envolvente de falla.
  - a. Si los principales parámetros de la envolvente de falla de PFC3D coincide con literatura, entonces la calibración habrá finalizado.
  - b. De lo contrario, volver al punto dos y aumentar  $\phi$ . Solo se deberían cambiar los valores que determinan la resistencia al corte, es decir,  $c$  y  $\phi$ , es decir, los valores de  $\sigma$ ,  $E$  y  $\bar{E}_C$  no deberían cambiar.

### 3.4.1 Roca a calibrar

Para este estudio se busca simular las macro-propiedades de la roca *Westerly Granite*. Las principales características se detallan en la Tabla 3-4:

**Tabla 3-4. Características macro de *westerly granite***

Macro-parámetros	Valores
Esfuerzo a la tracción [MPa]	13,3
Poisson	$0,35 \pm 0,03$
UCS [MPa]	272
Módulo de Young [GPa]	60,3

Además la calibración debe responder a la envolvente de falla de la roca estudiada. Para realizar esto se recopiló datos de ensayos triaxiales de diversos autores. Se realiza un filtro considerando datos que cumplieran la siguiente restricción  $\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} < 247 [Mpa]$ . Estos se muestran en la Tabla 3-5:

**Tabla 3-5. Datos Obtenidos de Literatura**

	Datos filtrados ( $p < 465$ )			
	sigma 1	sigma 2	sigma 3	p
Brace	229	0	0	76
	945	93	93	377
	30	-21	-21	-4
	151	-12	-12	42
	159	-12	-12	45
	239	5	5	83
Heard et al.	150	0	0	50
	165.4	0.1	0.1	55
	238.5	0.5	0.5	80
	456	20	20	165
	908	100	100	369
Johnson et al.	20	-12	-12	-1
	50	-11.1	-11.1	9
	100	-11	-11	26
	150	-6.8	-6.8	45
	200	1.6	1.6	68
B. Hamison	201	0	0	67
	231	2	2	78
	430	20	20	157
	605	38	38	227
	747	60	60	289
	889	77	77	348
	1012	100	100	404
Mogii	256	0	0	85
	385	13	13	137
	424	17	17	153
	520	26	26	191
	632	42	42	239
	758	58	58	291

Para el cálculo de la envolvente se falla se utiliza el software *RocLab* versión 1.031. Ajustando la curva de la Figura 3-4:



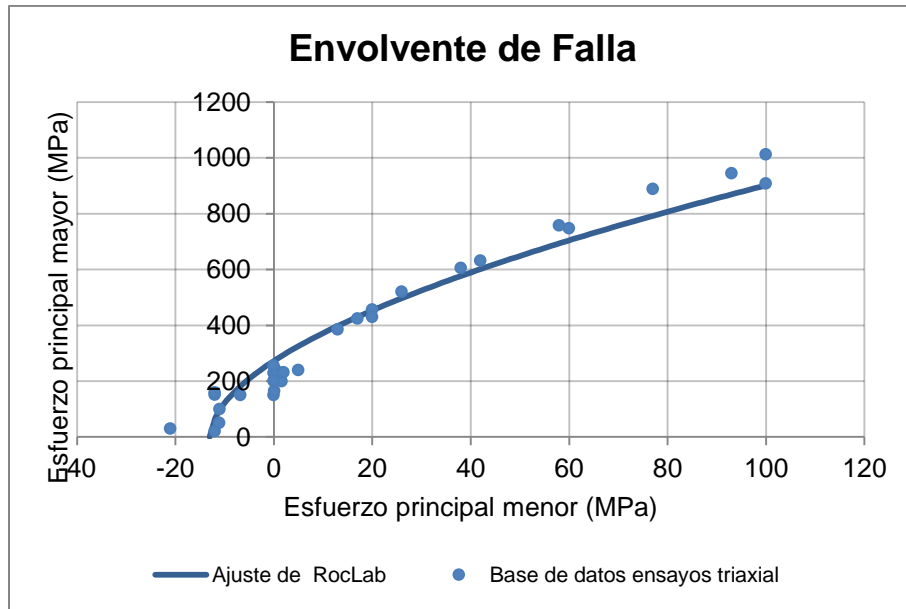


Figura 3-4. Envoltura de falla roca *Westerly Granite*.

Las curvas esfuerzo deformación generadas por el set de microparámetros son validadas con la base de datos de Hamison y Kawakata (Haimson and Chang 2000; Kawakata and Cho 1999). Las curvas utilizadas se muestran en la Figura 3-5:

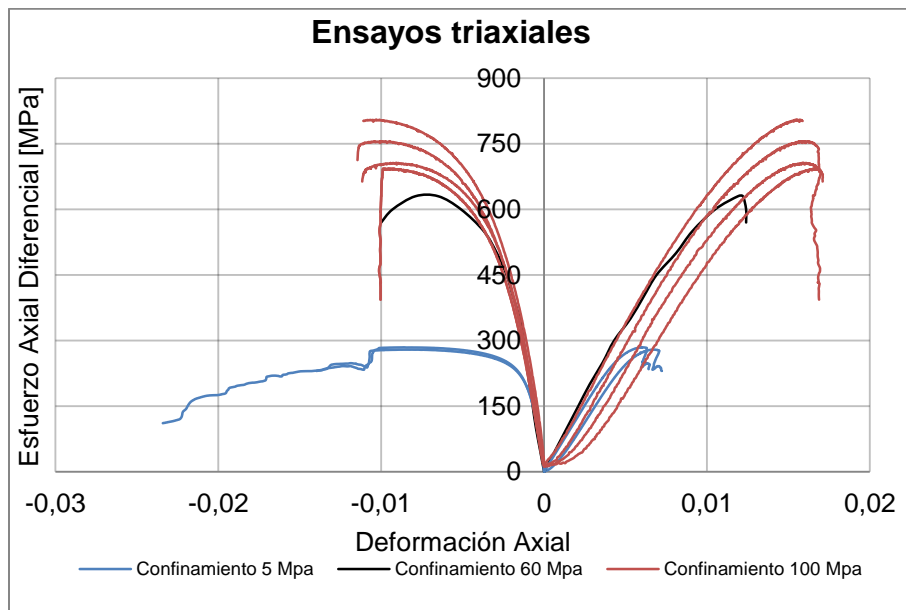


Figura 3-5. Curva esfuerzo-deformación de ensayos triaxiales, confinamiento de 5 y 100 [MPa] (Kawakata and Cho 1999). Confinamiento de 60 [MPa] (Haimson and Chang 2000).

### 3.5 Verificación de Efecto Escala en PFC3D

La metodología a utilizar para presenciar efecto escala se detalla a continuación:

1. Establecer los diámetros a ensayar: Los diámetros seleccionados corresponden a los siguientes:

Tabla 3-6. Diámetros utilizados para presenciar efecto escala.

Diámetro [mm]	5	10	15	20	25	50	500	5000
Diámetro equivalente [mm]	6	12	17	23	29	58	581	5812

2. Para cada diámetro de probeta, determinar el PSR que mantiene la velocidad de las placas constante.
3. Realizar 15 simulaciones por diámetro, con diferente número de semilla, con el objetivo de incorporar variabilidad al modelo.
4. Extraer los resultados de esfuerzo axial máximo, de los archivos generados por PFC3D, por cada diámetro ensayado.
5. Comparar los UCS de las simulaciones con la literatura relacionada. Se recomienda generar gráficos normalizados por el diámetro equivalente y el UCS de 50 [mm].

### 3.6 Inducción de Efecto Escala

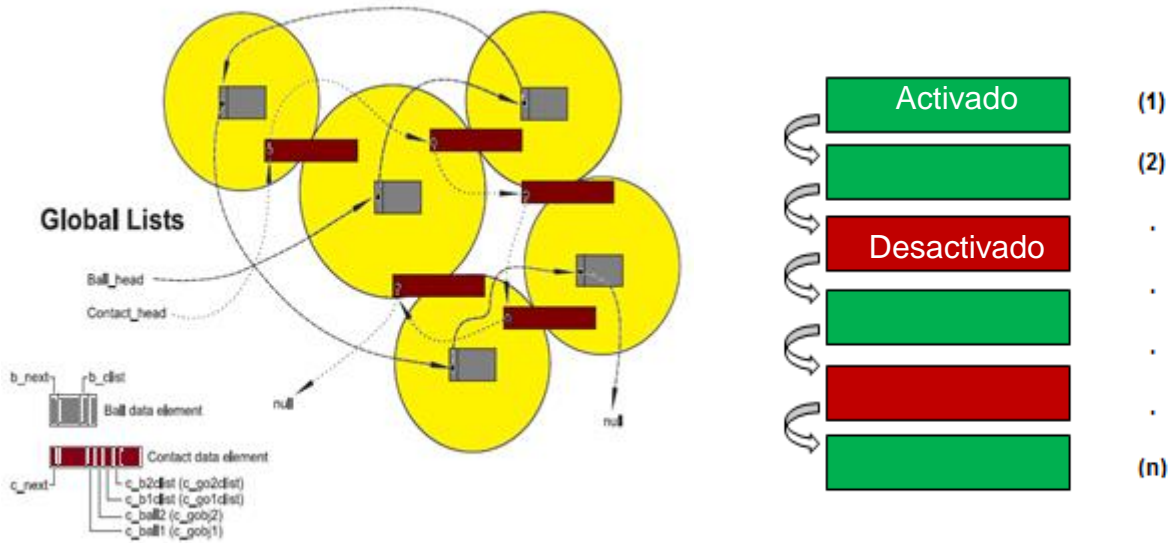
Debido a que las partículas se comportan como tal y no es posible dividirla en dos o más partes, se presume que no existirán microestructuras en el *software* que induzcan debilidad o aumente la probabilidad de falla al aumentar el diámetro de las probetas. Por esta razón se cree que no debe existir efecto escala y es necesario inducir efecto escala en PFC3D. Para ello se implementan las siguientes dos metodologías:

#### 3.6.1 Liberación de vínculos

El modelo *enhanced* proporciona partículas y vínculos para simular el comportamiento de roca intacta. La liberación parcial de vínculos no se encuentra inserta como función en los códigos del software, por lo que es necesario incluirlo.

Dentro de una serie de funciones presente en PFC3D se utiliza el archivo "*md.fis*". Este archivo contiene funciones genéricas utilizadas a lo largo de las simulaciones. Una de esas funciones es "*md\_pbond*", el cual se utiliza para definir si el vínculo presente en la muestra se encuentra activado

La Figura 3-6 (a) esquematiza los vínculos entre las partículas y como se recorre cada elemento (esferas/vínculos) dentro de un arreglo:



**Figura 3-6. (a) Esquema general entre los elementos del software PFC3D. (b) Recorrido de los vínculos, activando y desactivando su función.**

Para determinar si un vínculo se activa o se desactiva, se genera un número al azar [*Nazar*] entre 0 y 2, siguiendo una distribución uniforme. Luego se recorre cada vínculo, Figura 3-6 (b), introduciendo la siguiente condición: si  $\_Nazar \geq [0,1]$ , se activa y se pasa al siguiente vínculo, generando un arreglo de partículas con un porcentaje de vínculos desunidos.

Es necesario considerar que para ensayos de compresión uniaxial y tracción directa solo se puede desactivar hasta un 50% de vínculos, puesto que el arreglo no llega a equilibrio estático con un valor mayor. En cambio, para ensayos triaxiales se puede desactivar la totalidad de vínculos.

El objetivo es encontrar una función en la cual:

$$UCS_{d1} = f(de_1, de_{50}, UCS_{50}, \_Nazar)$$

Donde:

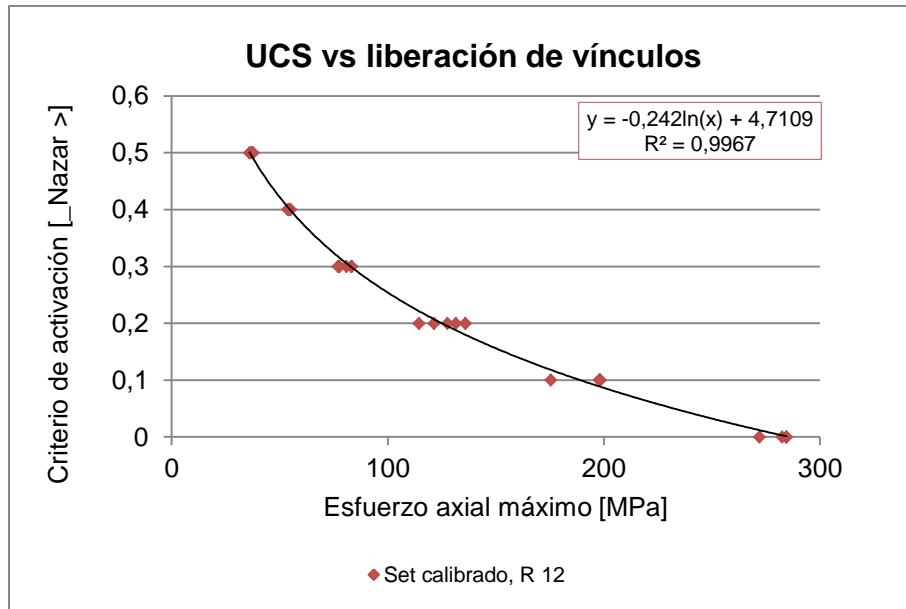
$de_1$ : Diámetro equivalente a ingresar, input.

$de_{50}$ : Diámetro equivalente probeta de 50 [mm].

$UCS_{50}$ : Resistencia a la compresión uniaxial máxima probeta 50 [mm].

$\_Nazar$ : Numero al azar entre 0 y 2.

Para ello se realizan 5 simulaciones de ensayos UCS, variando  $\_Nazar$  desde 0 a 0.5, para encontrar la relación entre el criterio de activación y UCS. Se realiza para el set de microparámetros determinados, utilizando una resolución de 12, ver Figura 3-7:



**Figura 3-7. Respuesta de UCS frente a la liberación de vínculos**

La ecuación de la curva ajustada relaciona los parámetros UCS-Nazar y permite relacionar los criterios de activación con los UCS que siguen la ley de escalamiento de Yoshinaka (2008), Ecuación 2-4. La independencia de esta metodología con el set de microparámetros es vital para la implementación al software *PFC3D*, de lo contrario, existirían tantas funciones  $UCS(de_1, de_{50}, UCS_{50}, _Nazar)$  como set de parámetros calibrados.

A pesar de utilizar una resolución determinada anteriormente, es importante observar si el cambio de esta genera diferencias en la metodología.

Procedimiento:

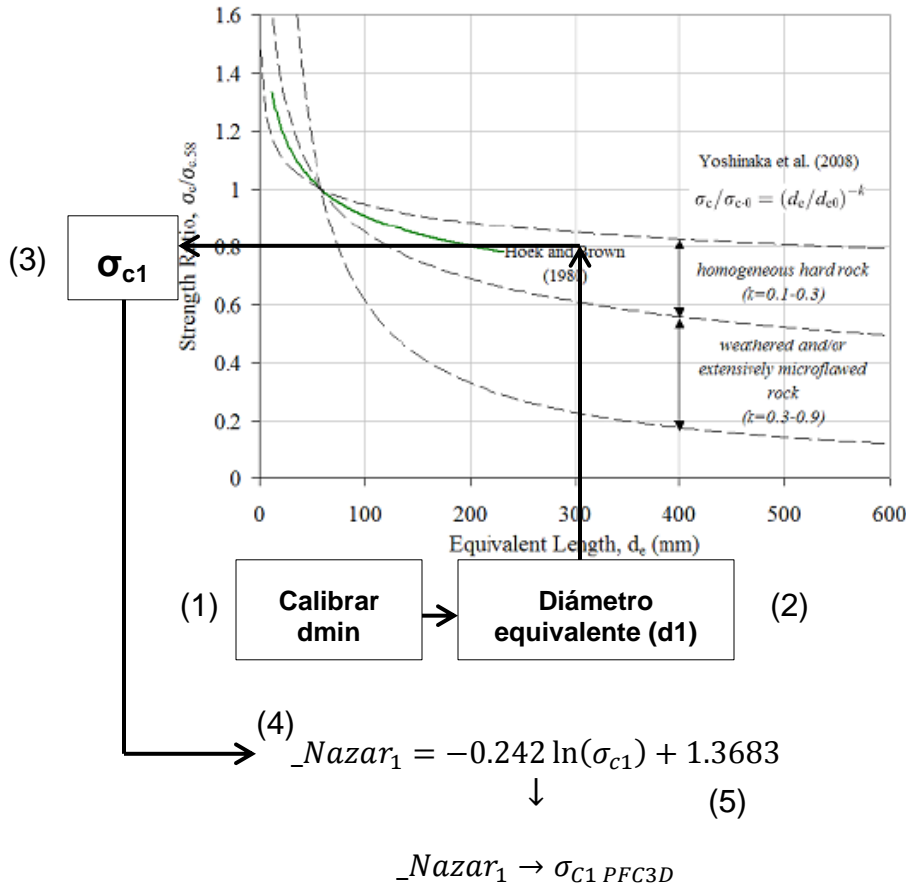


Figura 3-8. Metodología para implementar el efecto escala en *PFC3D*.

La Figura 3-8 esquematiza los pasos para la implementación de efecto escala, a través de la liberación de vínculos, en *PFC3D*. A continuación se detalla el procedimiento a utilizar:

1. Calibración de *PFC3D* para el mínimo tamaño de probeta, para ello se debe tener los macro-parámetros de la roca (módulo de Young, razón de Poisson, UCS, mi, etc.) de la literatura.
2. Se reconoce el diámetro equivalente de cada probeta ingresada ( $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , etc.) para simular ensayos UCS.
3. Se determina  $\sigma_{c1}$  a través de la relación de Yoshinaka (2008):

$$\frac{UCS}{UCS_{de_0}} = \left(\frac{de}{de_0}\right)^{-k} \quad (3)$$

4. Posteriormente se reemplaza  $\sigma_{c1}$  en la ecuación ajustada para obtener  $\_Nazar_1$ .

$$Nazar_1 = -0.242 \ln(\sigma_{c1}) + 1.3683 \text{ (Ecuación de referencia)}$$

5. Y por último, se utiliza este valor en *PFC3D* para liberar un porcentaje de vínculos en el arreglo.

### 3.6.2 Modificación de microparámetros

La modificación de microparámetros surge como respuesta a las posibles falencias que la liberación de vínculos puede generar. Esta metodología modifica los microparámetros de cohesión y resistencia a la tracción con el objetivo de disminuir la resistencias a la compresión uniaxial, siguiendo la ley de escalamiento de Hoek & Brown (1981). Para ello se modifica la función “*md\_pbprops*” contenida en el archivo “*md.fis*”. El detalle de esta metodología se muestra a continuación:

La realización de esta requiere relacionar los microparámetros del software con la resistencia a la compresión uniaxial. Para esto se utiliza las siguientes correlaciones:

$$UCS = 2,0 * (E_b^{0,10}) * (k_{rat}^{-0,15}) * (\bar{\sigma}_c^{0,43}) * (c^{0,65}) * (E_{pb}^{-0,16}) \text{ (a)}$$

$$T_d = -1,33 * \bar{\sigma}_c * \left( \frac{0,24 + 0,33/k_{rat}}{1 + 0,60/k_{rat}} \right) \text{ (b)}$$

**Ecuación 3-3. Correlación entre microparámetros y UCS, Td Suzuki (2013)**

Los parámetros que no influyen en la resistencia a la compresión uniaxial en *PFC3D* deben permanecer constantes.

Procedimiento:

Para emplear esta metodología se debe tener los macro-parámetros de resistencia objetivo a una escala determinada ( $UCS_{de_o}, Td_{de_o}, UCS_{de_o}/Td_{de_o} = cte$ ) para calibrar los microparámetros del software. Luego se tendrán la resistencia a la compresión uniaxial de *PFC3D* ( $UCS_{de_o}$ ), a la tracción directa ( $Td_{de_o}$ ) y diámetro equivalente ( $d_{e0} = \sqrt[3]{V_0}$ ).

Ahora se pretende estimar los microparámetros a otra escala. Dado un volumen,  $V_1$ , de la nueva muestra se calcula el diámetro equivalente:  $d_{e1} = \sqrt[3]{V_1}$

Utilizando la curva de Yoshinaka (2008):

$$\frac{UCS(d)}{UCS(d_o)} = \left(\frac{d}{d_o}\right)^{-k}$$

Se determina el  $UCS_{de1}$  para el nuevo volumen:

$$UCS_{(d)} = UCS_{d_o} \left(\frac{d}{d_o}\right)^{-k}$$

Pero:

$$UCS(d_o)/T_d(d_o) = UCS(d)/T_d(d) = cte = a$$

**Ecuación 3-4. Razón UCS/Td constante.**

Luego:

$$T_d(d) = UCS(d)/a = UCS(d_o) \left(\frac{d}{d_o}\right)^{-k} / a$$

**Ecuación 3-5. Determinación de la resistencia a la tracción directa.**

Este es la nueva resistencia a la tracción target. Una vez que queda fijo se procede estimar el micro-parámetro que permite reproducir esta resistencia a la tracción. Par esto se usa la Ecuación 3-3b y se estima  $\bar{\sigma}_{c1}$ .

Luego con  $UCS_{de1}$ ,  $\bar{\sigma}_{c1}$  y la Ecuación 3-3a se determina  $c_1$ . De esta manera se obtienen los nuevos microparámetros a escala  $d_{e1}$ . Con estos microparámetros se verifica las tendencias macro y se evalúa la variabilidad de los resultados estudiando el efecto de la resolución.

## 4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 4.1 Análisis de sensibilidad.

Con el objetivo de observar el efecto de los microparámetros en las simulaciones, se realiza un total de 150 simulaciones de ensayos de compresión uniaxial y de tracción, utilizando variados valores en micro-parámetros, se utiliza como base de dato adicional el análisis de sensibilidad realizado en SRMLab por Suzuki (2013). Los parámetros analizados se muestran en la Tabla 4-1:

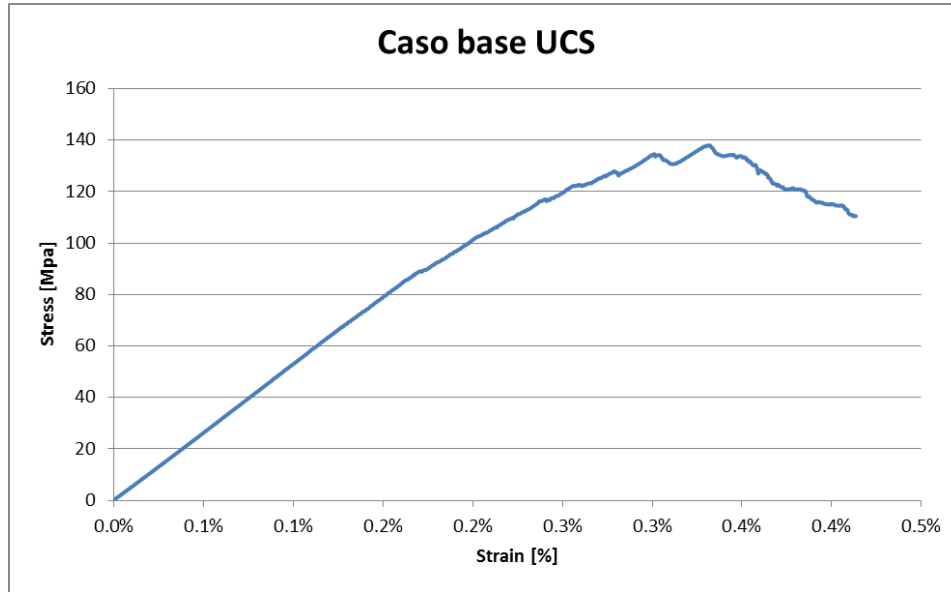
Tabla 4-1. Descripción de parámetros.

Símbolo FISH	Descripción	Valor por defecto	Unidad
*Propiedades generales			
mg_Rrat	Razón de radios [min,max]	1,66	NA
mg_ts0	Stress isotrópico objetivo	-0,1	MPa
Propiedades de las partículas			
ba_rho	Densidad	2630	kg/m <sup>3</sup>
ba_Ec	Módulo de Young	67	GPa
ba_Krat	Razón de rigidez	1,25	NA
ba_fric	Coefficiente de fricción	0,5	NA
Propiedades de los vínculos ( <i>parallel bond</i> )			
pb_Ec	Módulo de Young vínculos	67	GPa
pb_Krat	Razón de rigidez	1,25	NA
pb_sn_mean	Esfuerzo normal promedio	166	MPa
pb_sn_sdev	Desviación estándar esfuerzo normal	38	MPa
pb_coh_mean	Cohesión promedio	166	MPa
pb_coh_sdev	Desviación estándar Cohesión	38	MPa
pb_phi	Ángulo de fricción	0	°

\*propiedad que no se altera.

Con estos parámetros se genera la curva de compresión uniaxial del caso base, obteniéndose la Figura 4-1:





**Figura 4-1. UCS caso base modelo *Enhanced***

Obteniéndose los siguientes valores característicos de la roca intacta:

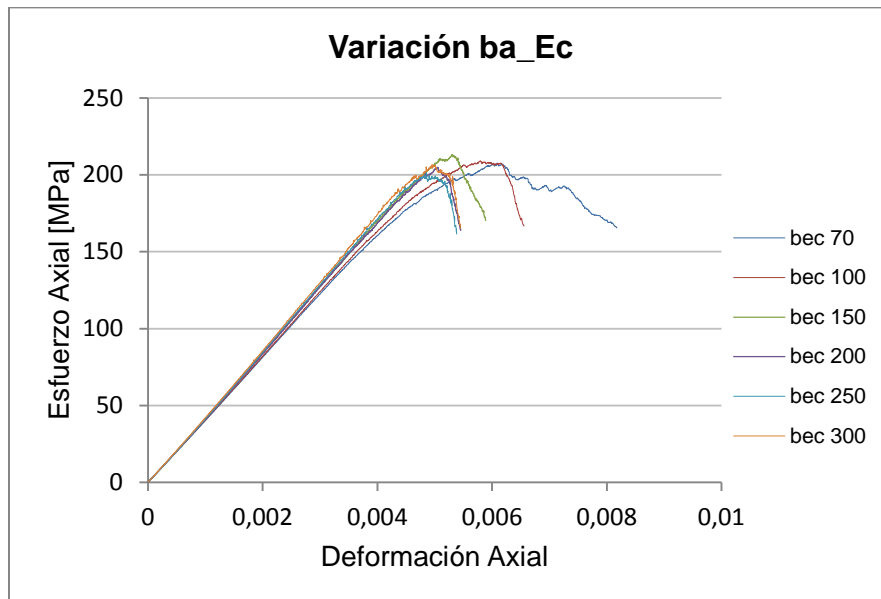
$$\sigma_{peak} = 138 \text{ [MPa]}$$

$$\text{Módulo de Young} = 52,38 \text{ [GPa]}$$

$$\text{Poisson} = 0,05$$

#### 4.1.1 Módulo de Young de partículas (ba\_Ec)

Los resultados del micro-parámetro ba\_Ec se detallan a continuación:



#### Figura 4-2. Variación de $ba_{Ec}$

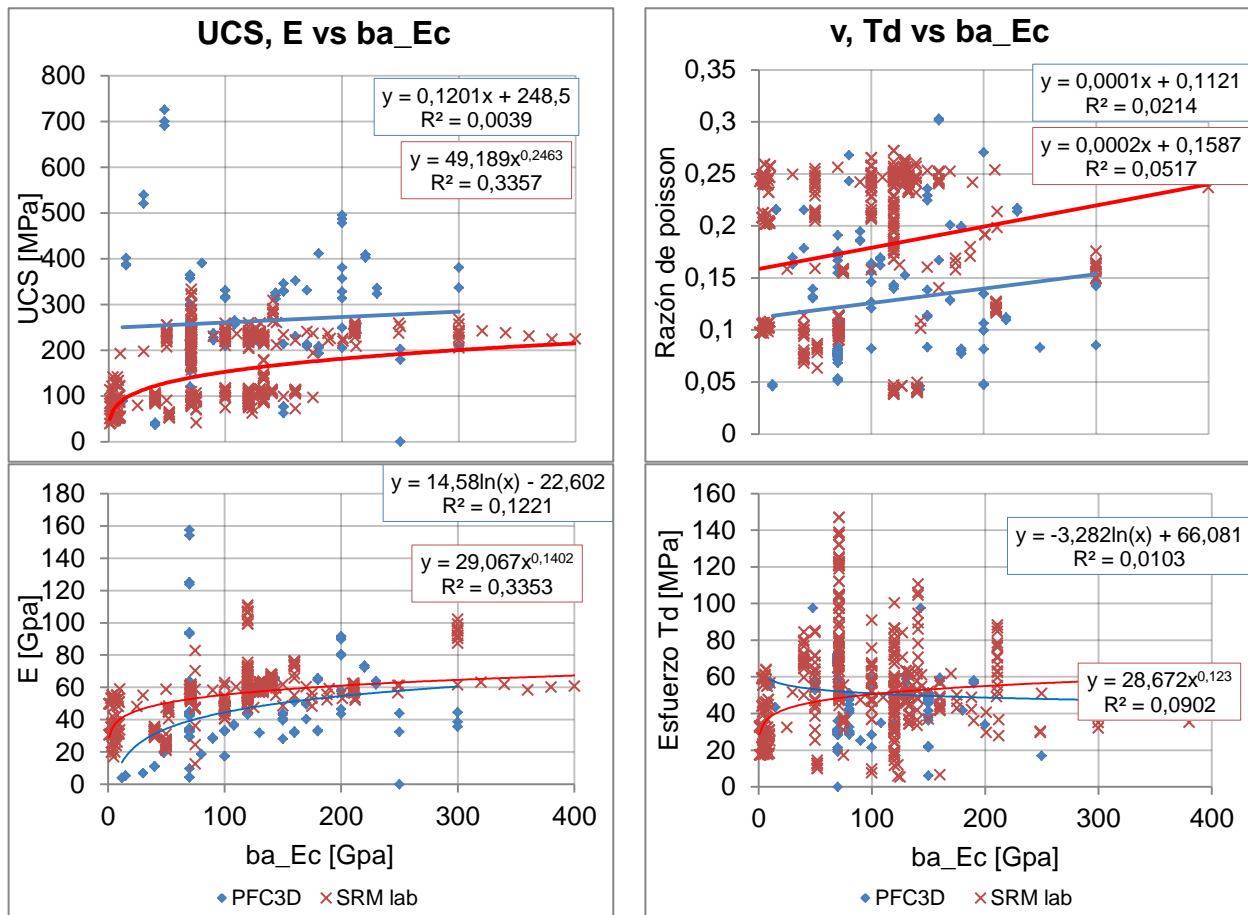
En la Figura 4-2 se observa que el aumento del módulo de Young de las partículas afecta el comportamiento *post-peak* de los casos simulados, desde dúctil a frágil. La principal razón de este efecto corresponde a que la carga de la compresión las recibe los vínculos (cemento), una vez que se rompen, la carga se transfiere a los contactos de partículas, por lo tanto es de esperar el comportamiento observado.

En la Tabla 4-2 se detallan los principales datos promedio obtenidos:

**Tabla 4-2. Resumen de los principales datos analizados.**

Parámetros	Valores					
$ba_{Ec}$ [MPa]	70	100	150	200	250	300
Módulo de Young [GPa]	43,47	42,68	44,01	43,52	43,93	44,64
$\sigma_{ucs}$ [MPa]	207,60	209,24	213,13	205,05	201,96	206,47
Poisson	0,081	0,082	0,083	0,082	0,083	0,085

El conjunto de datos simulados se muestran en la Figura 4-3:



**Figura 4-3. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro  $ba\_Ec$ .**

Se aprecia en la Figura 4-3 que este micro-parámetro en *PFC3D* no define los valores de  $v$  y UCS, pero posee una mayor correlación, aunque baja, para  $E$ . En *SRMlab* UCS y  $E$  presentan coeficiente de correlación estadísticamente equivalentes aunque bajos. Respecto a la tracción directa,  $ba\_Ec$  no influye el valor de este, obteniendo una correlación baja para ambas técnicas.

#### 4.1.2 Coeficiente de fricción (ba\_fric)

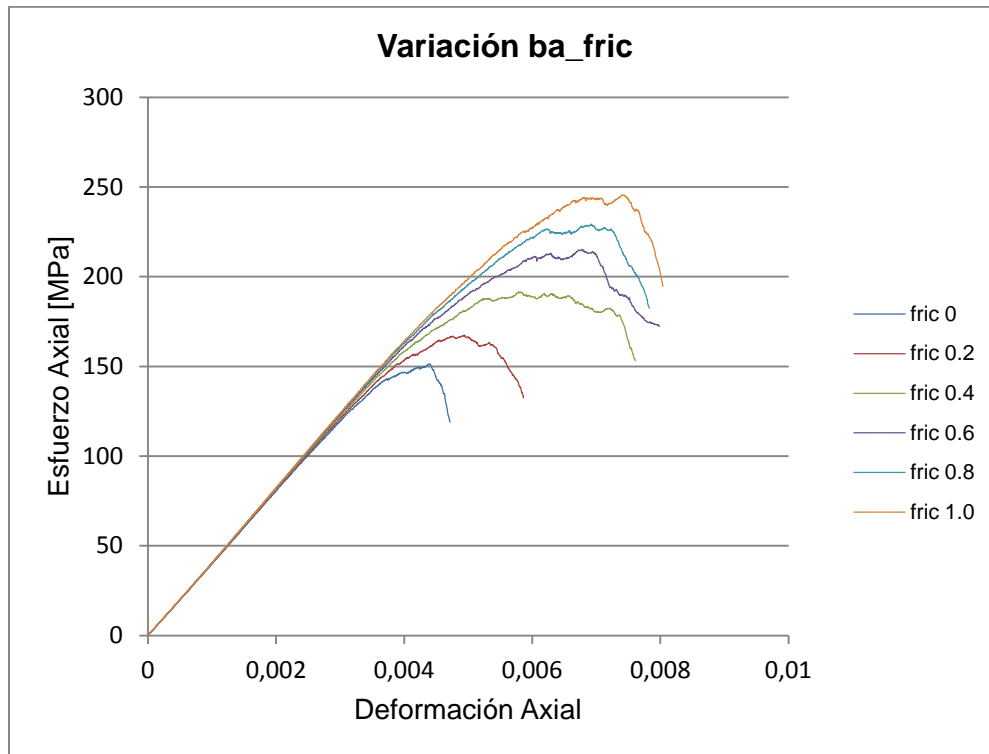


Figura 4-4. Variación de ba\_fric

Se observa que a medida que disminuye el valor de ba\_fric el comportamiento de la zona *post-peak* se torna frágil, esto se evidencia en la curva con coeficiente de fricción cero. No se recomienda utilizar este valor, ya que no existe en rocas intactas fricción cero. Se recomienda trabajar con el valor 0.5, (Itasca 2013).

Tabla 4-3. Resumen de los principales datos analizados

Parámetros	Valores					
ba_fric	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,00
Módulo de Young [GPa]	42,24	42,56	42,82	43,10	43,19	43,30
$\sigma_{ucs}$ [MPa]	151,30	167,33	191,66	215,22	229,23	245,61
Poisson	0,085	0,083	0,082	0,082	0,081	0,082

Para este parámetro solo se tienen simulaciones en *PFC3D*:

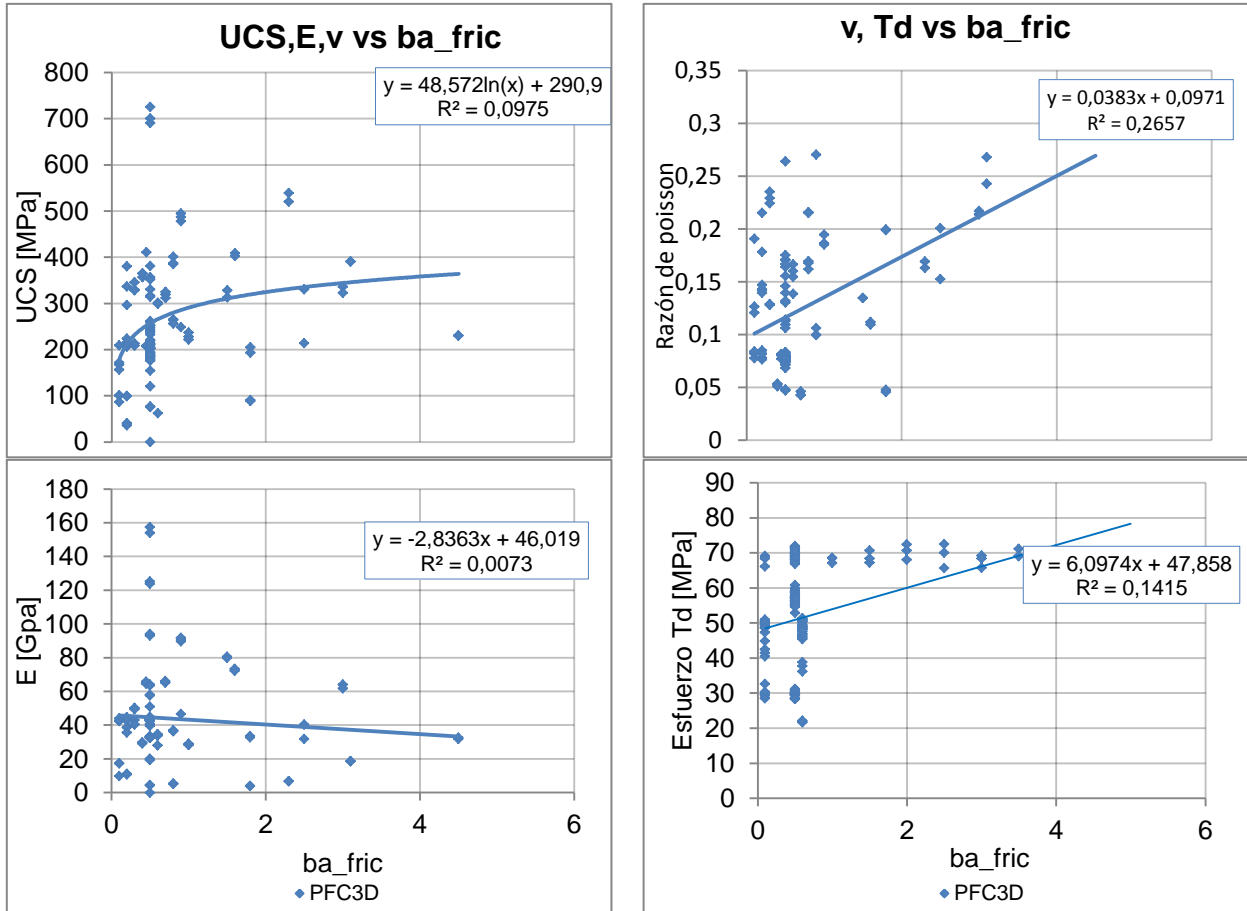


Figura 4-5. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro  $ba\_fric$ .

Se observan en la figura precedente bajos coeficientes de correlación para las macro-propiedades UCS,  $v$ ,  $E$  y Td. El parámetro  $ba\_fric$  afecta en menor medida el valor de Poisson debido a su coeficiente de correlación.

### 4.1.3 Módulo de Young de vínculos (pb\_Ec):

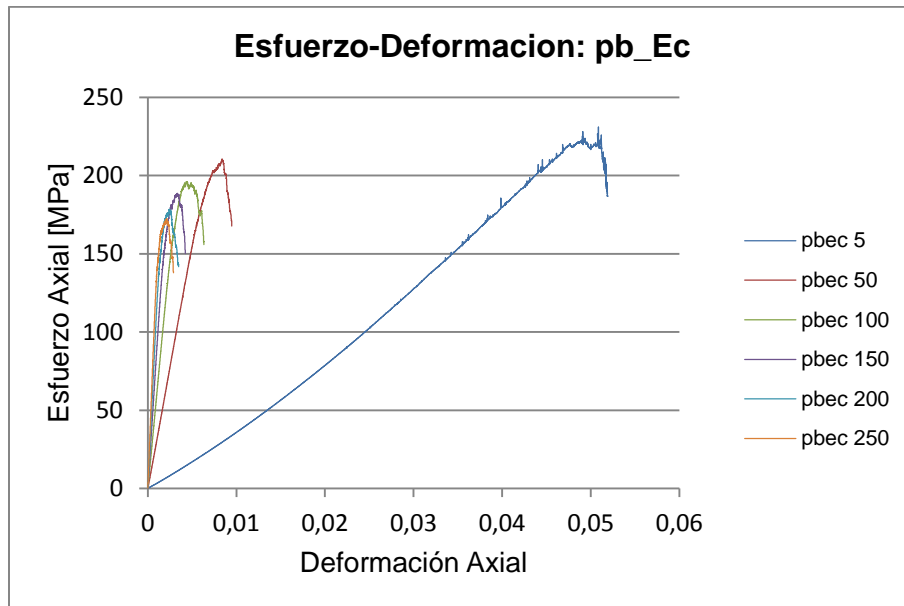


Figura 4-6. Variación de pb\_Ec

Como se mencionó anteriormente, la carga aplicada debe romper los vínculos asociado al cemento entre partícula, por lo tanto es directamente proporcional el valor de este parámetro al módulo de Young del arreglo de partículas. También se observa una disminución de la resistencia UCS. En la Tabla 4-4 se resume los principales valores obtenidos:

Tabla 4-4. Resumen de los principales datos analizados.

Parámetros	Valores					
ba_fric [MPa]	5	50	100	150	200	250
Módulo de Young [GPa]	4,31	32,62	62,85	92,82	123,07	153,04
$\sigma_{ucs}$ [MPa]	230,91	210,39	195,98	188,63	178,40	172,41
Poisson	0,112	0,084	0,080	0,078	0,077	0,076

Los resultados del análisis de sensibilidad de pb\_Ec se muestran en la Figura 4-7:

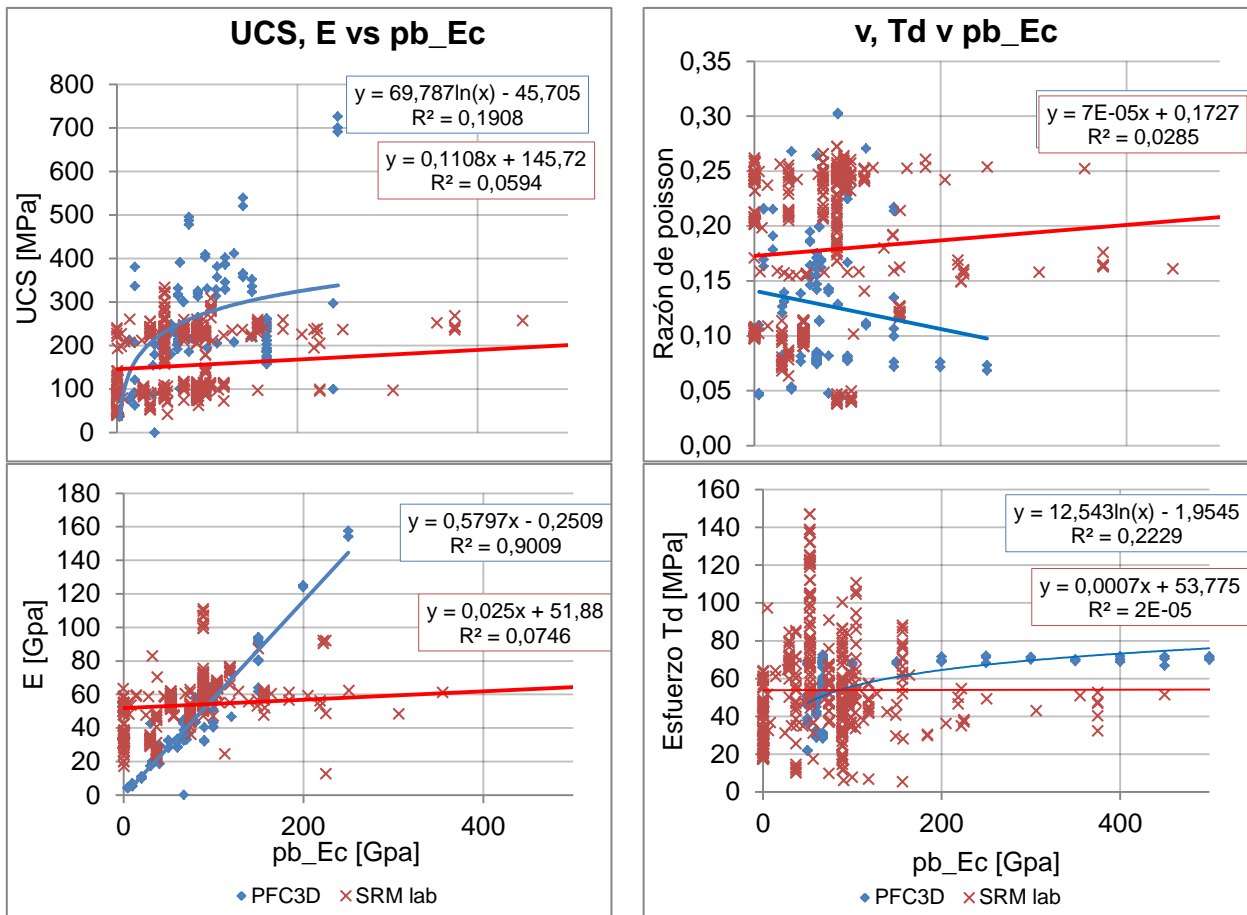


Figura 4-7. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro pb\_Ec.

Se aprecia que en *PFC3D* el módulo de Young tiene una relación lineal con el micro-parámetro pb\_Ec, obteniendo un  $R^2$  de 0,9, en cambio *SRMlab* no presenta el mismo comportamiento, esto se debe a que en la base de datos utilizada se considera lo siguiente:

$$ba_{Ec} = 1.5 * pb_{Ec}$$

Expresión que difiere con lo mencionado en el acápite 3.4.

No se observa dependencia entre UCS,  $v$  y Td con el micro-parámetro estudiado.

#### 4.1.4 Cohesión de vínculos (pb\_coh):

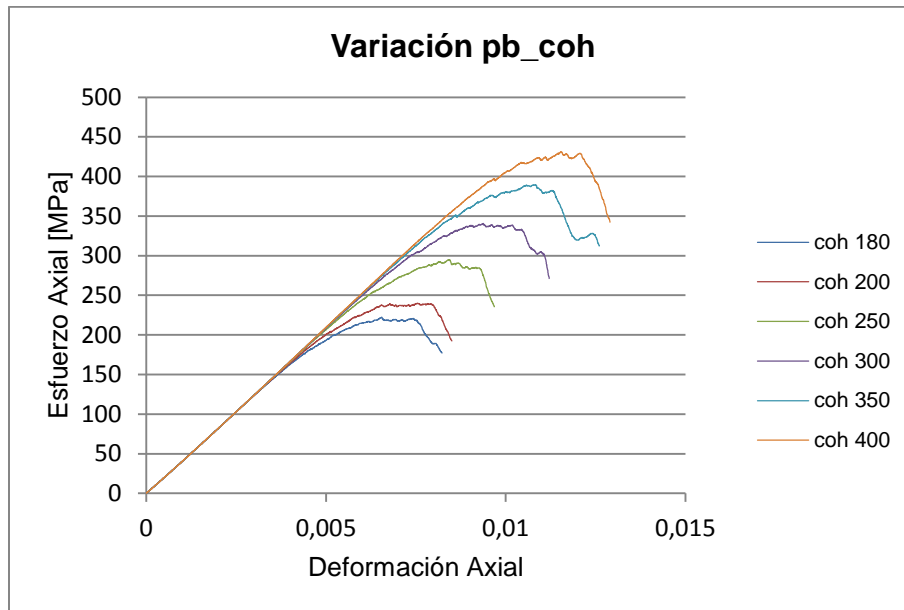


Figura 4-8. Variación de pb\_coh

La variación de este parámetro genera un aumento en la resistencia máxima, manteniendo el módulo de Young cercano a 40 [GPa]. Este parámetro determina el esfuerzo máximo de las simulaciones. Se considera que el comportamiento *post-peak* y el módulo de Young se mantienen constantes frente a variación de pb\_coh.

Los principales datos de este análisis se resumen en la Tabla 4-5:

Tabla 4-5. Resumen de los principales datos analizados

Parámetros	Valores					
pb_coh [MPa]	180	200	250	300	350	400
Módulo de Young [GPa]	41,33	41,41	41,46	41,47	41,47	41,47
$\sigma_{ucs}$ [MPa]	222,48	240,26	295,05	340,49	389,61	431,00
Poisson	0,080	0,080	0,080	0,080	0,081	0,081

El análisis de datos arroja los siguientes resultados:



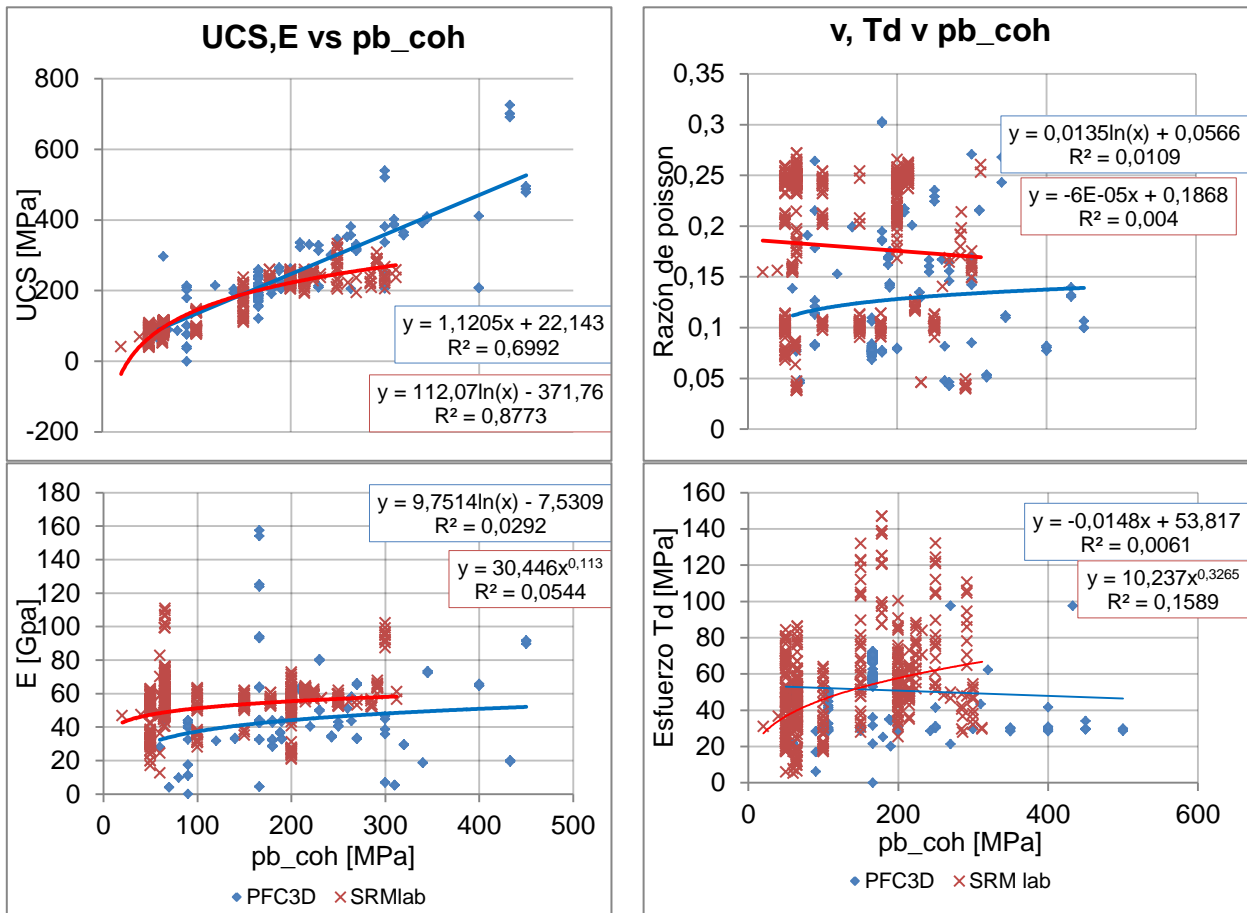


Figura 4-9. Variación del módulo de Young promedio frente a la variación de  $pb\_Coh$

En la Figura 4-9 se observa que tanto para *SRMlab* y *PFC3D* el valor de UCS obtiene correlaciones altas al compararlo con  $pb\_coh$ , por lo tanto se considera que este micro-parámetro define a UCS. La cohesión entre los vínculos no tiene influencia sobre  $E$ ,  $v$  y Td, obteniendo correlaciones bajas para cada uno de ellos.

#### 4.1.5 Esfuerzo normal en vínculos (pb\_sn):

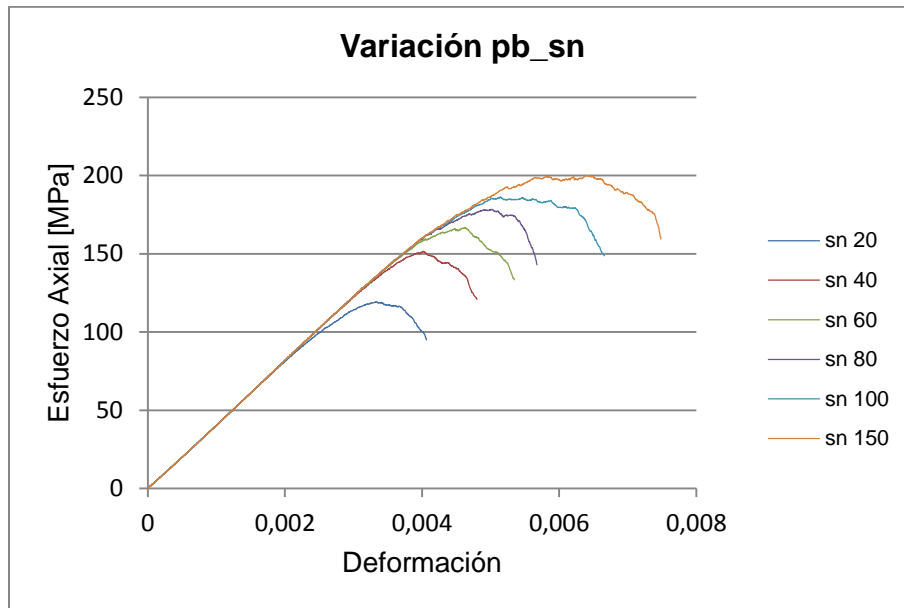


Figura 4-10. Variación de pb\_sn

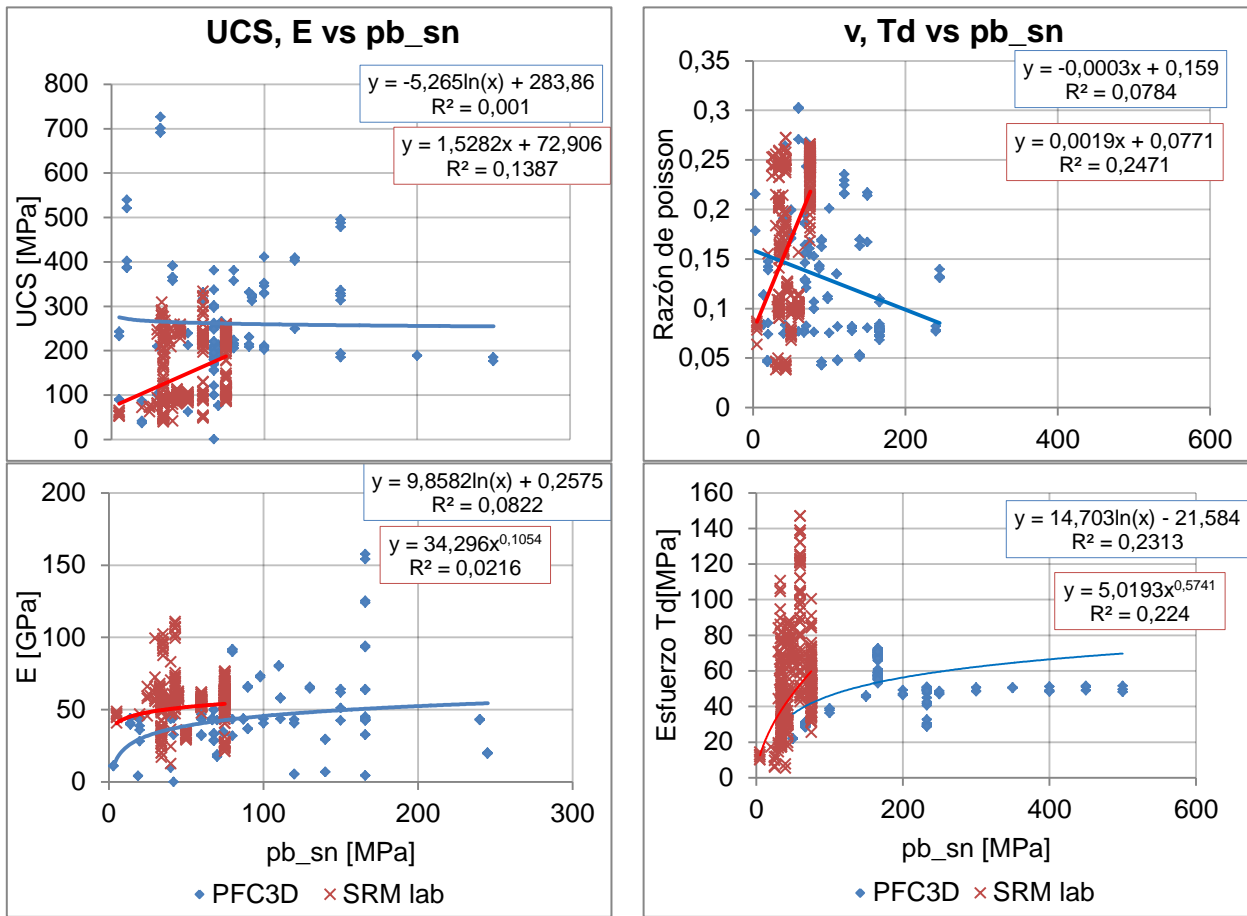
El principal cambio es en el esfuerzo máximo, llegando a alcanzar los 200 [MPa]. Se mantiene la tendencia del parámetro anterior con respecto a la pendiente de cada caso ( $E_c$ ):

En la Tabla 4-6 se detallan los parámetros obtenidos en la variación de la rigidez normal:

Tabla 4-6. Resumen de los principales datos analizados

Parámetros	Valores					
pb_coh [MPa]	20	40	60	80	100	150
Módulo de Young [GPa]	42,61	42,87	42,96	42,95	42,96	42,96
$\sigma_{ucs}$ [MPa]	119,37	151,54	166,62	178,28	186,28	199,94
Poisson	0,080	0,080	0,080	0,080	0,081	0,081

Los resultados de este micro-parámetro se detalla en la Figura 4-11:



**Figura 4-11. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro pb\_sn.**

En la Figura 4-11 se aprecia que pb\_sn posee mayor influencia sobre la resistencia a la tracción directa. Cabe destacar que las simulaciones en *PFC3D* se hicieron con una cohesión determinada, esto implica una limitación entre la influencia de pb\_sn y las macro-propiedades ensayadas. En el manual de este software se recomienda calibrar la tracción directa a través de este micro-parámetro.

#### 4.1.6 Razón de rigidez (Krat)

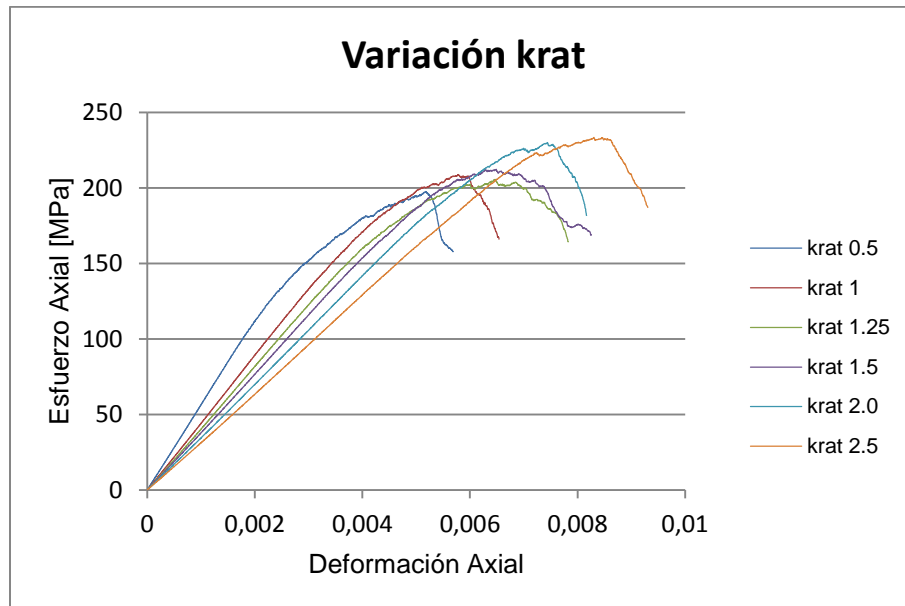


Figura 4-12. Variación de Krat

En la Figura 4-12 se aprecia un notorio cambio en las curvas simuladas. Se recomienda trabajar con una razón igual a uno, (Itasca 2013). No es posible determinar si desde cierto valor el comportamiento *post-peak* del material sintético es dúctil o frágil.

Los valores obtenidos de las curvas simuladas se resumen en la Tabla 4-7:

Tabla 4-7. Resumen de los principales datos analizados

Parámetros	Valores					
pb_krat	0,5	1	1,25	1,5	2	2,5
Módulo de Young [GPa]	49,43	46,20	42,96	41,75	35,96	33,27
$\sigma_{ucs}$ [MPa]	197,62	208,84	205,68	212,38	230,04	233,50
Poisson	0,02	0,05	0,08	0,10	0,14	0,17

Los resultados del análisis de sensibilidad para este micro-parámetro se muestran a continuación:

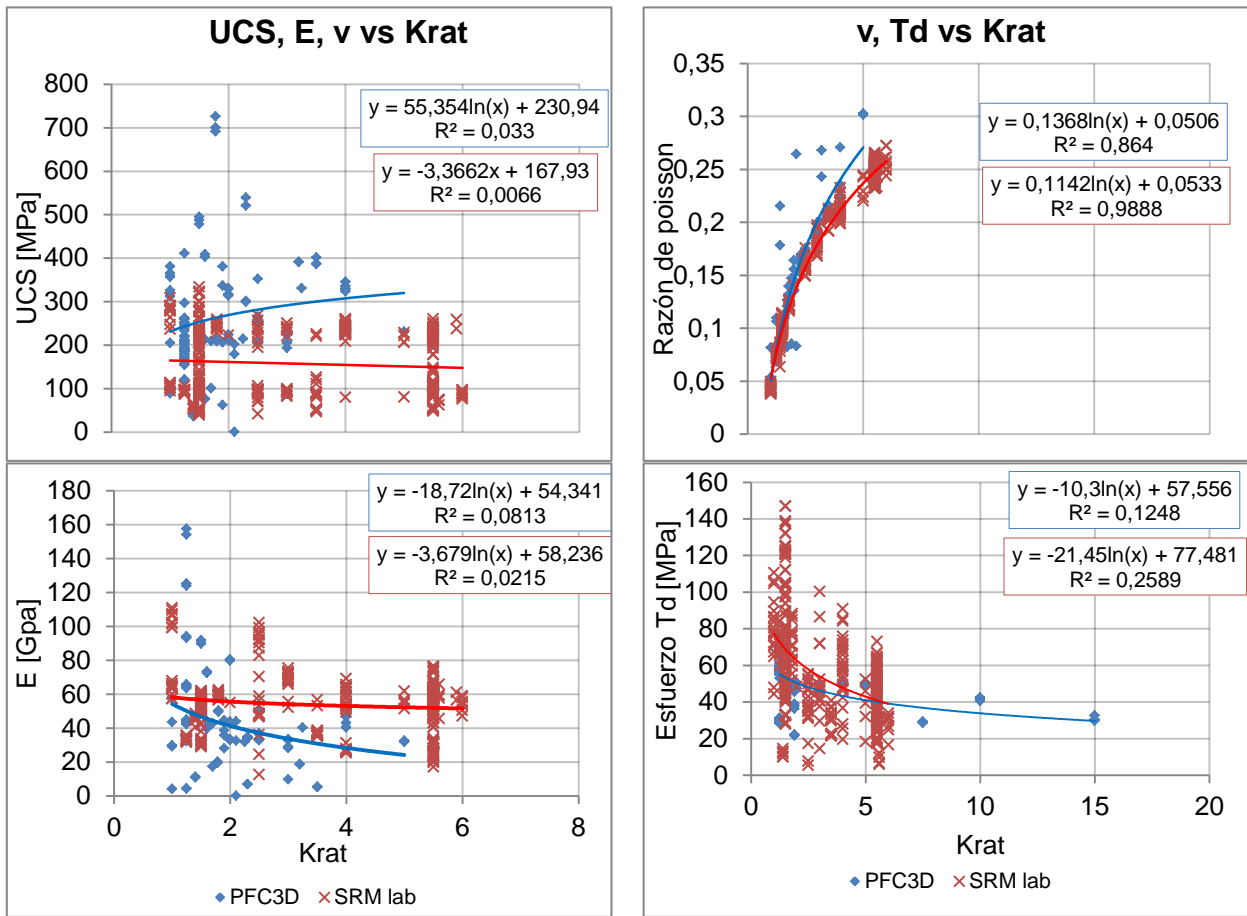
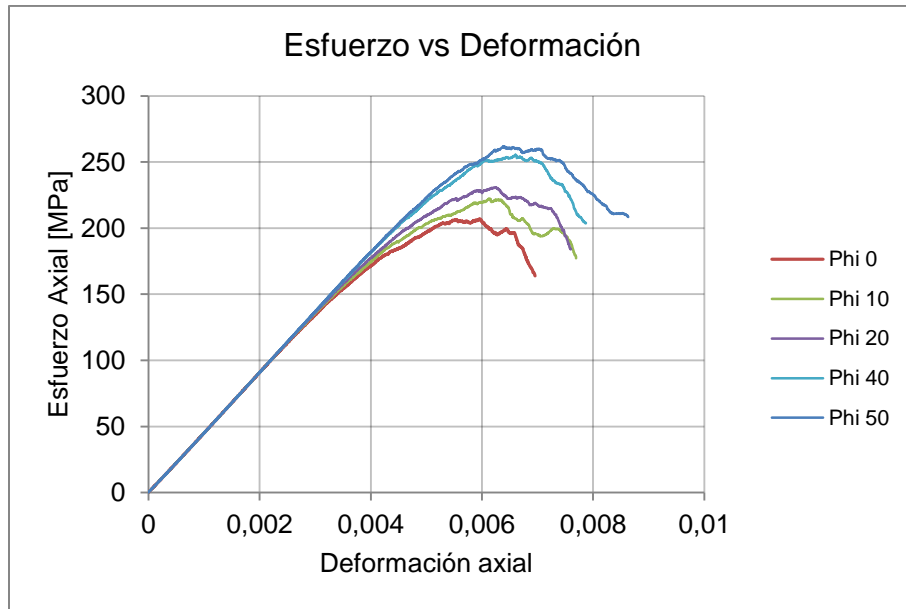


Figura 4-13. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro  $kn/ks$ .

De la Figura 4-13 se desprende que  $Krat$  no influye en los valores  $UCS$  y  $E$ , obteniéndose bajos valores de  $R^2$ , tanto para  $PFC3D$  como para  $SRMlab$ . La razón de las rigideces no afecta en gran medida en la tracción directa, lo que se ve reflejado en los coeficientes de correlación obtenidos. Efecto inverso se observa en la razón de Poisson, donde, con coeficiente de correlación de 0,864 para  $PDC3D$  y 0,988 para  $SRMlab$ , la variable  $Krat$  determina el valor de este.

#### 4.1.7 Ángulo de fricción ( $Pb_{\phi}$ )

Se realizan un total de 5 simulaciones, en el rango [0-50], para observar el efecto de este microparámetro en los ensayos de esfuerzo-deformación:



**Figura 4-14. Variación ángulo de fricción**

En la Figura 4-14 se aprecia un cambio en la resistencia a la compresión uniaxial, aumentando a medida que el valor de *Phi* es mayor. El módulo de Young no se ve afectado frente a la variación de *Phi*. Los principales valores obtenidos se resumen en la Tabla 4-8:

**Tabla 4-8. Principales macroparámetros obtenidos**

Parámetros	Valores				
Phi	0	10	20	40	50
Módulo de Young [GPa]	47,44	47,53	47,56	47,70	47,69
UCS	207,04	222,30	230,79	255,45	261,84
Poisson	0,048	0,047	0,047	0,047	0,047

Las series de simulaciones realizadas se muestran a continuación:

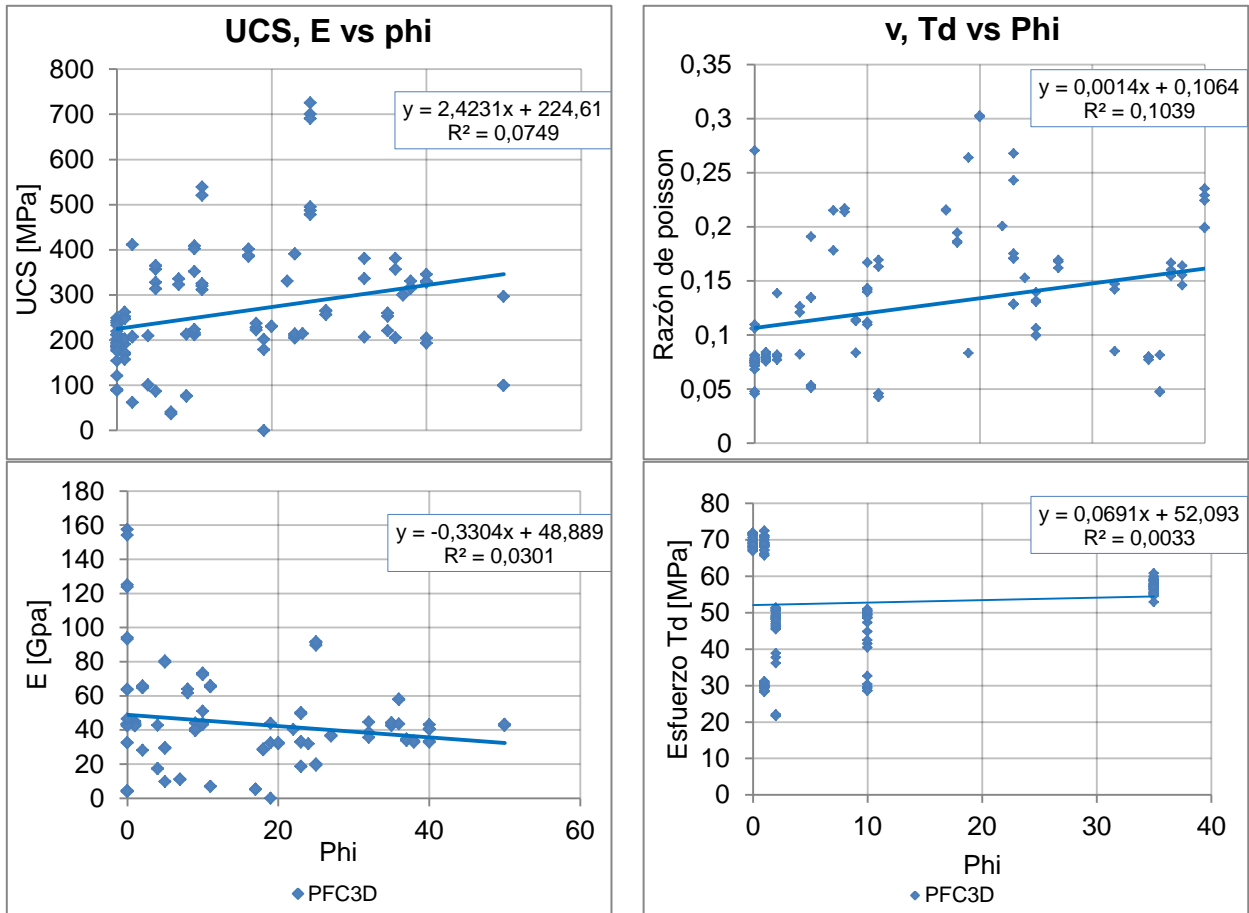


Figura 4-15. Análisis de sensibilidad para el micro-parámetro  $\Phi$ .

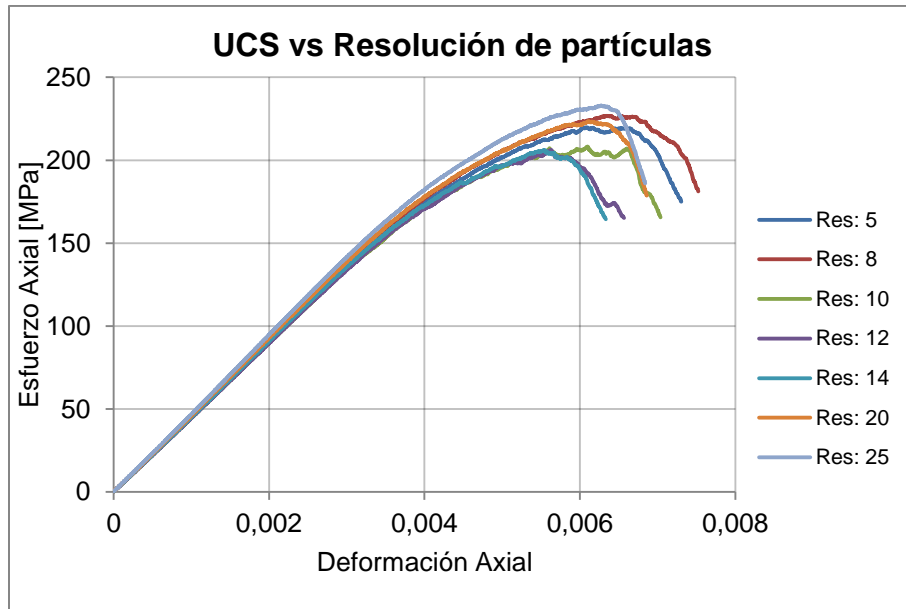
Se observan bajas correlaciones en las macropropiedades estudiadas, a pesar de esto, se observa la tendencia de la Figura 4-14 con respecto a  $UCS$  y  $\Phi$ .

Debido al mayor número de simulaciones y coincidencia en los micro-parámetros que definen a las macro-propiedades, se decide utilizar la expresión propuesta por Suzuki (2013) para desarrollar metodologías de inducción de efecto escala:

$$UCS = 2,0 * (E_b^{0,10}) * (k_{rat}^{-0,15}) * (\bar{\sigma}_c^{0,43}) * (c^{0,65}) * (E_{pb}^{-0,16})$$

#### 4.1.8. Efecto de la resolución de partículas

La cantidad de partículas contenidas en el diámetro de probeta afecta en las simulaciones realizadas. Con el fin de observar este efecto se realizaron 7 simulaciones, con el mismo número de semilla, obteniendo la Figura 4-16:



**Figura 4-16. Efecto de la resolución en ensayos UCS**

Al variar el número de partículas contenidas en el diámetro de probeta se aprecia cambio en la resistencia UCS y leves cambios en el módulo de Young. Se recomienda trabajar con un rango de resolución entre 10 y 14 partículas. La Tabla 4-9 resume las simulaciones realizadas, con 10 semillas diferentes por cada resolución, para observar las diferencias en los principales parámetros:

**Tabla 4-9. Parámetros por cada resolución estudiada.**

Resolución	$\sigma_{ucs}$ [MPa]	Módulo de Young [MPa]	Poisson
10	200	64,5	0,045
12	206	64,6	0,044
14	214	65,4	0,043
Promedio	206	64,9	0,044
Desviación Estándar	5.82	0,38	0,001

No se observa diferencias significativas en el rango estudiado. Además se recomienda (Itasca 2013) utilizar una resolución de 12 partículas. Este valor es usado en el proyecto.

## 4.2 Calibración roca intacta

Los parámetros utilizados para cada muestra de granito se muestran en la Tabla 4-10:



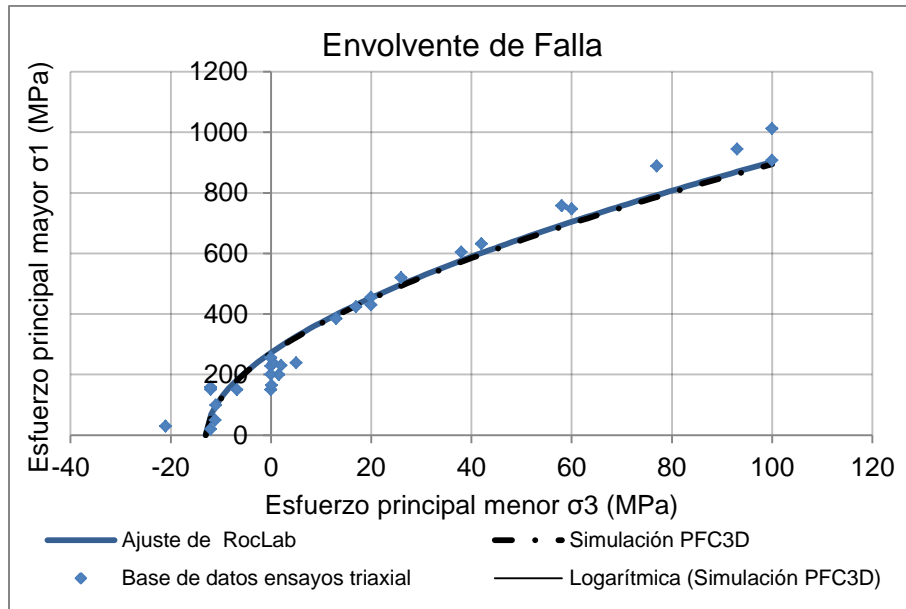
Tabla 4-10. Parámetros finales de calibración modelo *Enhanced*

Símbolo FISH	Descripción	Valor por defecto	Unidad
*Propiedades generales			
mg_Rrat	Razón de radios [min,max]	1,66	NA
mg_ts0	Stress isotrópico objetivo	-0,1	MPa
Propiedades de las partículas			
ba_rho	Densidad	2630	kg/m <sup>3</sup>
ba_Ec	Módulo de Young	134	GPa
ba_Krat	Razón de rigidez	1	NA
ba_fric	Coeficiente de fricción	0,5	NA
Propiedades de los vínculos ( <i>parallel bond</i> )			
pb_Ec	Módulo de Young vínculos	89,3	GPa
pb_Krat	Razón de rigidez	1	NA
pb_sn_mean	Esfuerzo normal promedio	27	MPa
pb_sn_sdev	Desviación estándar esfuerzo normal	5,4	MPa
pb_coh_mean	Cohesión promedio	335	MPa
pb_coh_sdev	Desviación estándar Cohesión	67	MPa
pb_phi	Ángulo de fricción	30	°

#### 4.2.1 Validación modelo *Enhanced* calibrado

##### Envolvente de Falla

En las Figura 4-20 se contrasta las curvas de esfuerzo-deformación de *PFC3D* y las curvas obtenidas de Kawakata y Hamison. Se simulan cinco ensayos triaxiales confinados a 5,60 y 100 MPa. El set de parámetros genera la envolvente de falla de la Figura 4-17:



**Figura 4-17. Envoltura de falla generada en *PFC3D* comparado con la base de datos trabajada**

El set de parámetros calibrados permite replicar la envoltura de falla<sup>1</sup> de la base de datos utilizada. Los macroparámetros finales se muestran en la Tabla 4-11:

**Tabla 4-11. Macroparámetros calibrados modelo *enhanced***

Macroparámetros	Valores <i>PFC3D</i>	Referencia	Diferencia
mi	20,4	20,8	1,92%
UCS [MPa]	270	272	0,74%
Resistencia a la tracción [MPa]	13	13,3	2,26%
Poisson	0,05	0,35	85,71%
Módulo de Young [GPa]	60,4	60,3	0,17%

<sup>1</sup> Respecto a sus principales parámetros: Tracción Directa, Compresión uniaxial, Compresión bajo confinamiento.

## Curvas de esfuerzo-deformación

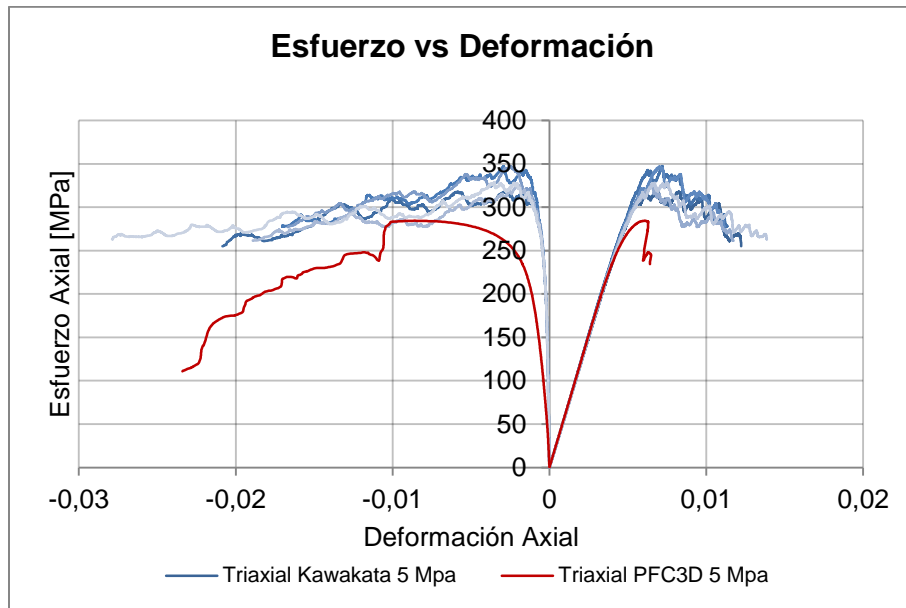


Figura 4-18. Comparación curva esfuerzo-deformación en ensayos triaxiales ( $\sigma_3=5$  [MPa])

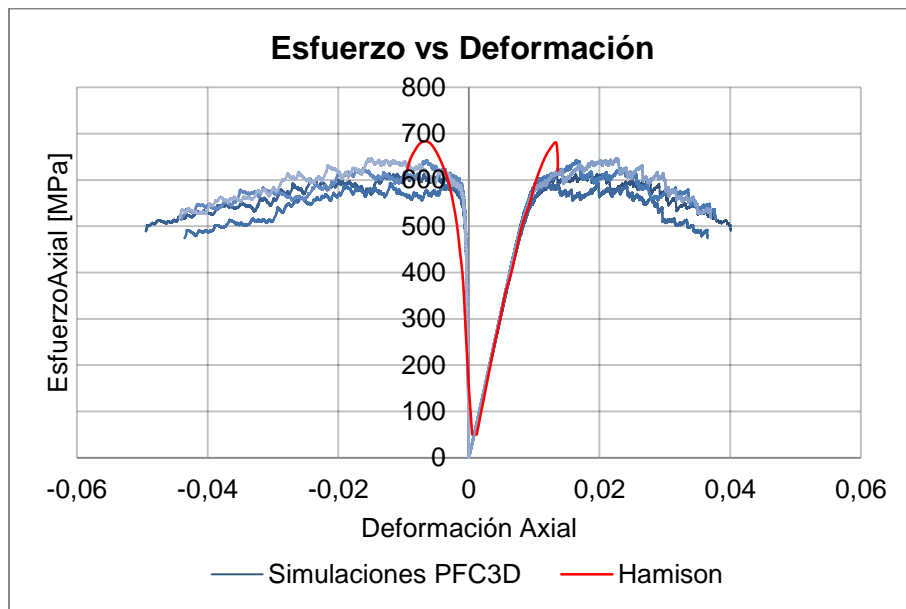
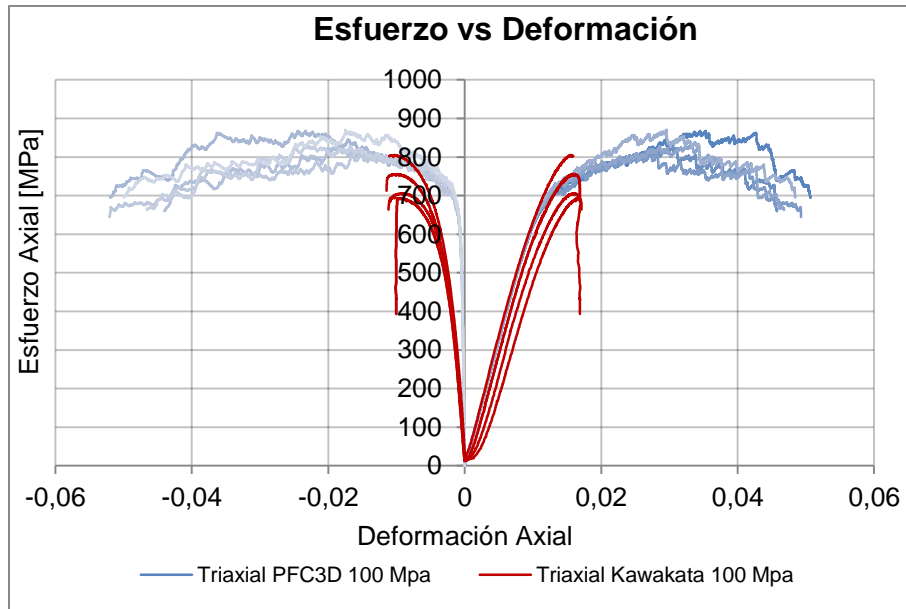


Figura 4-19. Comparación curva esfuerzo-deformación en ensayos triaxiales ( $\sigma_3=60$  [MPa])



**Figura 4-20. Comparación curva esfuerzo-deformación en ensayos triaxiales ( $\sigma_3=100$  [MPa])**

Se aprecia en las Figura 4-18, Figura 4-19 y Figura 4-20 que las simulaciones realizadas se ajustan respecto a la zona del módulo de Young en los tres casos analizados. La diferencia radica en el comportamiento *post-peak* donde el software no es capaz de replicar un comportamiento frágil de la roca. Cabe recordar que las curvas de Kawakata (1999) son resultados de ensayos con deformación axial controlada, hecho que afecta en el comportamiento *post-peak* de estas.

Los datos de literatura se resumen en la Tabla 4-12:

**Tabla 4-12. Macroparámetros de las simulaciones realizadas**

Macroparámetros/Simulaciones	1	2	3	4
Confinamiento 5 MPa				
UCS [MPa]	279,3	284,5		
Módulo de Young [GPa]	58,6	60,8		
Razón de Poisson	0,39	0,41		
Confinamiento 60 MPa				
UCS [MPa]	613,3	593,5	642,8	647,0
Módulo de Young [GPa]	60,2	59,4	61,6	61,3
Razón de Poisson	0,39	0,41	0,38	0,39
Confinamiento 100 MPa				
UCS [MPa]	805,2	706,1	755,5	693,0
Módulo de Young [GPa]	64,0	64,3	60,4	64,2
Razón de Poisson	0,43	0,38	0,43	0,37

### Observación de daño

Los resultados con respecto a la iniciación de daño en los ensayos simulados se muestran a continuación:

**Tabla 4-13. Valores de daño generado en las muestras de PFC3D.**

Número de simulaciones	$\sigma_c$ [MPa]	$\sigma_{ci}$ [MPa]	$\sigma_{cd}$ [MPa]	$\sigma_{ci}/\sigma_c$	$\sigma_{cd}/\sigma_c$
1	288	86	266	0,30	0,92
2	293	94	252	0,32	0,86
3	269	91	215	0,34	0,80
4	266	94	213	0,35	0,80
5	280	95	241	0,34	0,86
6	281	96	225	0,34	0,80
7	286	90	240	0,31	0,84
8	276	93	247	0,34	0,89
9	275	90	246	0,33	0,89
10	275	91	247	0,33	0,90
11	283	92	245	0,32	0,87
12	271	99	191	0,37	0,70
13	264	92	238	0,35	0,90
14	266	99	233	0,37	0,88
15	285	95	228	0,33	0,80
Promedio	277	93	235	0,34	0,85
Desv.Est.	8,9	3,4	18,6	0,019	0,058

Los valores de  $\sigma_{ci}$  y  $\sigma_{cd}$  son congruentes con los valores recopilados por Cai (2004), correspondiente a roca granito.

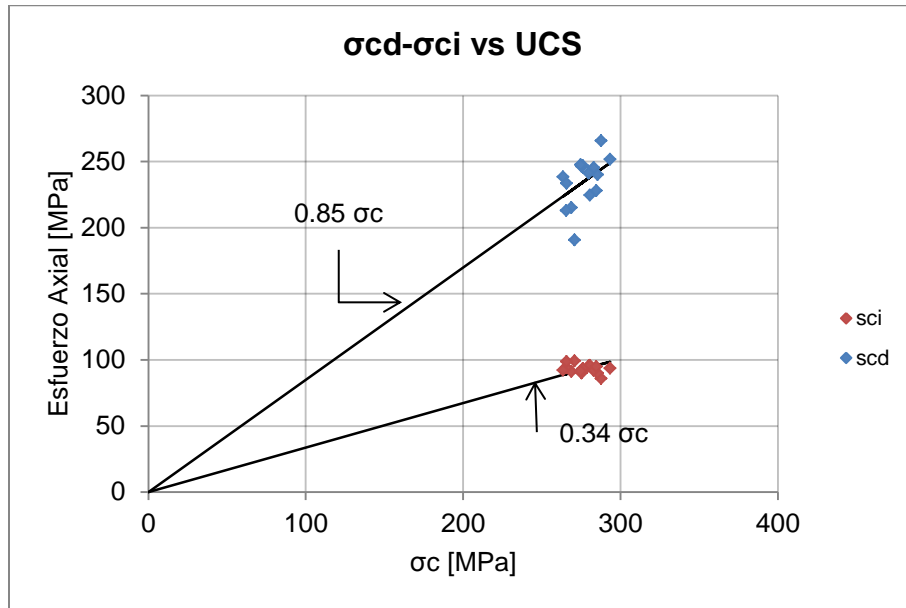


Figura 4-21. Relación entre iniciación de daño y daño crítico con respecto al esfuerzo de compresión uniaxial

La Figura 4-21 muestra la aproximación que se puede realizar entre  $\sigma_{ci}$ ,  $\sigma_{cd}$  versus el UCS para el set de micro-parámetros calibrado.

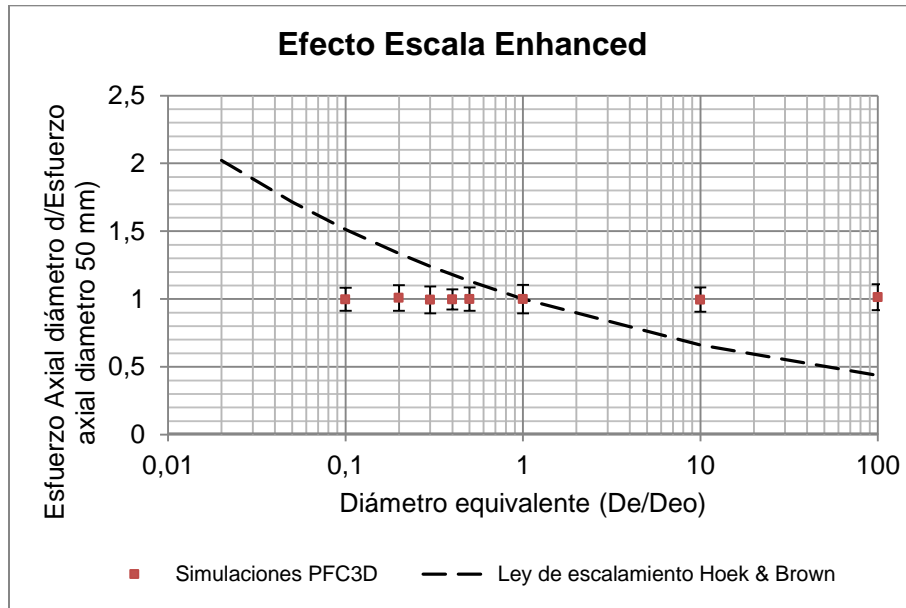
### 4.3 Verificación de efecto escala

Con el set de microparámetros calibrados se procede a variar el tamaño de las probetas para evidenciar efecto escala en *PFC3D*. Las principales características de los ensayos se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Tabla 4-14. Principales características de las probetas ensayadas

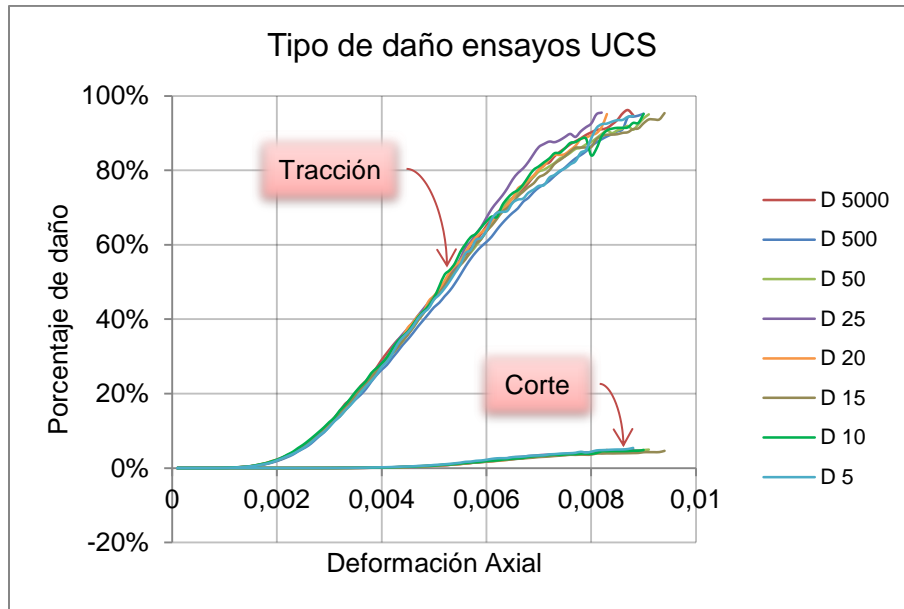
Diámetros de probeta [mm]	PSR	Resolución de partículas
5	1	0,16
10	1	0,31
15	1	0,47
20	1	0,63
25	1	0,78
50	1	1,56
500	0,1	15,66
5000	0,01	156,64

Se realizaron 15 simulaciones por cada diámetro de probeta, utilizando diferentes configuraciones en el arreglo de partículas, con el fin de agregar variabilidad al análisis, ver Figura 4-22:



**Figura 4-22. Simulaciones del set de microparámetros calibrados a distintos diámetros.**

Se observa que la resistencia UCS no sufre alteración a medida que varía el diámetro de la probeta ensayada. Se evidencia que el software *PFC3D* no posee incorporado el efecto escala, lo que responde a la estructura de la técnica: partículas esféricas, sin estructuras en el arreglo independiente de la escala que se utilice.



**Figura 4-23. Tipo de daño que se genera en ensayos UCS. Curvas promedios de 10 simulaciones.**

En la Figura 4-23 se aprecia que predomina el daño por tracción entre partículas, siendo consecuente con lo observado en ensayos UCS de laboratorio. Producto de que no existe efecto escala, el daño de partículas se genera en los mismos puntos de deformación axial.

#### **4.4 Inducción de efecto escala en *PFC3D***

El aumento de diámetro, manteniendo la relación H/D constante, supone una disminución en la resistencia a la compresión uniaxial, todo lo contrario a lo evidenciado en el punto anterior, donde se observa que el modelo *enhanced* no presenta efecto escala. Por esta razón se induce tal efecto a través de dos métodos: (i) Liberación de vínculos, (ii) Modificación de microparámetros.

##### **4.4.1 Liberación de vínculos**

La liberación de vínculos, en ensayos de compresión uniaxial y tracción directa, genera los siguientes resultados:



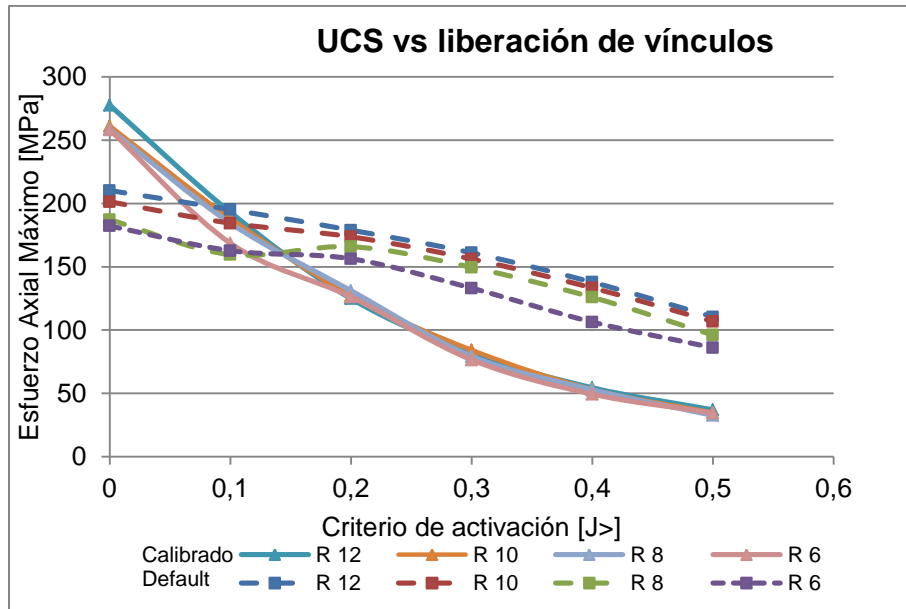


Figura 4-24. Respuesta de ensayo UCS frente a la liberación vínculos y cambio en la resolución.

De la Figura 4-24 se desprende que los criterios utilizados generan disminución en la resistencia a la compresión uniaxial para ambos set de parámetros. Para el set calibrado no se evidencia una variación importante frente a cambios en la resolución por cada criterio de activación. En cambio, el valor UCS disminuye, para el mismo criterio, a medida que la resolución decae. La liberación de vínculos genera un comportamiento distinto en ambos set de parámetros.

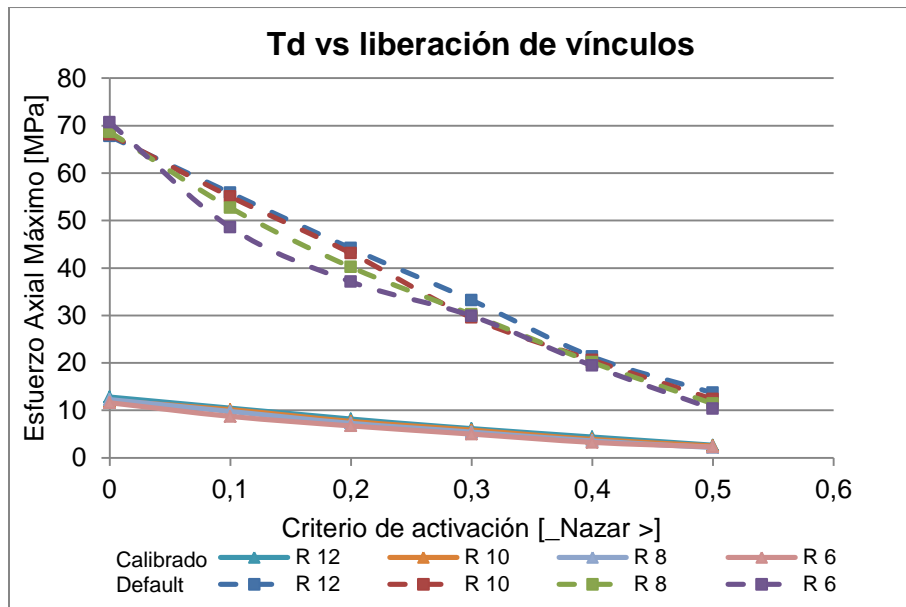


Figura 4-25. Respuesta de ensayo de tracción directa frente a la liberación vínculos y cambio en la resolución.

Se observa disminución en la resistencia a la tracción frente a cambios en el criterio de activación. El efecto de la resolución genera disminución de los valores obtenidos con respecto a la curva con resolución de 12 partículas, pero se mantiene la tendencia entre cada una de ellas, esto para ambos sets de parámetros. Al igual que en los ensayos de compresión uniaxial, los conjuntos de curvas presentan diferentes comportamientos.

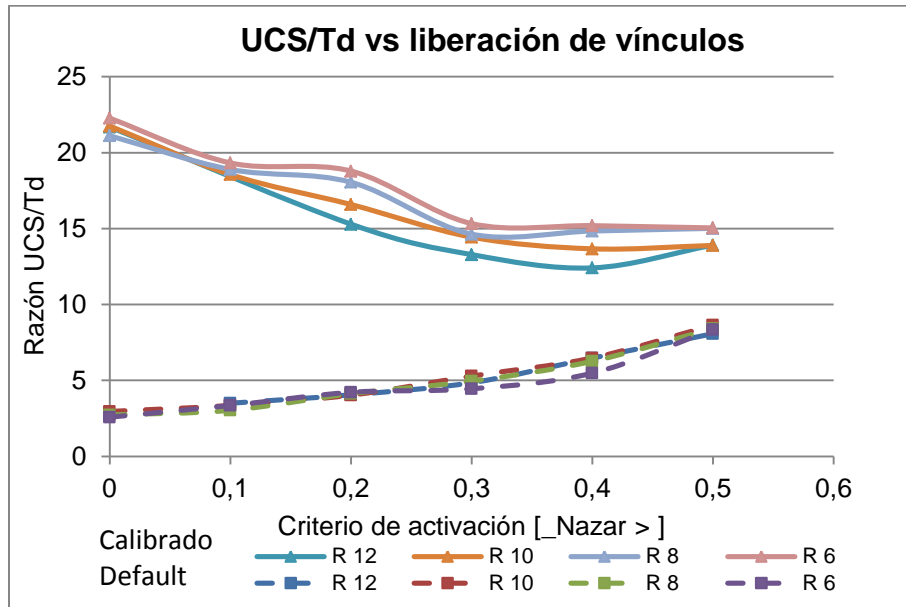
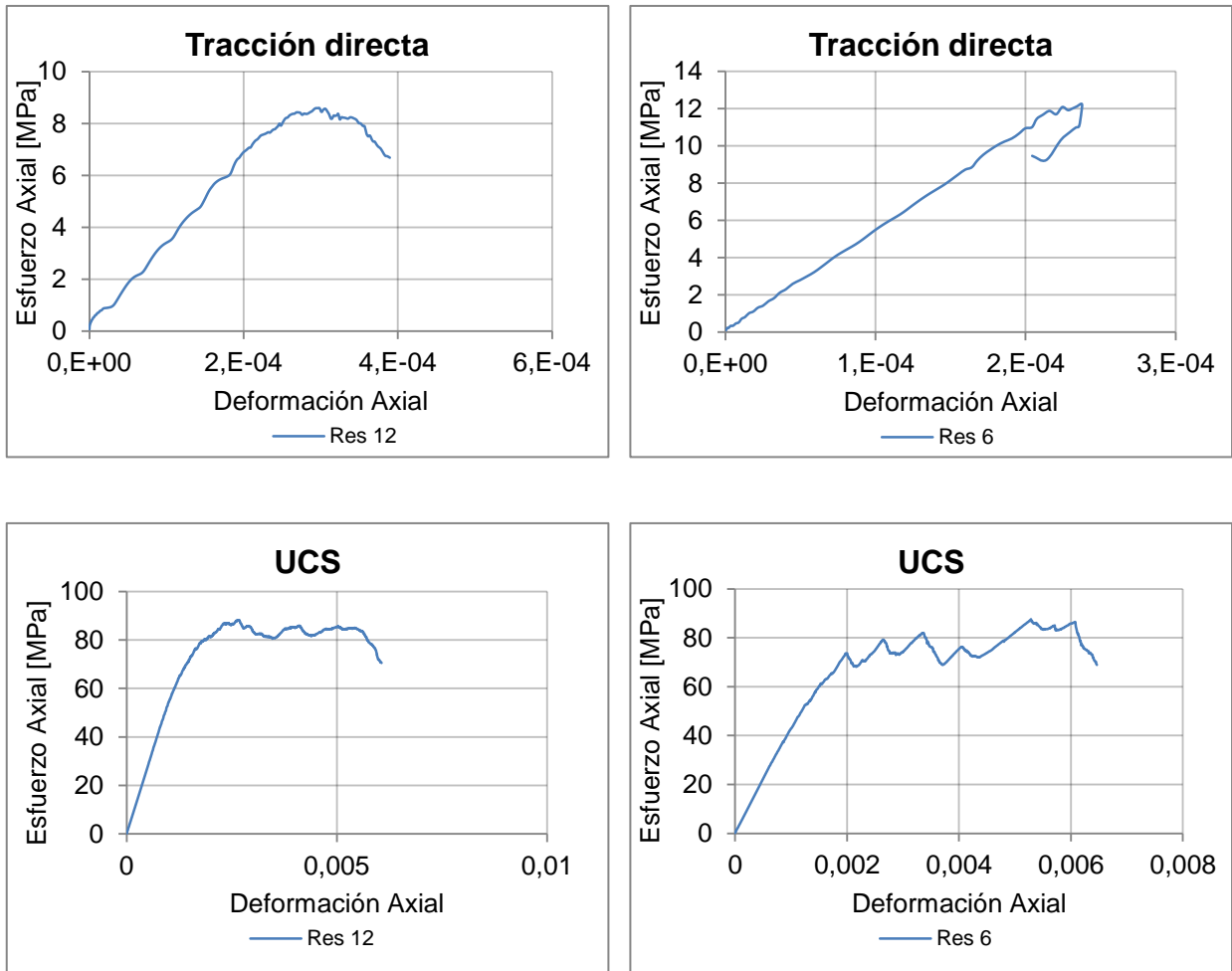


Figura 4-26. Variación de la razón UCS/Td frente a la liberación de vínculos.

Existe diferencia en la razón UCS/Td frente a cambios en la resolución para los microparámetros calibrados. Se considera que el rango de variación de las razones puede inducir cambios en el modo de falla de la probeta.

Las resoluciones utilizadas generan diferencias importantes en el caso de la tracción directa, donde se obtienen, para el caso de resolución de 6 partículas, comportamientos que se alejan de la realidad. Se observa diferencia en ensayos UCS, teniendo en cuenta que se contrastan simulaciones con el mismo número de semillas.

Las principales diferencias en curvas de esfuerzo-deformación se detallan a continuación:



**Figura 4-27. Principales diferencias en ensayos de tracción y compresión.**

Las resoluciones utilizadas generan diferencias importantes en el caso de la tracción directa, donde se obtienen, para el caso de resolución de 6 partículas, comportamientos que se alejan de lo observado en la literatura disponible. Se observa diferencia en ensayos UCS, teniendo en cuenta que se contrastan simulaciones con el mismo número de semillas.

Utilizando las curvas ajustadas, de la Figura 4-28, se determina los criterios que se deben introducir para generar efecto escala:

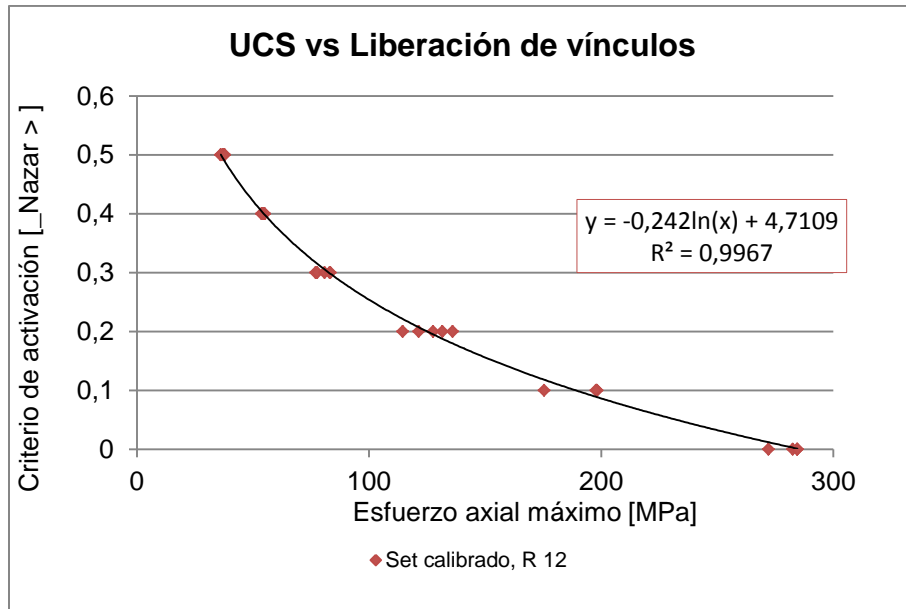


Figura 4-28. Relación entre porcentaje de vínculos liberados y UCS.

Tabla 4-15. Criterio necesario para inducir efecto escala.

Diámetro equivalente [mm]	UCS [MPa] Calibrado	_Nazar Set calibrado	UCS [MPa] default	_Nazar Set default
6	278	0,02	210	0,03
12	245	0,05	185	0,15
17	228	0,07	172	0,22
23	217	0,08	164	0,26
29	208	0,09	157	0,29
58	184	0,12	139	0,38
581	121	0,22	92	0,61
5812	80	0,32	61	0,77

El criterio de liberación de vínculos, para el set calibrado, se encuentra dentro de los rangos establecidos (0-0,5), por lo tanto para esta configuración es viable la inducción de efecto escala; en cambio, para la configuración por default, el valor de \_Nazar llega a un máximo de 0,77, provocando que la muestra de partículas falle antes de ser ensayada.

La liberación de vínculos genera una disminución en la resistencia a la compresión uniaxial y tracción directa, pero este cambio no es uniforme para todo set de microparámetros, llegando a generar criterios que imposibilitan la formación de probetas, además, la debilitación de contactos puede inducir planos de debilidad y generar discontinuidades.

### Umbral de fracturamiento y curvas UCS

Para determinar el efecto de escala en  $\sigma_{ci}$  y  $\sigma_{cd}$  se realizaron 55 simulaciones de ensayo de compresión uniaxial, variando el diámetro de probeta desde 5 a 200 [mm]. Los resultados se muestran a continuación:

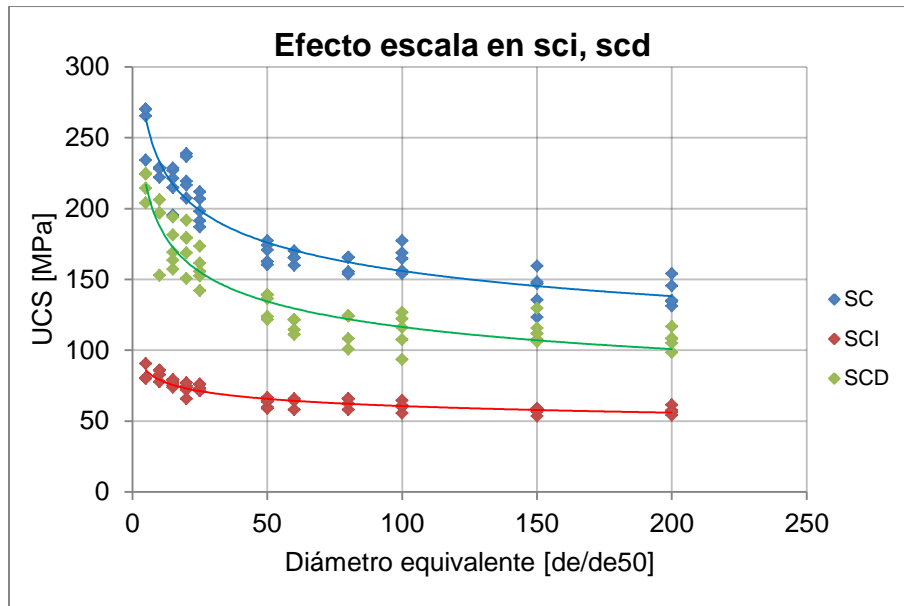


Figura 4-29. Efecto del diámetro de la muestra en la resistencia a la compresión máxima, sci y scd.

Se observa que la resistencia axial máxima disminuye a medida que aumenta el diámetro de la probeta, efecto inducido anteriormente. Mismo comportamiento se observa para  $\sigma_{ci}$  y  $\sigma_{cd}$  contrastando con lo presenciado por Martin (1994) en el granito Lac du Bonnet, donde  $\sigma_{ci}$  y  $\sigma_{cd}$  no se ven afectados por el diámetro de probeta. El valor promedio de  $\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_c}$  y  $\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_c}$  corresponde a 0.37 y 0.77 respectivamente, valores cercanos a lo observado por Hoek & Brown (1981) donde estas razones se acercan al 40 y 80% de  $\sigma_c$ . En el estudio de Cai (2004) se aprecia valores semejantes para las rocas del tipo granito.

La liberación de vínculos genera el siguiente efecto en las curvas de esfuerzo deformación:

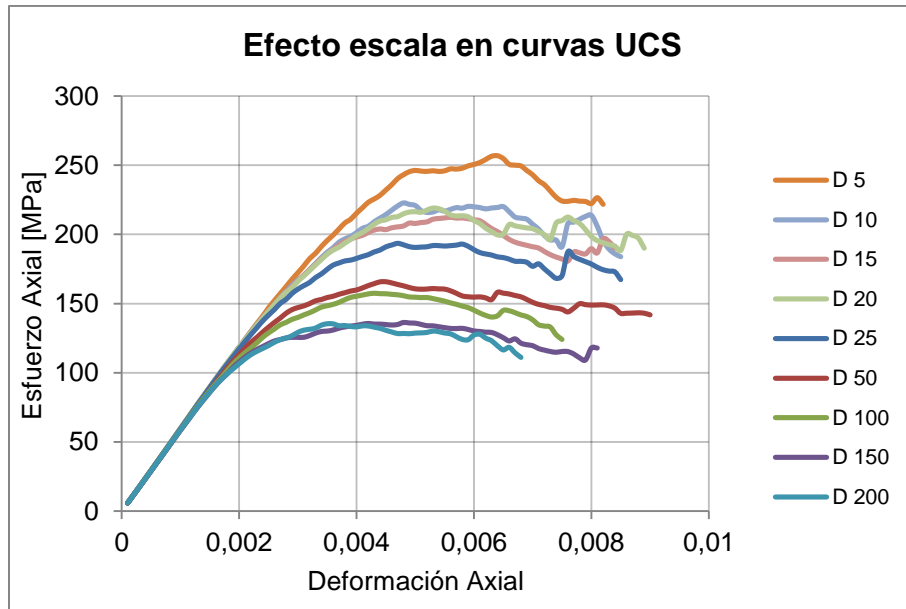


Figura 4-30. Cambio en la respuesta de la resistencia máxima uniaxial frente al cambio de diámetro de la probeta.

Se aprecia la disminución de la resistencia a la compresión y un aumento en el grado de ductilidad de la roca al cambiar la escala, siendo más notorio para diámetros mayores. Con respecto a la propiedad elástica, se realiza el mismo análisis elaborado por Yoshinaka (2008):

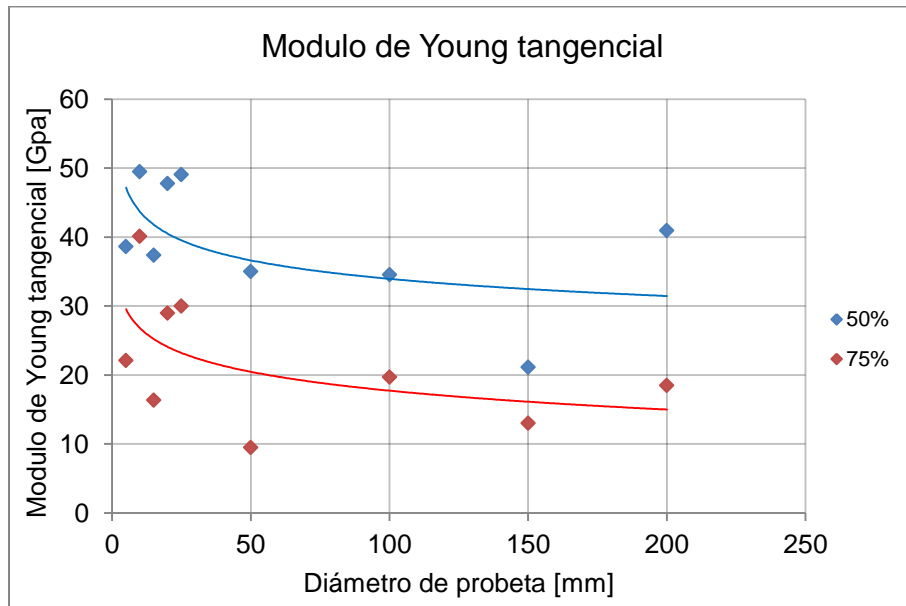


Figura 4-31. Efecto generado sobre el módulo de Young tangencial al 75% y 50% del *peak*.

Se aprecia la disminución de  $E_{tan}$  para ambos casos pero con valores distintos, se considera que esta diferencia tiene origen en el *post-peak* dúctil de las

simulaciones. Esto difiere con Yoshinaka (2008) donde ambos módulos de Young poseen valores similares.

### Porcentaje y tipo de daño en ensayos UCS

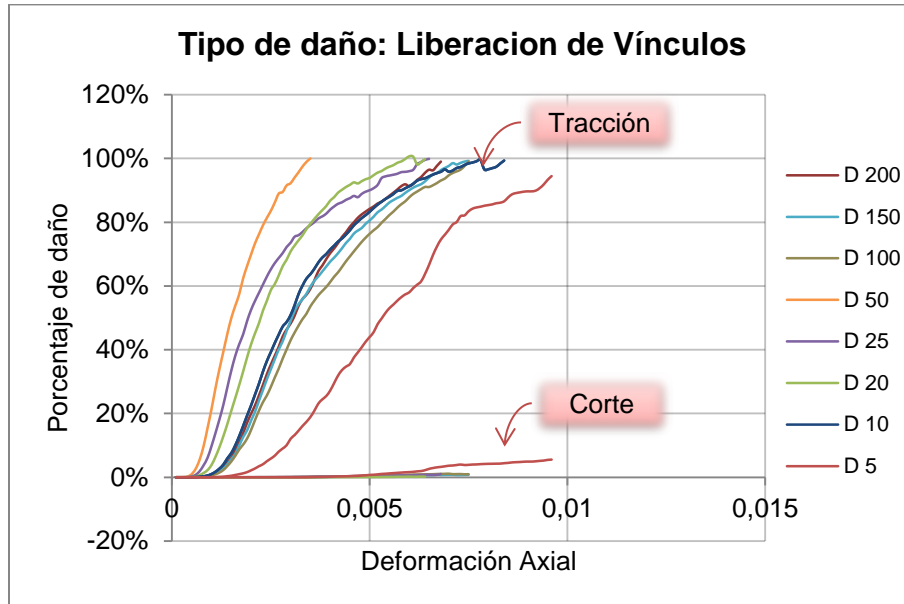


Figura 4-32. Tipo de daño que se genera en ensayos UCS a distintos diámetros, utilizando liberación de vínculos. Curvas promedio de 10 simulaciones.

La liberación de vínculos genera diferencias en los puntos donde se produce daño entre las partículas, observándose que a medida que aumenta el diámetro de espécimen el daño se genera a deformaciones menores, fenómeno que responde a lo observado en la Figura 4-29. La inducción de efecto escala no cambia el tipo de daño (tracción) en las simulaciones realizadas.

#### 4.4.2 Modificación de microparámetros

La representación de rocas en el software *PFC3D* requiere de la calibración de los microparámetros de la Tabla 4-16. Estos parámetros generan una muestra sintética que representa las macro-propiedades de la roca en estudio. La metodología busca cambiar la resistencia UCS en función del diámetro de la probeta, con el objetivo de replicar la tendencia de la curva de escalamiento de Hoek & Brown (1981).

**Tabla 4-16. Micro-parámetros de ajuste, PFC3D.**

Símbolo FISH	Nomenclatura	Descripción	Valor por defecto	Unidad
*Propiedades generales				
mg_Rrat	$R_{max}/R_{min}$	Razón de radios [min,max]	1,66	NA
mg_ts0	$\sigma_0^t$	Stress isotrópico objetivo	-0,1	MPa
Propiedades de las partículas				
ba_rho	$\rho$	Densidad	2630	kg/m <sup>3</sup>
ba_Ec	$E$	Módulo de Young	67	GPa
ba_Krat	$k^n/k^s$	Razón entre la rigidez normal y de corte	1,25	NA
ba_fric	$\mu$	Coefficiente de fricción	0,5	NA
Propiedades de los vínculos ( <i>parallel bond</i> )				
pb_Ec	$\bar{E}_c$	Módulo de Young vínculos	67	GPa
pb_Krat	$\bar{k}^n/\bar{k}^s$	Razón de rigidez	1,25	NA
pb_sn_mean	$\bar{\sigma}_c(mean)$	Esfuerzo normal promedio	166	MPa
pb_sn_sdev	$\bar{\sigma}_c(std. dev.)$	Desviación estándar esfuerzo normal	38	MPa
pb_coh_mean	$\bar{c}(mean)$	Cohesión promedio	166	MPa
pb_coh_sdev	$\bar{c}(std. dev.)$	Desviación estándar Cohesión	38	MPa
pb_phi	$\bar{\varphi}$	Ángulo de fricción	0	°

### Efecto escala para distintos set de parámetros

Los set utilizados corresponden a los de la Tabla 4-17:

**Tabla 4-17. Set de microparámetros utilizados en las simulaciones.**

Símbolo FISH	Nomenclatura	Set 1 (Calibrado)	Set 2 (Param. por defecto)	Set3	Set 4	Unidad
mg_Rrat	$R_{max}/R_{min}$	1,66	1,66	1,66	1,66	NA
mg_ts0	$\sigma_0^t$	-0,1	-0,1	0,1	0,1	MPa
ba_rho	$\rho$	2630	2630	2900	2800	kg/m <sup>3</sup>
ba_Ec	$E$	134	67	120	80	GPa
ba_Krat	$k^n/k^s$	1	1,25	1,9	1,8	NA
ba_fric	$\mu$	0,5	0,5	0,1	0,9	NA
pb_Ec	$\bar{E}_c$	89,3	67	80	70	GPa



pb_Krat	$\bar{k}^n / \bar{k}^s$	1	1,25	2	1,3	NA
pb_sn_mean	$\bar{\sigma}_c(\text{mean})$	27	166	90	60	MPa
pb_sn_sdev	$\bar{\sigma}_c(\text{std. dev.})$	5,4	38	18	12	MPa
pb_coh_mean	$\bar{c}(\text{mean})$	335	166	90	230	MPa
pb_coh_sdev	$\bar{c}(\text{std. dev.})$	67	38	18	46	MPa
pb_phi	$\bar{\varphi}$	35	0	5	0	°

Los resultados de las distintas configuraciones se muestran a continuación:

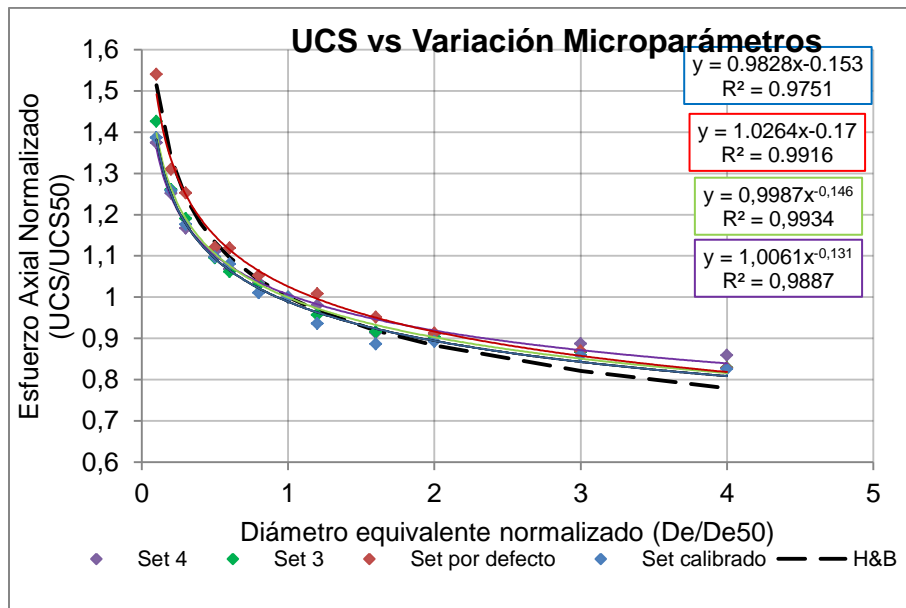


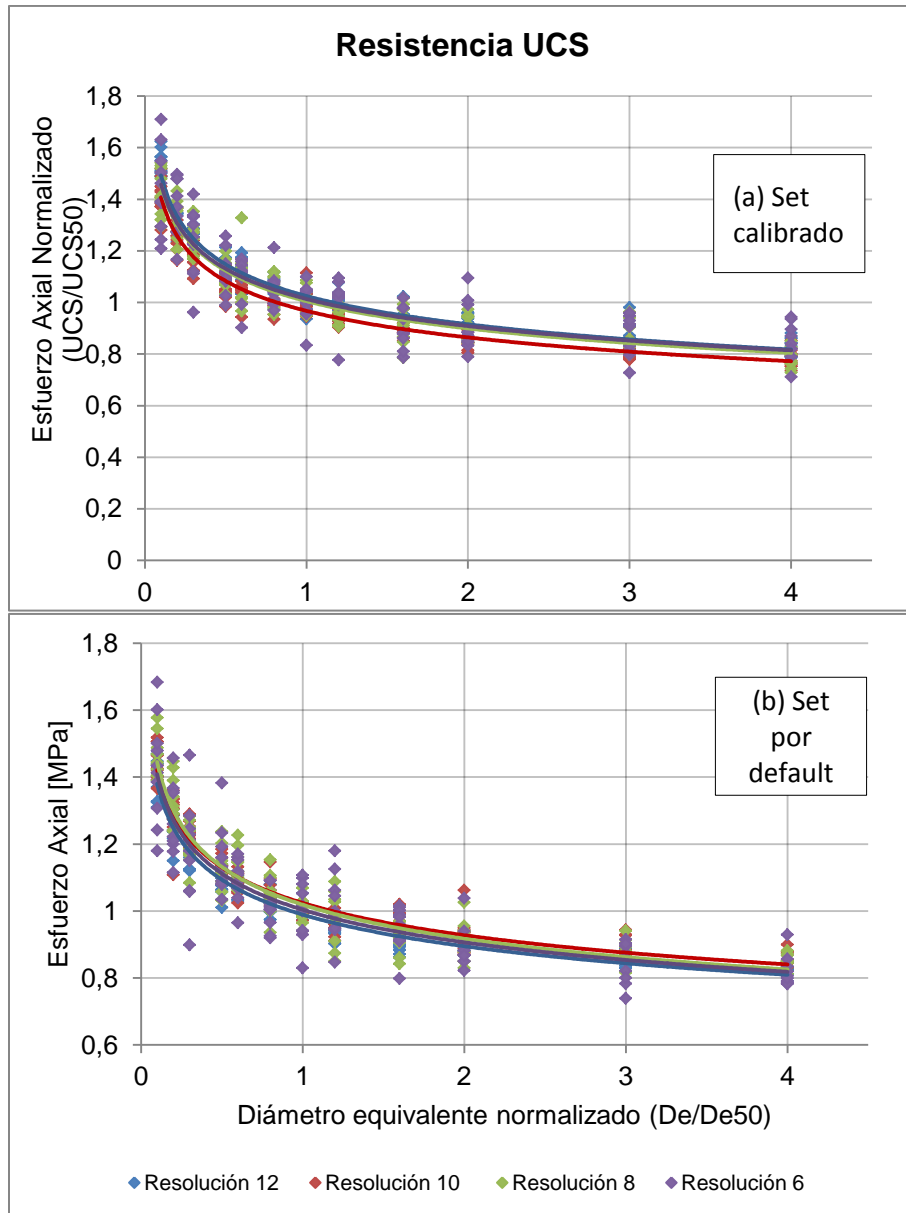
Figura 4-33. Efecto de la modificación de microparámetros en la resistencia UCS.

Realizado el ensayo de compresión uniaxial para distintos set de parámetros, se observa que las curvas obtenidas poseen el mismo comportamiento que la curva de escalamiento de Hoek & Brown (1983), corroborando que esta metodología se puede aplicar a cualquier set de parámetros. Existe poca variabilidad de los datos simulados debido a la resolución utilizada, ver en ANEXOS.

Este resultado permite simular distintas resistencias de la roca dependiendo del diámetro equivalente y de los micro-parámetros que esta tenga, permitiendo incorporar efecto escala a cada roca intacta del material generado.

### Variabilidad a distintas resoluciones de partículas

Los resultados, al variar la resolución de partículas para los set calibrado y por defecto, se muestran a continuación:



**Figura 4-34. Variabilidad de la resistencia UCS. (a) Set calibrado, (b) set por defecto.**

Se aprecia en ambos sets que el comportamiento de las curvas se asemejan entre sí frente al cambio de resolución de partículas, obteniendo valores cercanos de la resistencia a la compresión uniaxial, Tabla 4-18. A medida que disminuye la resolución se observa un aumento de la variabilidad de los resultados de ensayos UCS, debido al mayor efecto que produce un cambio en el arreglo de partículas, Tabla 4-19.

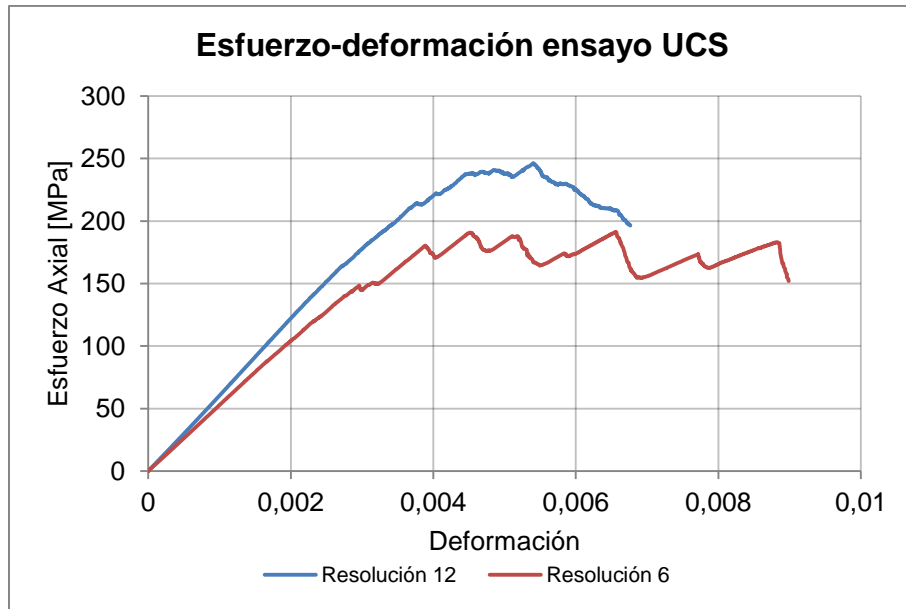
**Tabla 4-18. Valores UCS por resolución, set calibrado.**

Resolución	12	10	8	6
De/deo	UCS promedio [MPa]			
0,1	388	370	348	349
0,2	330	330	324	335
0,3	316	310	305	301
0,5	283	281	271	271
0,6	282	272	268	266
0,8	265	261	257	255
1	252	262	244	243
1,2	254	245	238	246
1,6	240	235	225	217
2	230	223	222	220
3	219	212	213	210
4	209	204	192	205

**Tabla 4-19. Desviación estándar por resolución, set calibrado.**

Resolución	12	10	8	6
De/deo	Desviación Estándar [MPa]			
0,1	12	18	22	40
0,2	9	15	17	28
0,3	8	12	14	34
0,5	12	13	12	20
0,6	12	10	27	20
0,8	10	10	15	17
1	9	13	13	18
1,2	9	6	12	21
1,6	9	7	17	20
2	10	8	11	23
3	12	7	15	18
4	9	9	10	17

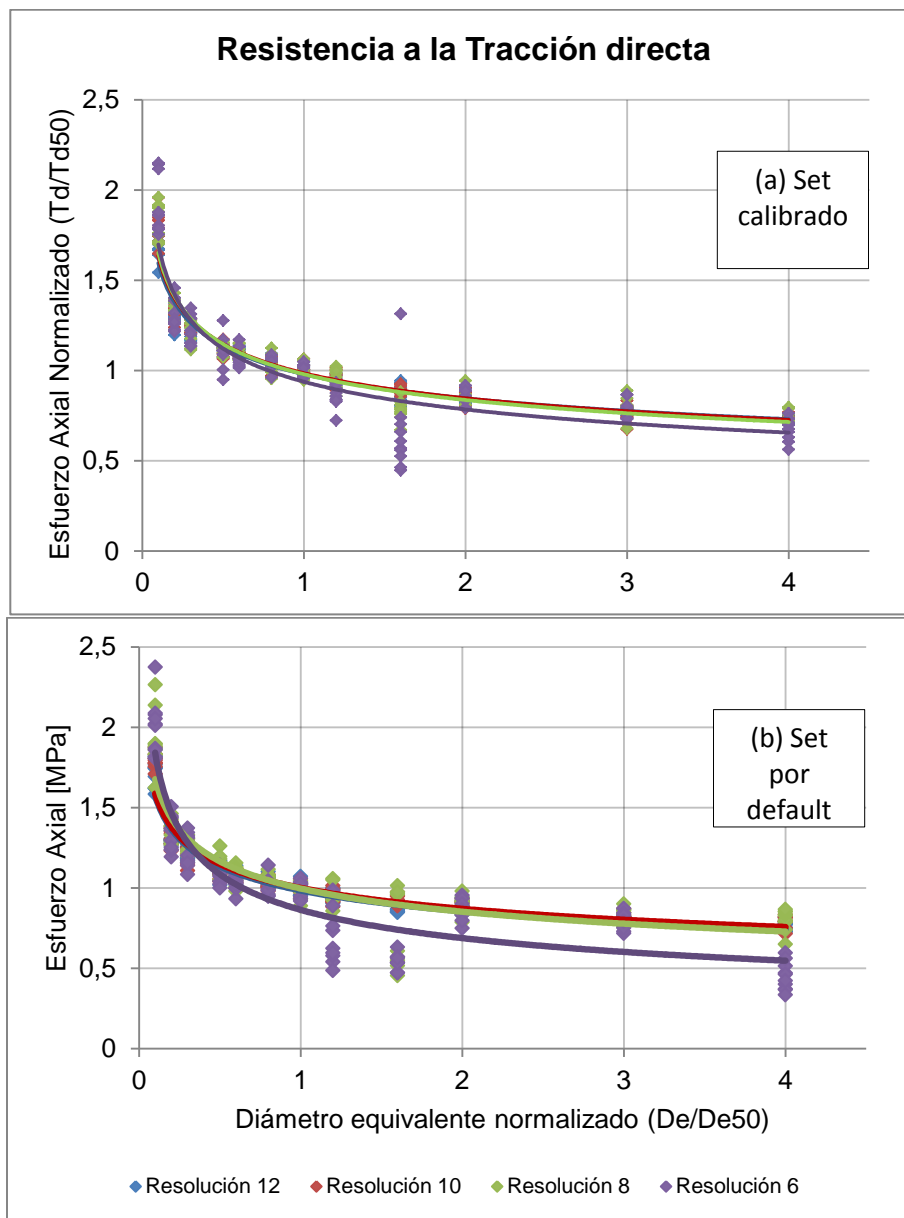
A pesar de obtener valores UCS cercanos, el comportamiento de las curvas varía entre la resolución 12 y 6:



**Figura 4-35. Diferencia entre las curvas de esfuerzo de formación a resolución 12 y 6.**

En la Figura 4-35 se observa dos curvas de ensayos UCS de diámetro 80 [mm] con diferente número de semilla (resolución 12: 343, 6: 998). El comportamiento para una resolución de 12 partículas se asemeja a roca intacta; en cambio, para resolución 6 corresponde a roca dúctil. Ambas curvas utilizaron el set de microparámetros calibrado. Esta tendencia se repite a lo largo de todos los diámetros ensayados.

Los resultados de esta metodología se muestran a continuación:



**Figura 4-36. Variabilidad de la resistencia a la tracción directa. (a) set calibrado, (b) set por defecto.**

El comportamiento de las curvas para los sets estudiados responde al supuesto realizado:

$$UCS/Td = a = cte$$

Donde se asume que los mecanismos de falla siguen la misma tendencia de Hoek & Brown (1983), por ende, constante.

El cambio de resolución genera diferencia en la resistencia a la tracción directa, en comparación con los ensayos UCS. Se observa que a resoluciones menores el valor de Td disminuye, Tabla 4-20, y la desviación estándar aumenta, Tabla 4-21.

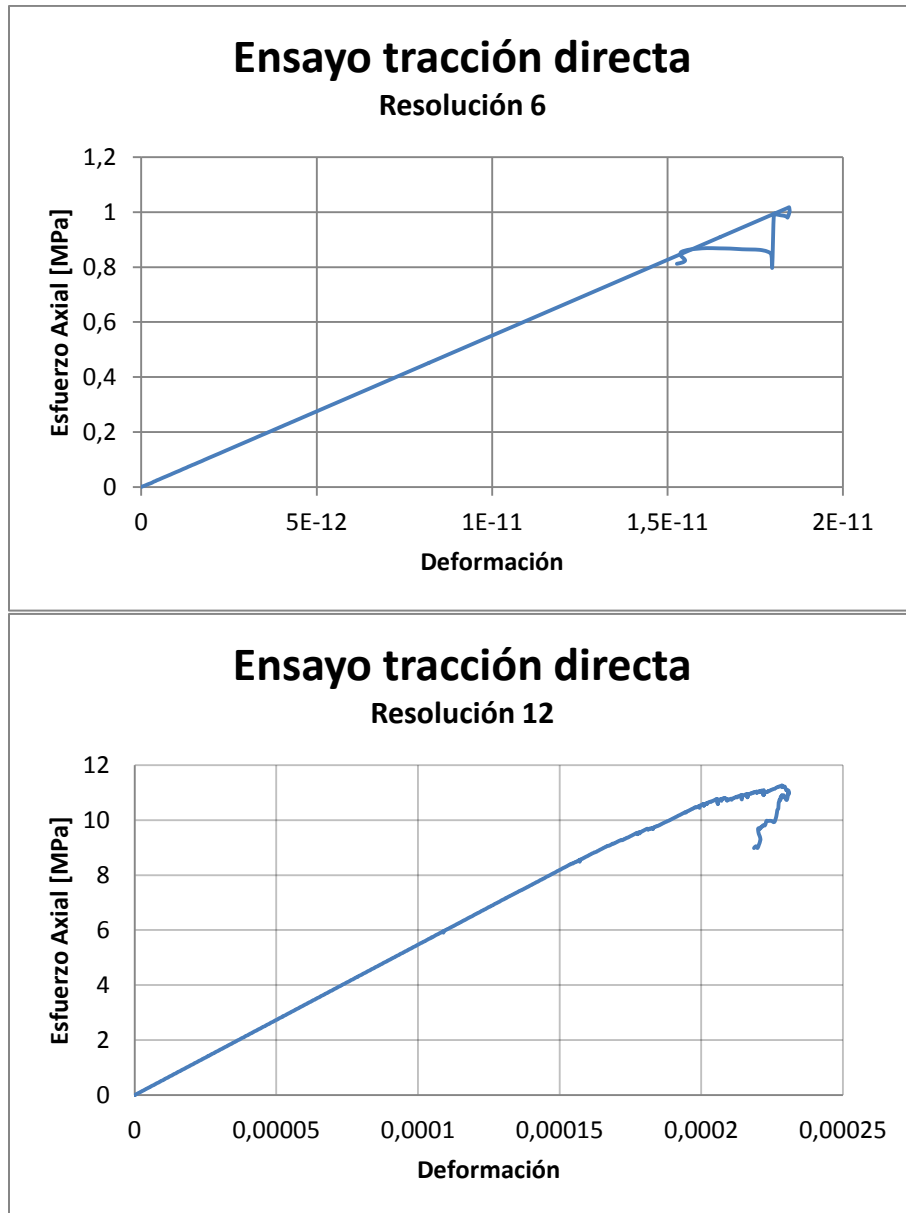
**Tabla 4-20. Valor de Td por resolución, set calibrado.**

Resolución	12	10	8	6
De/deo	Resistencia tracción promedio [MPa]			
0,1	22	23	23	23
0,2	22	17	17	16
0,3	22	16	15	15
0,5	21	14	14	13
0,6	20	14	14	13
0,8	20	14	13	12
1	19	13	12	12
1,2	19	12	12	10
1,6	18	11	10	8
2	11	11	11	10
3	10	10	10	9
4	10	9	9	8

**Tabla 4-21. Desviación estándar por resolución, set calibrado.**

Resolución	12	10	8	6
De/deo	Desviación Estándar [MPa]			
0,1	1,0	1,1	1,3	1,9
0,2	0,7	0,6	0,6	1,0
0,3	0,6	0,4	0,8	1,0
0,5	0,3	0,4	0,4	1,1
0,6	0,4	0,2	0,4	0,6
0,8	0,3	0,4	0,6	0,5
1	0,4	0,4	0,5	0,4
1,2	0,5	0,6	0,7	0,7
1,6	0,6	0,3	0,7	3,0
2	0,2	0,5	0,4	0,5
3	0,3	0,6	0,7	0,6
4	0,3	0,2	0,3	0,8

Un claro efecto de la resolución se observa en la Figura 4-37:



**Figura 4-37. Diferencia entre las curvas de tracción directa, resolución 12 y 6.**

Se aprecia que a resolución de 6 partículas la respuesta al ensayar la muestra no tiene sentido físico, por lo tanto, se considera que los valores obtenidos a esta resolución no son válidos. Este comportamiento se observa en todas las curvas de esfuerzo-deformación a esta resolución.

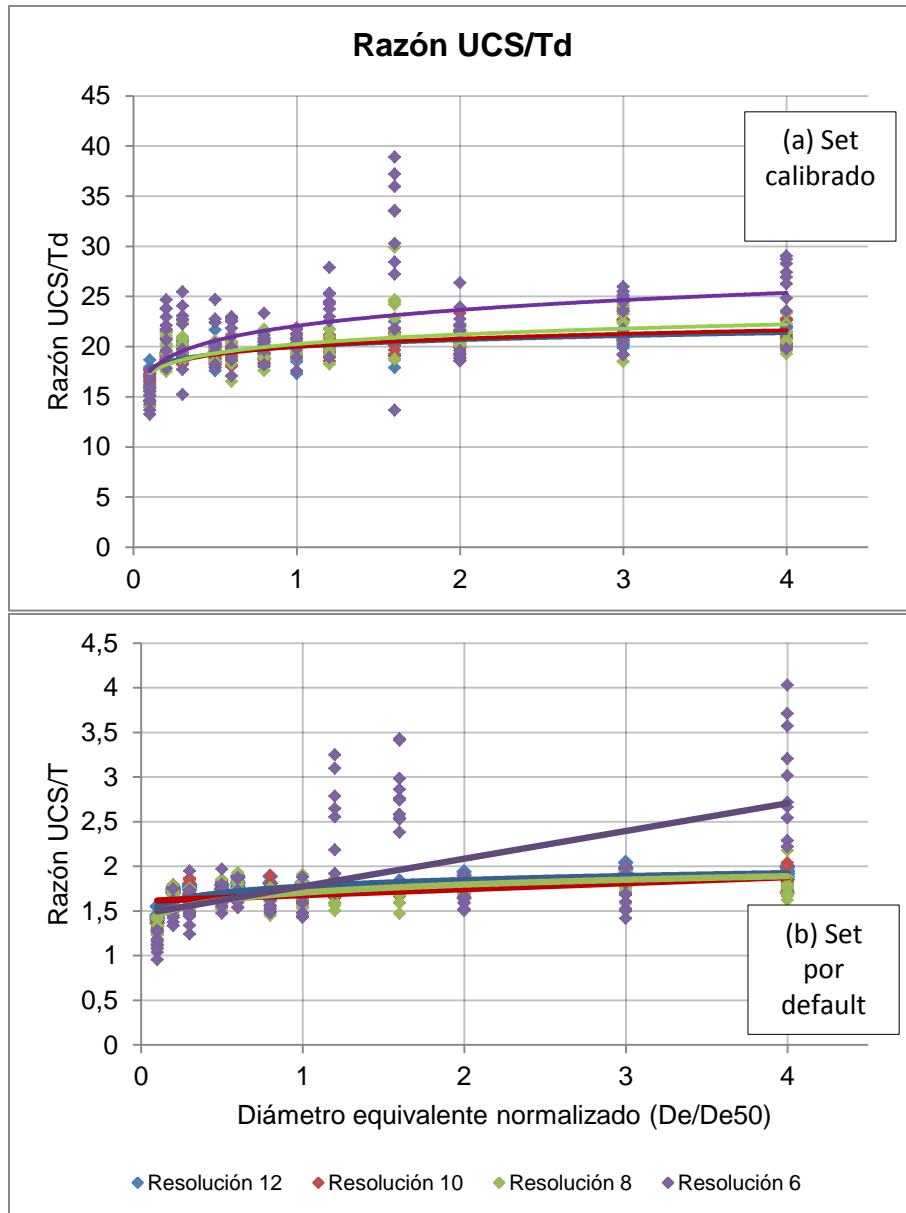


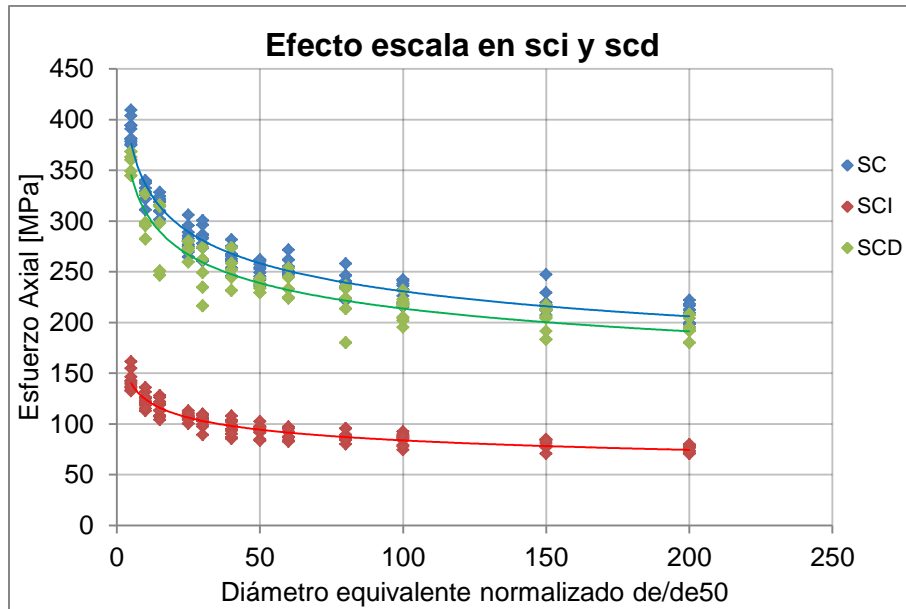
Figura 4-38. Variación de la razón UCS/Td. (a) set calibrado, (b) set por defecto.

Los resultados de la razón UCS/Td responden a la Ecuación 3-4, donde se asume un valor constante. Se observa que en ambos sets las resoluciones 12, 10 y 8 presentan comportamientos similares; en cambio, para la resolución 6 la alta variabilidad de los datos aleja los resultados de las tendencias observadas.

### Umbral de fracturamiento y curvas UCS

La modificación de micro-parámetros, que induce efecto escala, genera los siguientes resultados:





**Figura 4-39. Efecto del diámetro de la muestra en la resistencia a la compresión máxima, sci y scd.**

El efecto escala en esta metodología genera una respuesta similar a lo observado en el capítulo 4.4.1. La principal diferencia reside en las razones promedio de  $\sigma_{ci}/\sigma_c$  y  $\sigma_{cd}/\sigma_c$ . El primero, con un valor de 0,37, se encuentra dentro de los rangos [0,30-0,60], (Cai, Kaiser, Tasaka, Maejima, Morioka and Minami 2004). En cambio, se obtiene un valor de 0,93, el cual escapa del rango [0,65-0,85]. Se considera que la modificación de cierto micro-parámetros que definen al modelo afecta a los umbrales de fracturamiento.

Las curvas observadas a continuación corresponden al promedio de 10 simulaciones por diámetro ensayado:

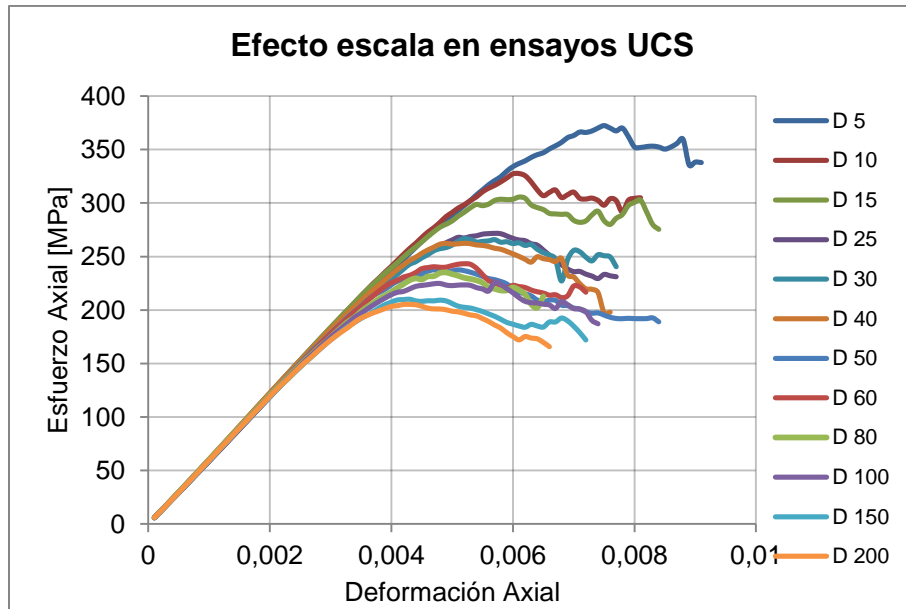


Figura 4-40. Cambio en la respuesta de la resistencia máxima uniaxial frente al cambio de diámetro de la probeta.

En ellas se observa que el aumento del diámetro de probeta disminuye el UCS y la ductilidad de la roca se mantiene inalterable. Con respecto a la propiedad de deformación,  $E$ , la Figura 4-41 detalla el efecto de escala en ella:

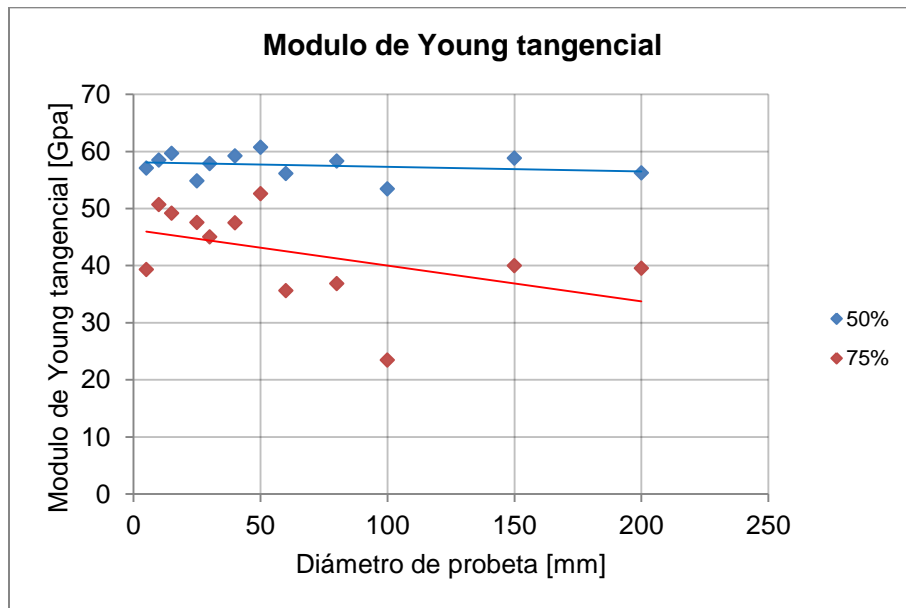
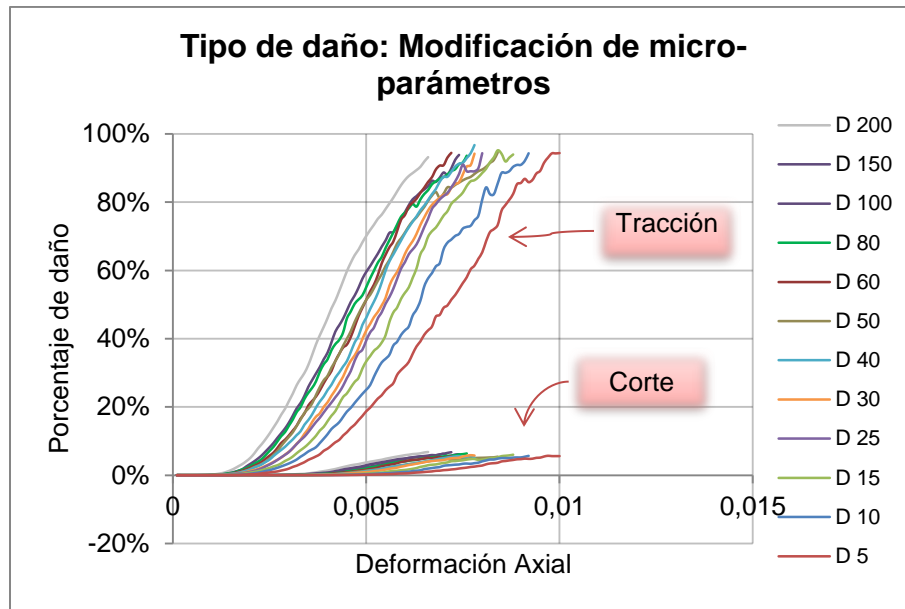


Figura 4-41. Efecto generado sobre el módulo de Young tangencial al 75% y 50% del peak.

Se aprecia que el módulo de Young tangencial de 50% del *peak* no se ve afectado al cambiar la escala, esto difiere con lo mencionado por Yoshinaka (2008), donde observa una disminución en  $E_{tan50\%}$ . En cambio, para  $E_{tan75\%}$  se observa una

disminución. La principal diferencia recae en los distintos valores de  $E_{tan}$  para ambos casos, diferencia que no es tan marcada en los casos de estudios (Yoshinaka, Osada, Park, Sasaki and Sasaki 2008).

### Porcentaje y tipo de daño en ensayos UCS



**Figura 4-42. Tipo de daño que se genera en ensayos UCS a distintos diámetros, utilizando modificación de micro-parámetros. Curvas promedios de 10 simulaciones.**

La modificación de micro-parámetros mantiene la tendencia mostrada por la metodología anterior, donde las partículas fallan por tracción. Se observa que a medida que aumenta el diámetro de probeta el daño se genera a menor deformación axial, relación que se observa en el Figura 4-39.

## 5 CONCLUSIÓN

La realización de ensayos sintéticos a diferentes tamaños de probeta evidenció la ausencia de efecto escala en el modelo BPM *enhanced* del software *PFC3D*, comportamiento esperable debido a la evidencia de la ausencia de tal efecto en la literatura disponible. Se determinó Para determinar la existencia de efecto escala, se amplió el rango de diámetros en 2 órdenes de magnitud, se ensayaron dichas probetas y se obtuvieron valores de compresión uniaxial iguales para cada configuración de probeta.

Frente a la ausencia tal efecto se incorporaron 2 criterios para lograr este resultado: (i) Liberación de vínculos y (ii) Modificación de microparámetros.

- (i) El primero genera una disminución en la resistencia a la compresión uniaxial, siguiendo la ley de escalamiento de Hoek & Brown, pero no es aplicable para otros sets de micro-parámetros, es decir, es necesario modificar los criterios de desactivación de vínculos para lograr el mismo comportamiento. Esta metodología puede generar planos preferenciales de falla que no se encuentran contenidos en las estructuras preliminares de la roca estudiada.
- (ii) La segunda metodología induce efecto escala siguiendo la ley de escalamiento de Hoek & Brown y además es aplicable a todo set de parámetros, una ventaja si se aplica a un macizo rocos con distintas litologías. En este caso se ha obligado al sistema a seguir la ley de escalamiento, no posee ningún trasfondo físico la aplicación al material sintético.

Manteniendo la resolución de partículas constante para cada diámetro de probeta se logró mantener la porosidad constante en todo el desarrollo de la presente memoria.

Adicionalmente a los objetivos planteados en el presente informe, se determinó que el modelo BPM *enhanced* no permite simular un comportamiento *post-peak* frágil al calibrar el set de microparámetros para la envolvente de falla de la roca en estudio, Mismo efecto se observa en la razón de Poisson, propiedad que no se puede simular.

## **6 RECOMENDACIONES**

Para el análisis de sensibilidad se recomienda utilizar un mayor número de simulaciones, con distintos números de semilla, para determinar una expresión ( $UCS = f(E_c, E_b, \varphi \dots)$ ) con una mejor correlación.

La modificación de microparámetros genera efecto escala en muestras sintéticas que representa a una roca intacta, por ende es necesario aplicar esta metodología a muestras sintéticas con red de estructuras y con distintas litologías. Para trabajos futuros se debe integrar este factor por medio de identificación de microparámetros para cada litología presente en las muestras a simular.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

Discrete numerical model for granular assemblies : Cundall, P A; Strack, O D L *Geotechnique*, V29, N1, March 1979, P47–65. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 8// 1979, 16(4), 77.

Underground excavations in rock : Hoek, E; Brown, E T London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980, 527P. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 4// 1981, 18(2), 27.

CAI, M., P. K. KAISER, Y. TASAKA, T. MAEJIMA, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 7// 2004, 41(5), 833-847.

CHO, N., C. D. MARTIN AND D. C. SEGO A clumped particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 10// 2007, 44(7), 997-1010.

CUNDALL, P. A. A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. *Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics*, 1971, 1.

DIEDERICHS, M. S. *Instability Of Hard Rockmasses: The Role of Tensile Damage and Relaxation*. Waterloo, 1999.

GUO, Y. AND J. K. MORGEN. Influence of normal stress and grain shape on granular friction: Results of discrete element simulations In *J. of Geophys. Res. SOLID EARTH* 2004.

HAIMSON, B. AND C. CHANG 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*, 2000, 37, 296.

HARRISON AND HUDSON. In., 1996.

ITASCA. *Comunicación directa*. In.

ITASCA. *Comunicación directa*. In., 2013.

JENSEN, R. P. AND E. AL. DEM Simulation of Granular Media - Structure Interface : Effects of Surface Roughness and Particle Shape. *Int. Jou. for Num. and Anal. Meth. in Geomec*, 1999, 23, 547.

JING, L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 4// 2003, 40(3), 283-353.

JUDD, W. R. Underground excavations in rock. *Engineering Geology*, 10// 1983, 19(3), 244-246.

KAWAKATA, H. AND A. CHO Three-dimensional observations of faulting process in Westerly granite under uniaxial and triaxial conditions by X-ray CT scan. *Tectonophysics* 313, 1999, 293.

KAWAKATA, H., A. CHO, T. KIYAMA, T. YANAGIDANI, et al. Three-dimensional observations of faulting process in Westerly granite under uniaxial and triaxial conditions by X-ray CT scan. *Tectonophysics*, 11/15/ 1999, 313(3), 293-305.

KOYAMA, T. AND L. JING Effects of model scale and particle size on micro-mechanical properties and failure processes of rocks—A particle mechanics approach. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 5// 2007, 31(5), 458-472.

MARTIN, C. D. AND N. A. CHANDLER The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 12// 1994, 31(6), 643-659.

MAS IVARS, D. *Bonded Particle Model for Jointed Rock Mass*. 2010.

MAS IVARS, D., D. POTYONDY, M. PIERCE AND P. CUNDALL. The smooth-joint contact model. In: *Proc 8th World Cong Comp Mech / 5th Eur Cong Comp Meth Appl Sci & Eng*. In., 2008.

POTYONDY, D., M. PIERCE, D. MAS IVARS AND P. CUNDALL. Adding joints to a bonded-particle model for rock. In., 2010.

POTYONDY, D. O. Parallel-bond refinements to match macroproperties of hard rock. *Continuum and Distinct Element Numerical Modelling in Geomechanics*, 2011.

POTYONDY, D. O. AND P. A. CUNDALL A bonded-particle model for rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 12// 2004, 41(8), 1329-1364.

SCHÖPFER, M. P. J., S. ABE, C. CHILDS AND J. J. WALSH The impact of porosity and crack density on the elasticity, strength and friction of cohesive granular materials: Insights from DEM modelling. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2// 2009, 46(2), 250-261.

SUZUKI, K. **APLICACIÓN DE LA TÉCNICA SYNTHETIC ROCK MASS A ESCALA DE LABORATORIO**. 2013.

THOMAS, P. A. AND J. D. BRAY Capturing Nonspherical Shape of Granular Media with Disk Clusters J. of Geot. and Geoenvi. Eng, 1999, 125, 169.

YOSHINAKA, R., M. OSADA, H. PARK, T. SASAKI, et al. Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect. Engineering Geology, 2/1/ 2008, 96(3-4), 173-186.

ZHANG, Q., H. ZHU, L. ZHANG AND X. DING Study of scale effect on intact rock strength using particle flow modeling. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 12// 2011, 48(8), 1320-1328.

## **8 ANEXOS**

### **8.1 Inducción de efecto escala**

A continuación se detallan los códigos utilizados para desarrollar la inducción de efecto escala en *PFC3D*:

#### **8.1.1 Código de Liberación de Vínculos**

```
def md_pbond
; ----- Return (1) iff [cp] has an intact parallel bond present.
; INPUT: cp
  _md_pbond = 0
  if c_pb(cp) # null then
    _Nazar=urand
    if _Nazar > 0.08 then
      _md_pbond = 1
    else
      _md_pbond=0
    end_if
end_if
```

```
md_pbond = _md_pbond
end
```

### 8.1.2 Código de Modificación de Micro-parámetros

```
def md_pbprops
; ----- Set parallel-bond properties for all pbonds in model.
; INPUT:
;   The parallel-bond microparameters:
;   pb_all - all load to be carried in pbonds (global param.)
;   pb_Rmult - radius multiplier
;   pb_mfac - moment-contribution factor
;   pb_Ec - Young's modulus of each parallel bond
;   pb_krat - ratio of parallel-bond normal to shear stiffness
;   INTRA-CLÚSTER STRENGTHS: (w/i clústers, or each bond if no clústers)
;   pb_sn_mean - mean value of normal strength (stress units)
;   pb_sn_sdev - std. deviation of normal strength (stress units)
;   pb_coh_mean - mean value of cohesion (stress units)
;   pb_coh_sdev - std. deviation of cohesion (stress units)
;   pb_phi - friction angle
;   For backwards compatibility with PFC2D/3D 4.0 subversions < 142:
;   If pb_ss_mean is non-zero, then do not use coh and phi.
;   pb_ss_mean - mean value of shear strength (stress units)
;   pb_ss_sdev - std. deviation of shear strength (stress units)
;   -----
```



```

; The two particle-particle microparameters:
; ([ba_fric] is set by [md_ballfric])
; md_set_balldeform - boolean: if=1, set ball deformability props
;
; using following 2 variables:
; ba_Ec - Young's modulus at each particle-particle contact
; ba_krat - ratio of particle normal to shear stiffness (kn/ks)
;
if md_set_balldeform = 1 then
  md_balldeform
end_if
;
cp = contact_head
loop while cp # null
  if md_pbond = 1 then ; parallel bond present
    pbp = c_pb(cp)
    _mp_ent = cp
    _idx = _mp_idx
    ;
    pb_rad(pbp) = pb_Rmult(_idx)
    pb_mfac(pbp) = pb_mcf(_idx)
    _radsum = b_rad(c_ball1(cp)) + b_rad(c_ball2(cp))
    _kn = pb_Ec(_idx) / _radsum
    _ks = _kn / pb_krat(_idx)
    pb_kn(pbp) = _kn
  end_if
end_loop

```

pb\_ks(pbp) = \_ks

; Variación de microparámetros

***UCS50= 272***

***R\_UCSTd=272/13.3***

***HBUCS = UCS50\*(mv\_Rc/(25e-3))<sup>(-0.18)</sup>***

***HBTD = UCS50\*(mv\_Rc/(25e-3))<sup>(-0.18)</sup>/R\_UCSTd***

***sn= HBTD/0.474\*1e6***

***Coh = ((HBUCS)/(1.59\*(sn/1e6)<sup>0.43</sup>))<sup>(1/0.65)</sup>***

\_mean = sn

\_stddev = 0.2\*sn

\_nstr = md\_val\_normdist

pb\_nstrength(pbp) = \_nstr

if pb\_ss\_mean(\_idx) # 0 then

\_mean = pb\_ss\_mean(\_idx)

\_stddev = pb\_ss\_sdev(\_idx)

\_sstr = md\_val\_normdist

pb\_sstrength(pbp) = \_sstr

else

\_mean = Coh\*1e6

\_stddev = 0.2\*Coh\*1e6

\_coh = md\_val\_normdist

pb\_coh(pbp) = \_coh

pb\_fa(pbp) = pb\_phi(\_idx)

```

        end_if
;-----
if pb_all # 0 then ; Set contact stiffnesses to zero.
    c_kn(cp) = 0.0
    c_ks(cp) = 0.0
end_if
end_if
cp = c_next(cp)
end_loop
if pb_all # 0 then ; When pbond is deleted, allow contact stiffnesses
    command      ; to be derived from ball stiffnesses (see pb_allDEL).
        SET fishcall #FC_PB_DEL pb_allDEL
    end_command
end_if
end
;-----
def pb_allDEL
    cp = fc_arg(0)
    c_knset(cp) = 0
    c_ksset(cp) = 0
end

```

### 8.1.3 Principales datos obtenidos por set simulado

Tabla 8-1. Ensayos UCS para distintos diámetros de probeta, set calibrado.

De/deo	UCS promedio [MPa]	Desviación Estándar [MPa]	UCS Normalizado	Desviación Estándar Normalizada
0,1	388	12	1,54	0,066
0,2	330	9	1,31	0,063
0,3	316	8	1,25	0,061
0,5	283	12	1,12	0,079
0,6	282	12	1,12	0,076
0,8	265	10	1,05	0,075
1	252	9	1,00	0,070
1,2	254	9	1,01	0,069
1,6	240	9	0,95	0,075

Tabla 8-2. Ensayos UCS para distintos diámetros de probeta, set default

De/deo	UCS promedio [MPa]	Desviación Estándar [MPa]	UCS Normalizado	Desviación Estándar Normalizada
0,1	71	3	1,39	0,065
0,2	64	2	1,26	0,064
0,3	60	2	1,18	0,061
0,5	56	1	1,10	0,044
0,6	55	1	1,08	0,053
0,8	52	2	1,01	0,059
1	51	1	1,00	0,052
1,2	48	1	0,94	0,047
1,6	45	1	0,89	0,049

**Tabla 8-3. Ensayos UCS para distintos diámetros de probeta, set 3.**

De/deo	UCS promedio [MPa]	Desviación Estándar [MPa]	UCS Normalizado	Desviación Estándar Normalizada
0,1	62	2	1,43	0,045
0,2	55	1	1,26	0,035
0,3	52	2	1,19	0,058
0,5	48	1	1,10	0,049
0,6	47	1	1,06	0,045
0,8	45	1	1,03	0,039
1	44	1	1,00	0,040
1,2	42	1	0,96	0,040
1,6	40	1	0,92	0,045

**Tabla 8-4. Ensayos UCS para distintos diámetros de probeta, set 4.**

De/deo	UCS promedio [MPa]	Desviación Estándar [MPa]	UCS Normalizado	Desviación Estándar Normalizada
0,1	86	4	1,42	0,073
0,2	77	2	1,27	0,052
0,3	72	2	1,18	0,051
0,5	66	2	1,09	0,055
0,6	65	2	1,07	0,052
0,8	63	1	1,04	0,046
1	61	1	1,00	0,048
1,2	59	2	0,96	0,050
1,6	54	1	0,89	0,049