

# Simulación de ensayos triaxiales de granito mediante el código PFC

## Numerical Simulation of Triaxial Tests on Granite with PFC3D Code

Uxía Castro Filgueira<sup>1\*</sup>, Leandro R. Alejano<sup>2</sup>, Diego Mas Ivars<sup>3</sup>, Javier Arzúa<sup>4</sup>

### Resumen

Uno de los problemas más relevantes en la mecánica de rocas es determinar el comportamiento tenso-deformacional completo de las rocas tanto a escala de laboratorio como de obra. Mientras que hay algunos procedimientos estándar sugeridos para calcular los parámetros elásticos y del criterio de pico a partir de los datos de laboratorio, el comportamiento post-rotura es objeto de investigación al objeto de definir de manera apropiada el marco teórico y los parámetros necesarios para representarlo de manera suficientemente aproximada. Arzúa & Alejano (2013) llevaron a cabo un exhaustivo programa de laboratorio para estudiar el comportamiento tenso-deformacional completo de muestras intactas de granito *Blanco Mera*. Estos resultados se han usado en este estudio para ajustar los parámetros micro-mecánicos en el *Bonded-Particle Model de PFC* para intentar reproducir el comportamiento observado en el laboratorio. Primero, se ha intentado realizar con el modelo *parallel-bond* definido en Potyondy & Cundall (2004) pero se han encontrado dificultades para reproducir la respuesta friccional real de la muestra de roca. Para superar estos problemas, se ha utilizado el denominado modelo *flat-joint* definido por Potyondy (2012) para simular los ensayos, mejorando la exactitud de las simulaciones y permitiendo representar en forma razonablemente aproximada las principales tendencias del comportamiento post-rotura.

**Palabras clave:** comportamiento tenso-deformacional, simulación numérica, *Particle Flow Code*, *parallel-bond*, *flat-joint*.

### Abstract

*One of the most relevant problems in rock mechanics is to determine the complete stress-strain behavior of rocks in both laboratory and field scale. Whereas there are some suggested standard procedures to compute elastic and peak criterion parameters starting from laboratory data, post-failure behavior is still under research in order to appropriately define theoretical frameworks and parameters to represent this behavior. Arzúa & Alejano (2013) carried out a comprehensive laboratory program to study the complete stress-strain behavior of intact samples of Blanco Mera granite. We use these results to fit micro-mechanical parameters in the bonded-particle model to try to recover the observed laboratory behavior. First, we have tried with the parallel-bond model defined in Potyondy & Cundall (2004), but we have found difficult to recover the actual frictional response of rock sample. To overcome these difficulties the flat-joint model defined by Potyondy (2012) was then used for modeling and the results obtained improve the quality of the simulations, which are also able to reproduce the main post-failure behavioral trends.*

**Keywords:** *Stress-strain behaviour, numerical simulation, Particle Flow Code, parallel-bond, flat-joint.*

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Durante años, muchos autores centraron sus trabajos en estudiar el comportamiento de las rocas y los macizos rocosos hasta la resistencia de pico. Sin embargo, durante las últimas décadas, se ha comenzado a trabajar en intentar comprender como los macizos rocosos se comportan tras la rotura, es decir, después de que se sobrepase la resistencia de pico.

Este comportamiento post-pico es relevante para poder comprender algunos de los problemas más desafiantes de la mecánica de rocas, como el comportamiento en los

procesos de hundimiento en minería masiva, la evolución de los macizos fracturados en condiciones cambiantes de tensión o el comportamiento a largo plazo de depósitos de residuos nucleares.

El comportamiento post-rotura de una roca incluye la transición desde la resistencia de pico a la residual, que lleva consigo una deformación volumétrica variable. Hoek & Brown (1997) propusieron, basándose en su experiencia en ingeniería y en el análisis numérico de una variedad de casos reales, tres tipos básicos de comportamiento post-rotura para macizos rocoso (fig. 1). Las tendencias generales en post-rotura tienden a clasificarse en: comportamiento elasto-frágil asociado a los macizos rocosos de buena calidad (GSI>70), comportamiento elasto-plástico perfecto relacionado con los macizos rocosos de baja calidad (GSI<30), y comportamiento elasto-plástico con reblandecimiento para los casos de macizos rocosos que demuestran una calidad geotécnica media (valores de GSI entre 30 y 60).

En el laboratorio *John P. Harrison de Mecánica de Rocas* de la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad de Vigo, se ha estudiado mediante ensayos de compresión el comportamiento tenso-deformacional del granito Blanco

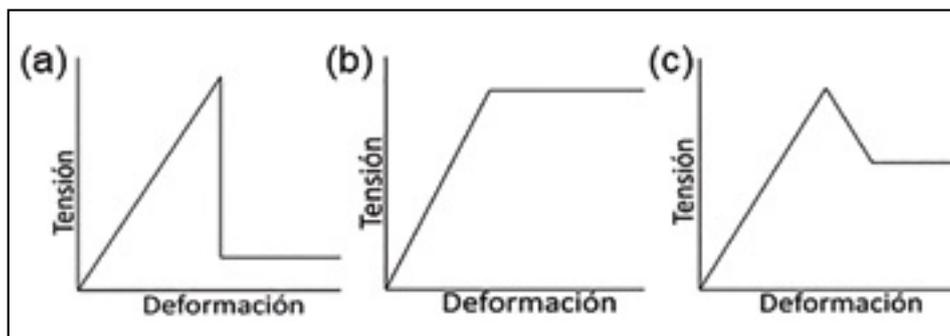
\* Autora de contacto: [ucastro@uvigo.es](mailto:ucastro@uvigo.es)

<sup>1</sup> Ingeniera de minas (Universidad de Vigo).

<sup>2</sup> Ingeniero de minas. Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid.

<sup>3</sup> Ingeniero de minas. Doctor en Ingeniería Geológica por la KTH Royal Institute of Technology (Suecia).

<sup>4</sup> Ingeniero de Minas. Doctor por la Universidad de Vigo.



**Figura 1.** Comportamientos post-rotura sugeridos: (a) comportamiento elasto-frágil, (b) comportamiento elasto-plástico perfecto, (c) comportamiento elasto-plástico con reblandecimiento. De acuerdo con Hoek & Brown (1997).

Mera, con particular énfasis en la fase de post-rotura (Arzúa & Alejano 2013, Arzúa et al. 2013).

En el presente estudio, se ha intentado simular el comportamiento mecánico de este granito mediante el código PFC (*Particle Flow Code*) de la compañía Itasca (Itasca 2014). Anteriormente se realizaron pruebas mediante modelos continuos, tales como FLAC (Arzúa et al. 2013), que han mostrado resultados razonablemente ajustados, aunque también se han observado algunos problemas. El primer paso es simular el comportamiento de probetas intactas, con el objetivo de ajustar las diferentes micro-propiedades que definen el comportamiento macroscópico del granito, lo cual es el principal objetivo de esta investigación.

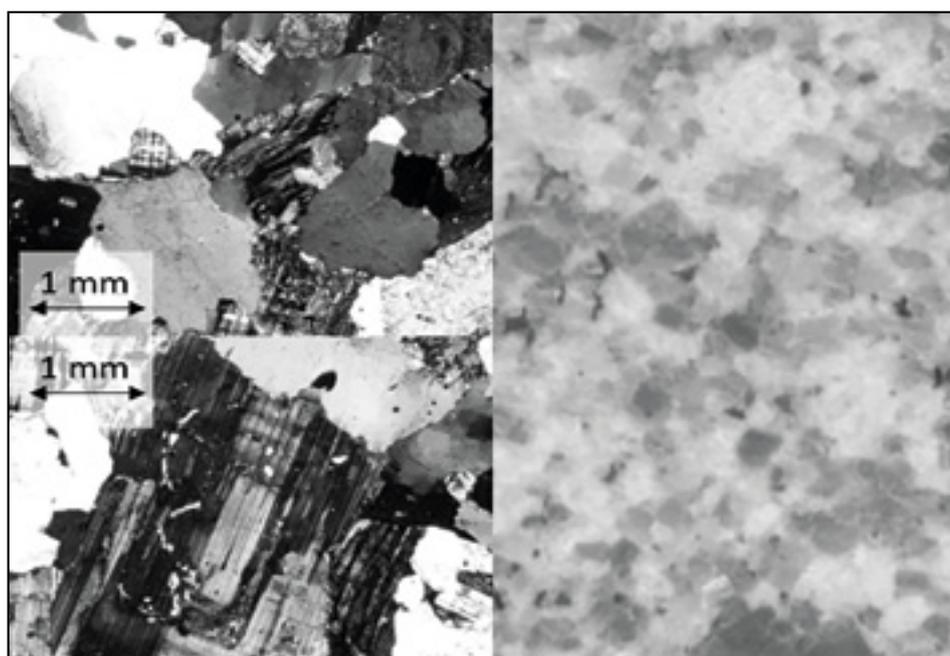
### 1.2. Granito Blanco Mera

El granito Blanco Mera es una roca dura originaria de Galicia y ampliamente usada como material de construcción y ornamental que muestra un color blanco brillante y una textura de grano grueso con granos en un rango de 1 a 6 mm (fig. 2). Presenta una resistencia a compresión simple media de en torno a 110 MPa.

Antes de comenzar las simulaciones, es preciso conocer las macro-propiedades del granito Blanco Mera, las cuales se han obtenido a partir de los precitados ensayos de laboratorio (Arzúa & Alejano 2013). La tabla 1 muestra las macro-propiedades medias en términos de parámetros elásticos (módulo de Young y coeficiente de Poisson) y resistencias de pico y residual para dos presiones de confinamiento (2 y 10 MPa), obtenidas a partir de los ensayos de laboratorio y usadas para calibrar el modelo PFC objeto de este estudio.

**Tabla 1.** Macro-propiedades del granito Blanco Mera (Arzúa & Alejano 2013)

Propiedad	$\sigma_3=2$ MPa	$\sigma_3=10$ MPa
E [GPa]	43.075	45.515
$\nu$	0.1675	0.1725
$\sigma_{peak}$ [MPa]	180.18	265.88
$\sigma_{residual}$ [MPa]	36.5	91.75
$\sigma_t$ [MPa]	2.58 ( $\sigma_3=0$ MPa)	



**Figura 2.** Micrografías de una lámina delgada y una muestra del granito Blanco Mera.

## 2. EL BONDED-PARTICLE MODEL

### 2.1. Introducción

Potyondy & Cundall (2004) argumentan que una roca se comporta como un material granular cementado con granos de formas complejas, en el cual, tanto los granos como el cemento son deformables y el cemento puede romper, y que un modelo conceptual puede, en principio, explicar todos los aspectos del comportamiento mecánico. Teniendo esto en mente, los autores definen el *bonded-particle model* (BPM) para rocas como un modelo que consiste en un empaquetamiento denso de partículas de tamaño no uniforme circulares (2D) o esféricas (3D) que se encuentran unidas en sus puntos de contacto y cuyo comportamiento mecánico puede ser simulado mediante el programa de elementos discretos PFC (*Particle Flow Code*).

Los modelos de las probetas de granito se crean usando el BPM como material base. Las probetas se crean en un recipiente material, donde los granos son *balls* o *clumps* y el cemento puede estar formado tanto por contactos del tipo *parallel-bonded*, como del tipo *flat-jointed* (Potyondy 2015).

Se crearon tres grupos de probetas diferentes (fig. 3) uno para cada tipo de ensayos: uno para los ensayos de compresión simple (54mm × 108mm), uno para los ensayos triaxiales (54mm × 100mm), y uno para los ensayos de resistencia a tracción (54mm × 135mm) recreando las probetas reales ensayadas que seguían las indicaciones de los métodos de ensayos de laboratorio sugeridos por la ISRM (2007).

### 2.2. Material «parallel-bonded»

Un material *parallel-bonded* es aquel en el que el modelo que define el comportamiento del contacto es el *parallel-bond*. Este modelo de contacto proporciona el contacto mecánico del cemento situado entre las partículas. Este cemento proporciona una interacción entre las partículas, las cuales tienen la posibilidad de deslizarse, permitiendo también la transmisión tanto de fuerzas como de momentos entre los granos.

El modelo *parallel-bond* proporciona el comportamiento de dos interfaces: una interfaz infinitesimal, elástica lineal (sin resistencia a tracción) y con fricción que soporta una fuerza; y una interfaz de tamaño finito, elástica lineal y *bonded* que soporta una fuerza y un momento (fig. 4). La primera interfaz es equivalente al modelo lineal: no resiste una rotación relativa, y el deslizamiento se acomoda imponiendo un límite de Coulomb en la fuerza de cizalladura. La segunda interfaz se denomina *parallel-bond*, porque, cuando está unida (*bonded*), actúa en paralelo con la primera interfaz, resiste a una rotación relativa, y su comportamiento es elástico lineal hasta que se excede el límite de la resistencia y se rompe la unión, convirtiéndolo en desunido (*unbonded*). Cuando la segunda interfaz está desunida (*unbonded*) no se puede soportar ninguna carga. El modelo *parallel bond* desunido es equivalente al modelo lineal, que no resiste rotaciones relativas.

El *parallel bond* en 3D se puede concebir como un conjunto de muelles con rigideces normal y cortante constantes, uniformemente distribuidos sobre las superficies de la sección circular, situados en el plano de contacto y

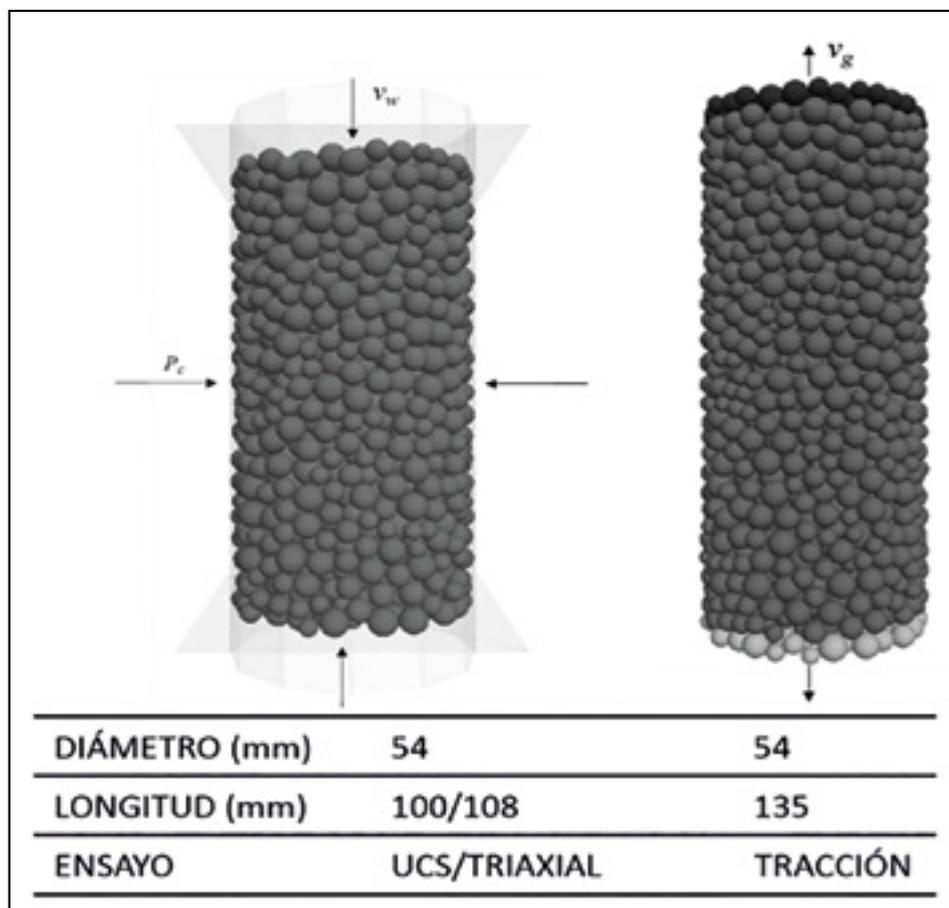


Figura 3. Probetas creadas con PFC.

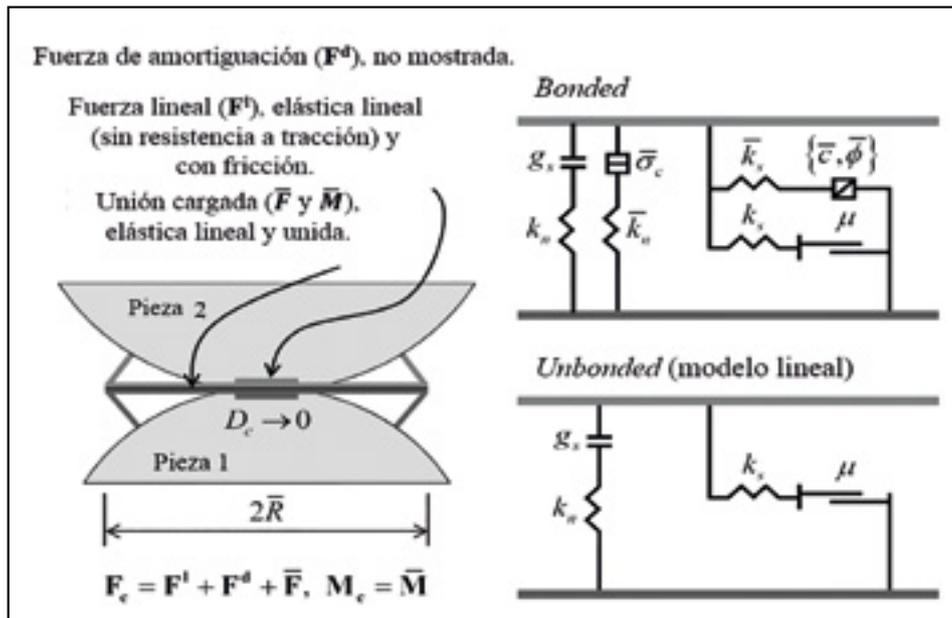


Figura 4. Comportamiento y componentes reológicos del modelo *parallel bond* con amortiguación inactiva (Itasca 2014).

centrado en el punto de contacto. Estos muelles actúan en paralelo con el muelle de la componente lineal. El movimiento relativo en el contacto, que ocurre después de que el *parallel bond* sea creado, causa una fuerza y un momento que se desarrollan dentro del *bond material*. Esta fuerza y momento actúan sobre las dos piezas en contacto y pueden relacionarse con esfuerzos normales y cortantes máximos, actuando en el *bond material* en la periferia de la unión. Si cualquiera de las tensiones máximas excede su correspondiente resistencia de unión, el *parallel bond* rompe, y el *bond material* se elimina del modelo junto con su fuerza, su momento y sus rigideces acompañantes.

### 2.3. Material «flat-jointed»

El material *flat-jointed* en 3D (fig. 5) consta de partículas unidas mediante contactos *flat-joint* de modo que la superficie efectiva de cada cuerpo se define por las superficies

teóricas de sus piezas, que interactúan en cada contacto *flat-joint* con la superficie teórica de la pieza en contacto contigua.

En el material *flat-jointed*, los granos tienen caras, esto es, son *faced*. Cada grano se representa como un núcleo esférico y un número de caras planas o *skirted faces*. Los granos *faced* se crean cuando el modelo *flat-joint* se instala en el contacto de los granos. Este modelo proporciona el comportamiento macroscópico de un tamaño finito, elástico lineal y *bonded* o con fricción, que puede soportar daño parcial (fig. 6). La interfaz se discretiza en elementos, y cada elemento puede estar tanto unido (*bonded*) como desunido (*unbonded*), y la rotura de cada elemento *bonded* contribuye al daño parcial de la interfaz.

El comportamiento de un elemento unido (*bonded*) es elástico hasta que se excede la resistencia límite y la unión se rompe, convirtiendo al elemento en *unbonded*; el comportamiento de un elemento *unbonded* es elástico lineal y

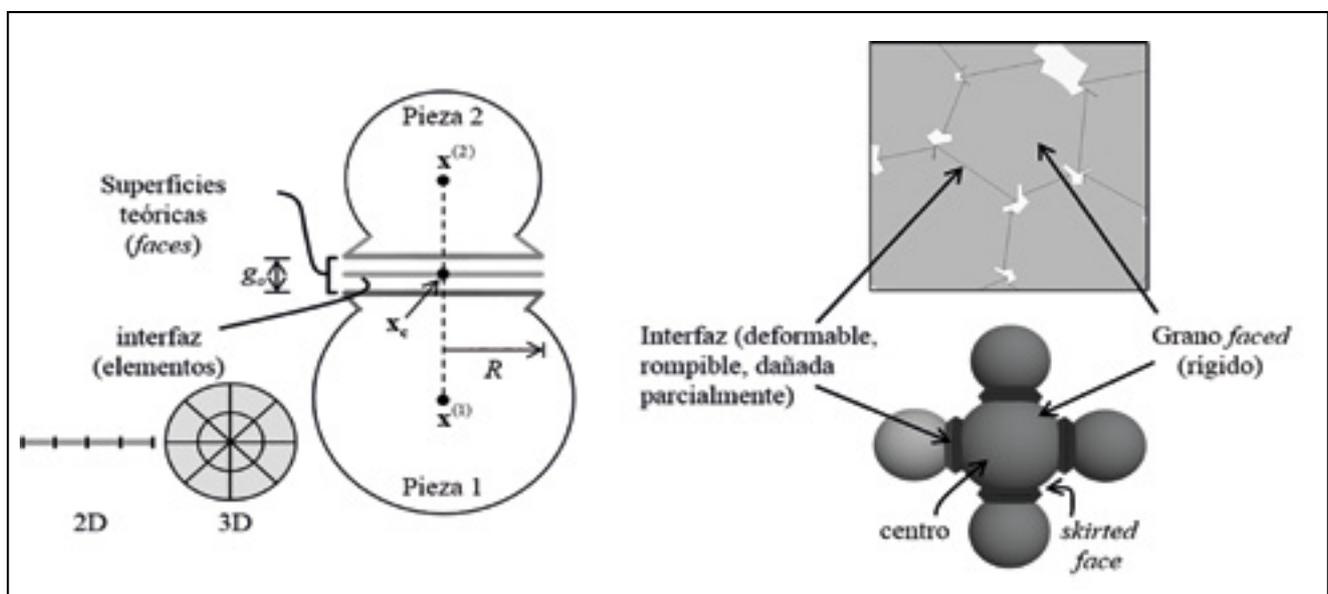


Figura 5. Contacto *flat-joint* (izquierda) y material *flat-jointed* (derecha) (Itasca, 2014).

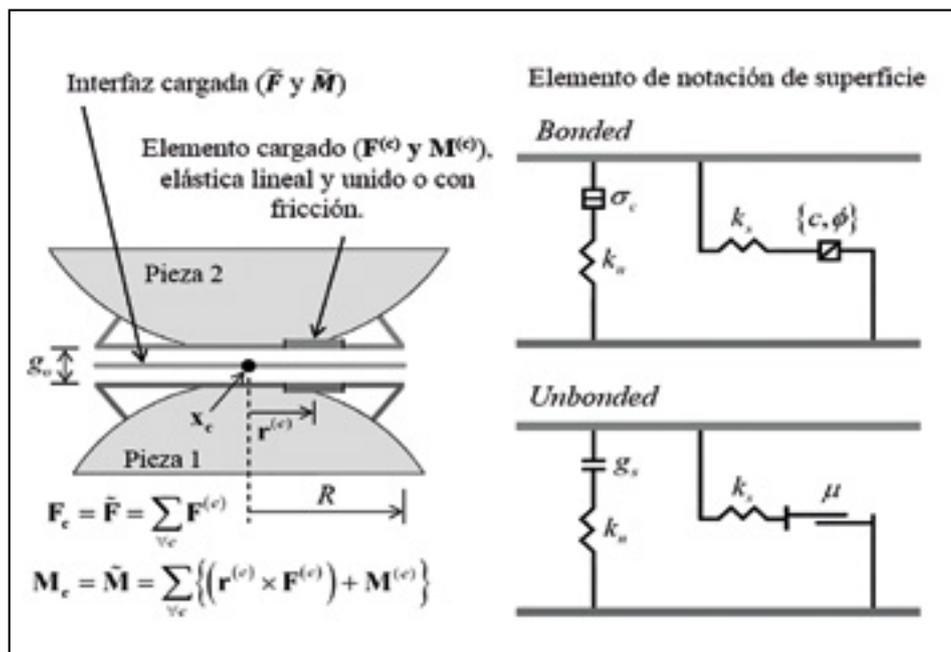


Figura 6. Comportamiento y componentes reológicas de un modelo flat-jointed (Itasca, 2014).

con fricción, con deslizamiento acomodado mediante la imposición de un límite de Coulomb en la fuerza de cizalladura. Cada elemento soporta una fuerza y un momento que obedecen la ley fuerza-desplazamiento, mientras que la respuesta fuerza-desplazamiento de la interfaz flat-joint es un comportamiento emergente que incluye la evolución desde un estado completamente bonded a un estado completamente unbonded y friccional.

Si el desplazamiento relativo de un contacto flat-joint es mayor que el diámetro del flat-joint, entonces las caras adyacentes pueden eliminarse (porque el contacto desaparece). Esto hace los granos asociados localmente esféricos. Si estos granos se ponen en contacto, el comportamiento será aquel de una interfaz entre superficies esféricas.

### 3. CALIBRACIÓN

Cuando se realiza la calibración de un material, es necesario definir y ajustar diferentes parámetros. Cada modelo de contacto tiene sus propias micro-propiedades, las cuales se pueden agrupar en propiedades de empaquetamiento, de partículas y de contactos.

#### 3.1. Material «parallel-bonded»

Los parámetros que definen el material parallel-bonded pueden agruparse en tres bloques (tabla 2): en el primero, se incluyen los asociados al procedimiento de creación del material; en el segundo, se agrupan las propiedades de los granos; y en el último grupo, se recogen las propiedades asociadas al modelo de contacto parallel-bond.

Para la elección de los parámetros del material parallel-bonded se siguieron las recomendaciones de Potyondy & Cundall (2004), y en la experiencia previa de los propios autores.

Tabla 2. Micro-propiedades del granito Blanco Mera para el modelo parallel-bond

Micro-propiedad	Descripción	Valor
$D_{max}/D_{min}$		1.66
$N_f$	Nº mínimo de contactos por grano	3
$g_0$	<b>Installation gap</b> [mm]	0.5
$\rho$	Densidad [kg/m³]	2600
$E$	Módulo de Young [GPa]	37
$k_n/k_s$	Relación de rigideces	1.5
$\mu$	Coefficiente de fricción	0.5
$\lambda$	<b>Radius multiplier</b>	1.0
$\beta$	<b>Moment-contribution factor</b>	1.0
$E$	Módulo de Young [GPa]	37
$k_n/k_s$	Relación de rigideces	1.5
$\sigma_c$	Resistencia a tracción del contacto [MPa]	113
$c$	Cohesión del contacto [MPa]	113
$\phi$	Ángulo de fricción [°]	0

La relación  $D_{max}/D_{min}$  puede ser igual o mayor que 1, produciendo, respectivamente, una disposición cristalina o un empaquetamiento isotrópico arbitrario. Potyondy & Cundall (2004) argumentan que la relación  $D_{max}/D_{min}$  igual a 1.66 es la que mejor representa a una roca dura, como es el granito. El radius multiplier ( $\lambda$ ) establece el valor del radio del parallel-bond. Cuando el radio es igual a 1, el cemento rellena completamente el hueco entre las partículas, cuando es igual a 0, el comportamiento del material es similar al de un material granular.

Los módulos de Young de las partículas y del cemento se calibran para obtener el módulo de Young de la roca, y las relaciones de rigideces para ajustar el coeficiente de Poisson. El coeficiente de fricción se establece igual a 0.5 de acuerdo a Potyondy & Cundall (2004) y dado que este coeficiente no afecta al comportamiento pre-pico, se considera como un valor no nulo. La resistencia a tracción y la cohesión de los contactos se establecen iguales para permitir la

formación de microfisuras tanto por tracción como por cizalladura o cortante con igual probabilidad. Estos parámetros se afinan mediante un proceso de ajuste para obtener la resistencia de pico en los ensayos a compresión. Para tener en cuenta la variabilidad real, a ambos parámetros se les aplica una desviación estándar, que en nuestro caso se fija en un 20% del valor medio.

### 3.2. Material «flat-jointed»

Como en el material *parallel-bonded*, podemos clasificar los parámetros en los mismos tres grupos (tabla 3). La calibración de los micro-parámetros que define el material *flat-jointed* se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de Potyondy & Cundall (2004), Potyondy (2012) y la experiencia propia de los autores.

**Tabla 3.** Micro-propiedades del granito Blanco Mera para el modelo *flat-joint*

Micro-propiedad	Descripción	Valor
$D_{max}/D_{min}$		1.66
$N_r$	Nº elementos dirección radial	1
$N_a$	Nº elementos dirección circunf.	3
$g_0$	<i>Installation gap</i> [mm]	0.5
$\phi_b$	Fracción <i>bonded</i>	1.0
$\phi_g$	Fracción <i>gapped</i>	0.0
$\rho$	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	2600
E	Módulo de Young [GPa]	84
$k_r/k_s$	Relación de rigideces	1.7
$\mu$	Coefficiente de fricción	0.5
$\lambda$	<i>Radius multiplier</i>	1.0
E	Módulo de Young [GPa]	56
$k_r/k_s$	Relación de rigideces	1.7
$\sigma_c$	Resistencia a tracción del contacto [MPa]	4
c	Cohesión del contacto [MPa]	255
$\phi$	Ángulo de fricción [°]	0

El número de elementos en las direcciones radial y circunferencial son los valores por defecto. Las fracciones unidas y separadas son la fracción de contactos que están inicialmente unidos (*bonded*) o separados (*gapped*), respectivamente. Se observó que el mejor ajuste es aquel que considera todos los contactos unidos.

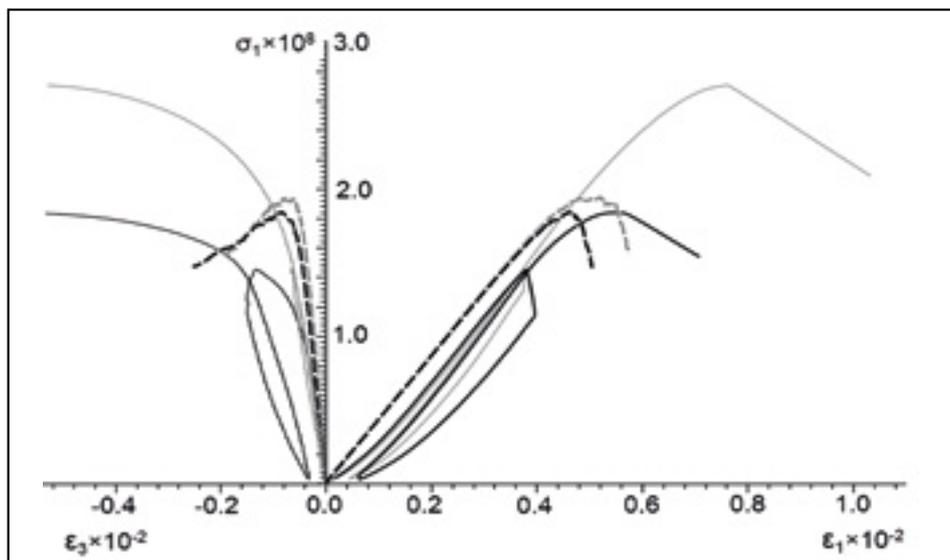
Para poder obtener un mejor ajuste, la relación del módulo de Young de los granos respecto al del contacto es igual a 1.5. La relación de rigideces se ajustó para obtener el coeficiente de Poisson obtenido en laboratorio, la resistencia a tracción del contacto se eligió para ajustar la resistencia a tracción de la roca obtenida en los ensayos y la cohesión del contacto para lograr la resistencia de pico observada en los ensayos de laboratorio reales. Como en el *parallel-bond*, se establece un valor de desviación estándar para la resistencia a tracción y la cohesión de los contactos igual al 20% del valor medio.

## 4. RESULTADOS

Las calibraciones iniciales se llevaron a cabo para alcanzar los resultados obtenidos en los ensayos de compresión triaxial a confinamientos de 2 y 10 MPa. Los resultados se obtuvieron a partir de la calibración del comportamiento de 10 *seed numbers* diferentes, es decir, de 10 disposiciones de empaquetamientos diferentes. Dado que el método empleado es de prueba y error, es preciso llevar a cabo un número mínimo de simulaciones (10, en este caso), de tal forma que la media de todos los resultados sea razonablemente representativa de la respuesta mecánica real de la roca en laboratorio.

### 4.1. «Parallel-bond»

Las simulaciones llevadas a cabo a confinamientos de 2 y 10 MPa proporcionan los resultados mostrados en la tabla 4, que, como se comentó en el párrafo anterior, son la media de los resultados de 10 empaquetamientos diferentes.



**Figura 7.** Curvas tensión-deformación para ensayos con presiones de confinamiento de 2 MPa (negro) y 10 MPa (gris) obtenidas en laboratorio (línea sólida) y obtenidas en PFC3D con el modelo *parallel-bond* (línea punteada).

**Tabla 4.** Macro-propiedades del granito Blanco Mera obtenidas a partir del modelo *parallel-bond*

Propiedad	$\sigma_3=2$ MPa	$\sigma_3=10$ MPa
E [GPa]	43.08	43.28
$\nu$	0.13	0.13
$\sigma_{peak}$ [MPa]	180.00	192.20
$\sigma_{residual}$ [MPa]	30	34.40
$\sigma_t$ [MPa]	65.9 ( $\sigma_3=0$ MPa)	

Comparando los resultados de las tablas 1 y la 4, podemos observar que, con un confinamiento de 2 MPa, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, y las resistencias de pico y residual que se obtienen con el modelo *parallel-bond* se ajustan razonablemente bien a los ensayos de laboratorio. Sin embargo, la resistencia a tracción y los parámetros para el caso de un mayor confinamiento (10 MPa) son muy diferentes. En la figura 7 se pueden observar dichas discrepancias, en la representación de las curvas tensión-deformación obtenidas en laboratorio y con la simulación mediante el modelo *parallel-bond*.

Debido a las dificultades a la hora de obtener la resistencia a tracción y reproducir el aumento de la resistencia de pico con el confinamiento, se consideró que el modelo *parallel-bond* no era capaz de reflejar de manera suficientemente representativa el comportamiento de la roca.

#### 4.2. «Flat-joint»

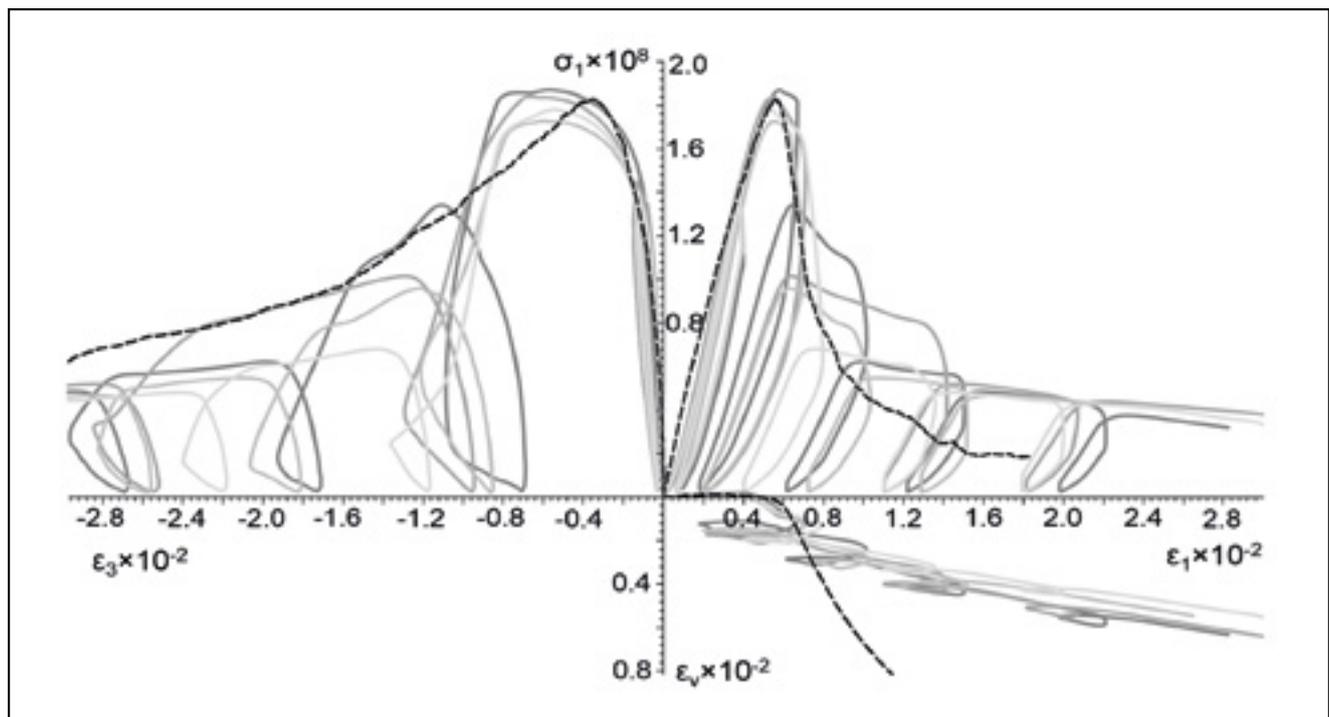
En este punto se repiten los ensayos anteriores con el modelo *flat-joint*. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5.** Macro-propiedades del granito Blanco Mera obtenidas a partir del modelo *flat-joint*

Propiedad	$\sigma_3=2$ MPa	$\sigma_3=10$ MPa
E [GPa]	37	41
$\nu$	0.13	0.13
$\sigma_{peak}$ [MPa]	182	258
$\sigma_{residual}$ [MPa]	20	72
$\sigma_t$ [MPa]	2.5 ( $\sigma_3=0$ MPa)	

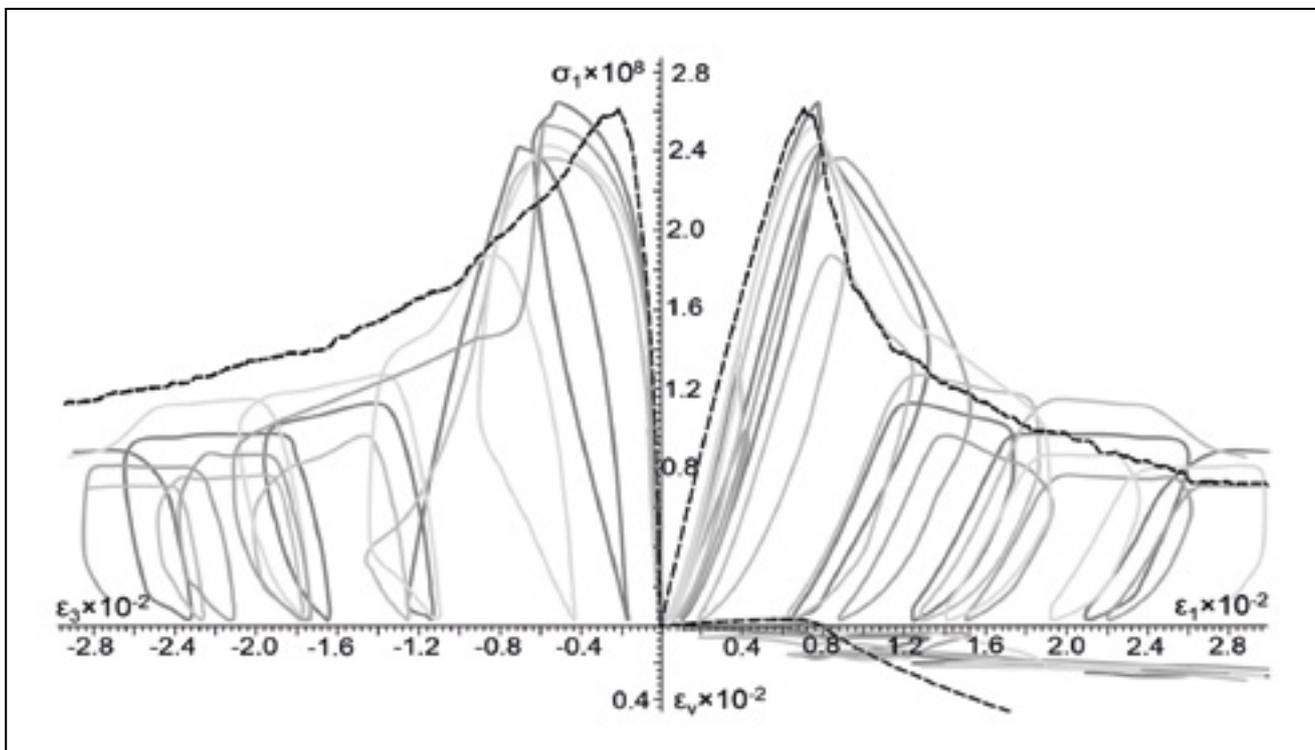
Como se puede observar a partir de la comparación de las tablas 1 y 5, el modelo *flat-joint* proporciona un mejor ajuste del comportamiento elástico y de la resistencia pico. Incluso se ha obtenido un buen resultado en los ensayos de tracción.

En las figuras 8 y 9 se puede observar una comparación entre los resultados obtenidos con PFC y los resultados obtenidos en el laboratorio para una curva tensión-deformación completa, incluyendo la deformación volumétrica.

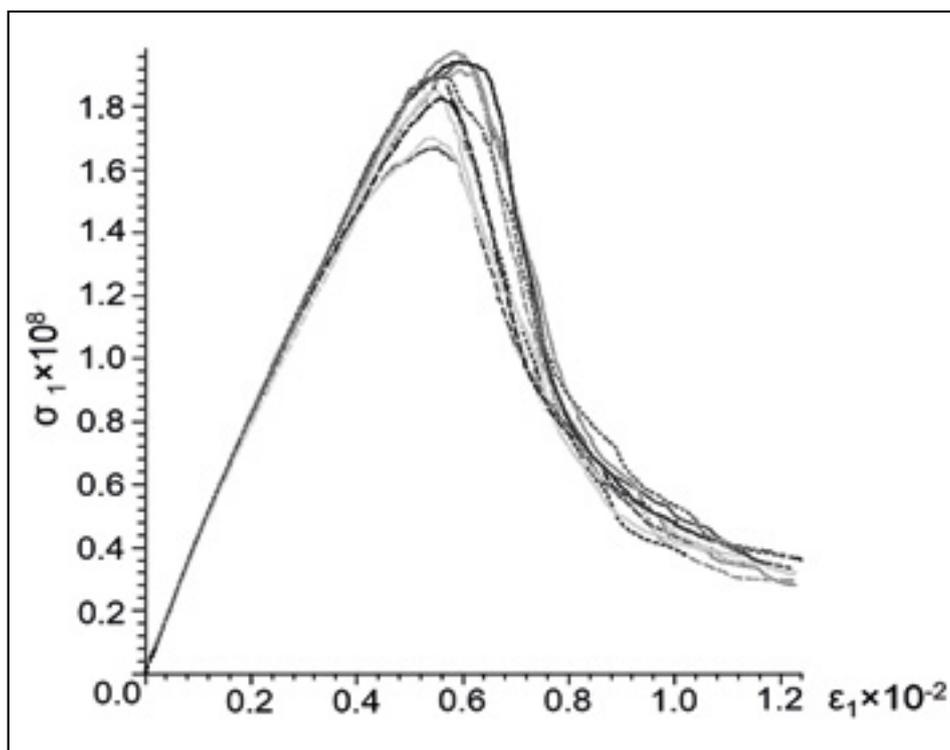
**Figura 8.** Curvas tensión-deformación para ensayos de compresión a una presión de confinamiento de 2 MPa obtenidas en laboratorio (línea sólida) y la obtenida con PFC3D con el modelo *flat-joint* (línea punteada).

Estos resultados son unos resultados preliminares del modelo *flat-joint*. Sin embargo, aunque obtenemos un mejor ajuste del comportamiento post-pico, el ajuste tiene potencial para mejorar. Es preciso resaltar que, este es uno de los primeros intentos de reproducir el comportamiento post-rotura de rocas mediante un código de partículas, por lo que el grado de precisión es considerado razonable en esta fase.

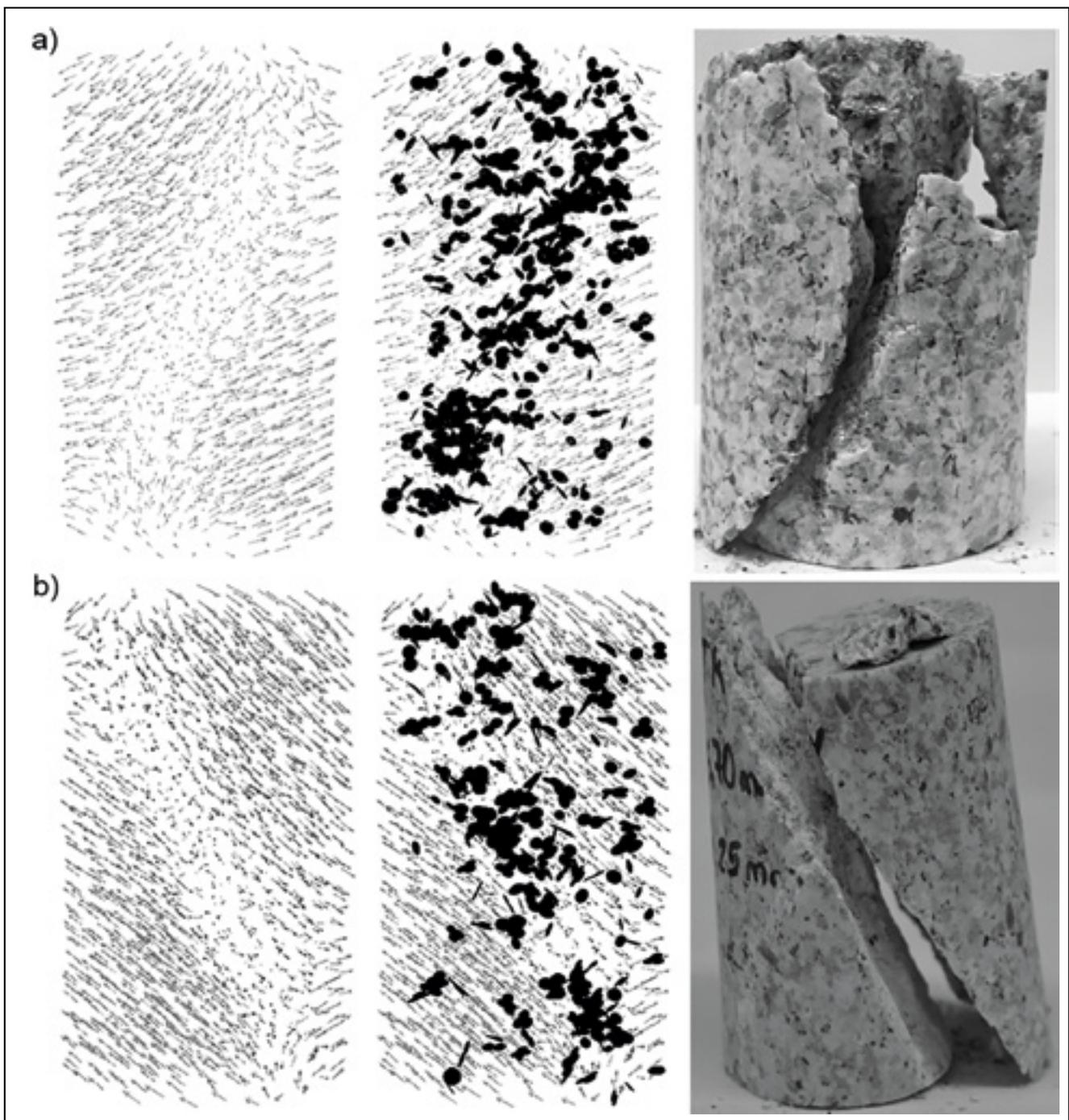
En las figuras 8 y 9 también se muestran diferentes curvas tensión-deformación obtenidas en laboratorio para representar la variación natural de las propiedades de un material natural comparado con la obtenida mediante el código numérico. Esta variación también se puede representar mediante el código PFC, como se muestra en la figura 10, asociado a los distintos empaquetamientos, lo que puede ser usado también para ajustar modelos en el futuro.



**Figura 9.** Curvas tensión-deformación para ensayos de compresión a una presión de confinamiento de 10 MPa obtenidas en laboratorio (línea sólida) y la obtenida con PFC3D con el modelo *flat-joint* (línea punteada).



**Figura 10.** Representación de las 10 curvas tensión-deformación diferentes (asociadas a los 10 empaquetamientos) para ensayos de compresión triaxial a 2 MPa.



**Figura 11.** Representación de las probetas mediante vectores desplazamiento donde se puede observar la banda de cizalladura (izquierda) y las fracturas de contacto a tracción que suceden en las muestras (centro) comparadas con probetas reales (derecha), para tensiones de confinamiento de (a) 2 MPa y (b) 10 MPa

Con PFC también es posible obtener la evolución del desplazamiento y del crecimiento de las fisuras en las probetas a lo largo de todo el proceso de ensayo. La representación vectorial del desplazamiento puede usarse para intentar identificar la formación de zonas de rotura axial o bandas de cizalladura, como representación de los mecanismos de rotura observados en la práctica. Para motivos ilustrativos, la figura 11 compara la respuesta del desplazamiento del modelo al final de dos ensayos, uno con un confinamiento de 2MPa y otro de 10 MPa, mediante diagramas de desplazamiento al final del proceso de modelado junto con la rotura de los contactos (que será objeto de un estudio más exhaustivo), junto una probeta rota obtenida a partir de un ensayo de laboratorio.

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este estudio es simular el comportamiento tenso-deformacional completo del granito *Blanco Mera* mediante el código PFC de la compañía Itasca Consulting Group.

En una primera fase, se ha usado el modelo de contacto *parallel-bond*, pero no se ha logrado completamente el objetivo, dado que solo se puede simular el comportamiento tenso-deformacional para un estado tensional específico pero no se puede simular el aumento de la resistencia con el confinamiento, es decir, el efecto friccional no se refleja bien en este tipo de ajuste.

Después, se ha usado el modelo de contacto *flat-joint*. Con este modelo de contacto, el aumento de la resistencia con el confinamiento se ha reflejado apropiadamente. Además, las tendencias más relevantes del comportamiento post-rotura se han reproducido aproximadamente, aunque se precisa un mejor ajuste de la resistencia residual y, en particular la respuesta de la deformación volumétrica de las muestras de las rocas.

Esto no es sorprendente ya que los códigos de partículas son aún una tecnología nueva. Sin embargo, los resultados son lo suficientemente alentadores como para hacer un esfuerzo en lograr un mejor ajuste de los parámetros con el fin de obtener una mejor representación del complejo comportamiento post-rotura del granito obtenido a partir de ensayos de laboratorio.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la compañía Itasca Consulting Group por aceptar al primer autor es su programa *Itasca Partnership Program*, el cual proporciona el programa PFC. Los autores también agradecen al Ministerio Español de Economía y Competitividad por el apoyo al estudio de laboratorio, financiado bajo el Contrato Referencia No. BIA2014-53367P. Este contrato está parcialmente financiado mediante fondos FEDER de la Unión Europea.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Arzúa, J., y Alejano, L.R. (2013). Dilation in granite during servo-controlled triaxial strength tests. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 61: pp. 43-56.

Arzúa, J., Alejano, L.R., y Barbiero, J. (2013). Strain-softening characterization of granitic rocks and numerical simulation of servo-controlled strength tests. *EUROCK 2013. Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment. M. Kwasniowski & D. Lydsba (eds.), 21-26 September 2013. Wroclaw, Poland.*

Hoek, E., y Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 34(8): pp. 1165-1186.

ISRM (1997). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. Prepared by the Commission on Testing Methods, Ulusay, R. & Hudson, J.A., (eds.). Ankara (Turkey).

Itasca Consulting Group, Inc. (2014). PFC (Particle Flow Code), Version 5.0. Minneapolis (EE UU): ICG.

Potyondy, D.O. (2012). A Flat-Jointed Bonded-Particle Material for Hard Rock. *Proc. Of 46<sup>th</sup> U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Chicago, 24-27 June 2012*. Chicago (EE UU): ARMA.

Potyondy, D.O. (2015). The Bonded-Particle Model as a Tool for Rock Mechanics Research and Application: Current Trends and Future Directions. *Geosystem Engineering* 18(1): pp. 1-28.

Potyondy, D.O., y Cundall, P.A. (2004). A Bonded-Particle Model for Rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41(8): pp. 1329-1364.