

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE JUNTAS ROCA-HORMIGÓN A TRAVÉS DE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO EN PFC2D

Gutiérrez-Ch José Gregorio¹, Senent Salvador¹, Melentijevic Svetlana² y Jiménez Rafael¹

1: Grupo de Investigación de Mecánica de Rocas
Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
Campus Ciudad Universitaria, Calle del Prof. Aranguren, 3, 28040 Madrid
e-mail: jg.gutierrez@alumnos.upm.es, s.senent@upm.es, rafael.jimenez@upm.es

2: Universidad Complutense de Madrid (UCM)
Campus Ciudad Universitaria, Calle José Antonio Novais, 12, 28040 Madrid
e-mail: svmelent@ucm.es

Palabras clave: Resistencia al corte, ensayo de corte directo, método de elementos discretos, PFC2D, modelos numéricos

Resumen *La estimación de los parámetros de resistencia al corte en la interacción roca-hormigón ha sido objeto de amplia investigación, por ejemplo, para presas de hormigón cimentadas sobre roca, para pilotes y anclajes en roca, etc. Se han realizado diversos estudios experimentales para evaluar el comportamiento del contacto roca-hormigón a través de ensayos de corte directo en condición CNL (Constant Normal Load) [1,9,10,13]. Otras investigaciones han comparado ensayos de corte directo en suelo y roca con modelos numéricos, empleando el método de elementos finitos (MEF) y el método de elementos discretos (MED) [5,6-8]. En esta investigación se realiza un análisis comparativo entre los resultados experimentales de ensayos de corte directo y los resultados numéricos obtenidos con el MED a través del código PFC2D. Para ello, en primer lugar, se calibran las micropropiedades de los materiales (roca y hormigón) a partir de ensayos de compresión uniaxial simulados en PFC2D, comparando los parámetros elásticos (módulo de Young y coeficiente de Poisson) del modelo numérico con los obtenidos experimentalmente; posteriormente, se calibran los microparámetros del plano de contacto (roca-hormigón) y, finalmente, se ejecuta la simulación numérica del ensayo de corte directo. Los resultados obtenidos indican que el código PFC2D permite modelar de manera adecuada el comportamiento de ensayos de compresión simple y corte directo.*

1. INTRODUCCIÓN

La interfaz roca-hormigón se encuentra presente en diversas obras de ingeniería, razón por la cual es fundamental la determinación de los parámetros de resistencia en la interacción de estos dos materiales.

La cuantificación de las propiedades de resistencia al corte en la superficie de contacto roca-hormigón puede ser realizada, de forma experimental, a través del ensayo de corte directo en condición CNL (*Constant Normal Load*), el cual es utilizado cuando la carga normal aplicada permanece constante (por ejemplo, análisis de estabilidad de taludes en roca o presas cimentadas en roca [1,2,9,12]). Algunos autores han estudiado el comportamiento en la interacción roca-roca o roca-hormigón en junta plana mediante ensayos experimentales en condición CNL [1,8,10,12,13], así como también, a través del MED con la aplicación de herramientas computacionales [6-8,10].

En este sentido, el objetivo principal de esta investigación es elaborar modelos numéricos de ensayos de corte directo en PFC2D con junta plana en la interacción roca-hormigón y realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en los modelos numéricos con los valores experimentales derivados de los trabajos de Gutiérrez [9] y Gu *et al.* [13].

2. MODELIZACIÓN NUMÉRICA CON EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS

2.1. Método de elementos discretos en PFC. Modelos de Contacto

PFC (*Particle Flow Code*) es un código basado en el MED, el cual permite simular el movimiento e interacción de muchas partículas de tamaño finito, consideradas como cuerpos rígidos, con determinada masa y que se mueven independientemente unas respecto a las otras mediante traslación y rotación. La interacción entre partículas se produce a través de fuerzas internas y momentos, cuyas leyes de contacto son actualizadas en cada instante a través del MED proporcionando una solución dinámica y explícita de las leyes de movimiento de Newton [4]. El empaquetamiento y arreglo de las partículas está basado en la metodología *Bonded-Particle Model* (BPM) propuesta por Potyondy y Cundall [3].

PFC dispone de varios tipos de contacto en función del fenómeno físico a estudiar. En esta investigación se emplea el modelo de contacto *flat-joint* para la roca y hormigón, mientras que en la interacción de ambos materiales se emplea el modelo de contacto *smooth-joint*.

2.1.1 Modelo de contacto *flat-joint*

Este modelo proporciona un comportamiento macroscópico, elástico lineal, de tamaño finito, en la cual cada interfaz friccional (*bonded*) puede sufrir daño parcial. La interfaz es discretizada en elementos *bonded* o *unbonded* cuya rotura contribuye al daño parcial del enlace. El comportamiento de los elementos tipo *bonded* es lineal elástico hasta que se excede la resistencia límite y se rompe la unión, convirtiendo este elemento en tipo *unbonded*, en consecuencia su comportamiento pasa a ser lineal elástico y friccional, con deslizamiento de acuerdo a la fuerza límite al corte impuesta por el criterio de Coulomb (ver Figura 1) [4]. En la Figura 2 se muestra la idealización en forma esquemática realizada al emplear el modelo de

contacto tipo *flat-joint*.

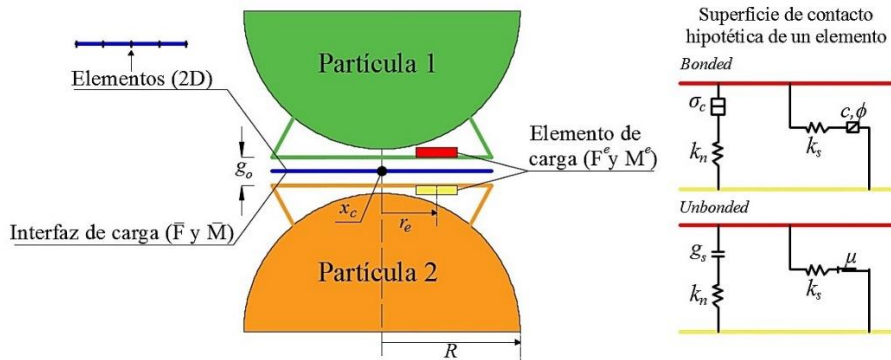


Figura 1. Comportamiento y componentes de modelo de contacto *flat-joint* (modificado de [3]).

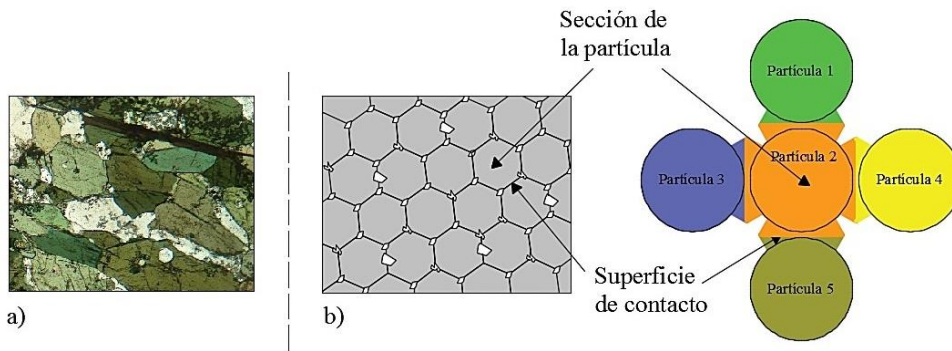


Figura 2. a) Sección delgada de roca (fuente propia), b) Idealización de material *flat-joint* en PFC2D (modificado de [4]).

2.1.2 Modelo de contacto *smooth-joint*

Este modelo proporciona un comportamiento macroscópico, elástico lineal (ver Figura 3), que simula una interfaz plana, con dilatación independientemente de la orientación local de los contactos a lo largo de la interfaz. La junta friccional (*bonded*), puede ser modelada asignando el modelo *smooth-joint* a las partículas que están en contacto en el plano de la discontinuidad [4].

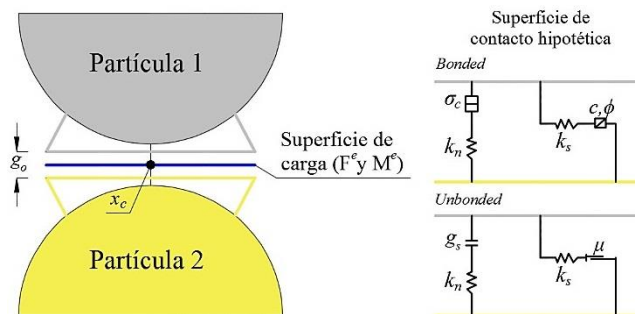


Figura 3. Comportamiento y componentes de modelo de contacto *smooth-joint* (modificado de [3]).

La superficie de la interfaz se rige por los mismos parámetros descritos previamente para el modelo *flat-joint*, no obstante, es importante resaltar que este tipo de modelo de contacto no permite la rotación relativa ($M_c = 0$) y, además, la superficie de contacto no está discretizada en pequeños elementos como ocurre en el modelo *flat-joint*. En la Figura 4, se ilustra el patrón a seguir por las partículas envueltas en el plano de la junta y la notación usada para su caracterización (para más detalle de este modelo de contacto ver [4]).

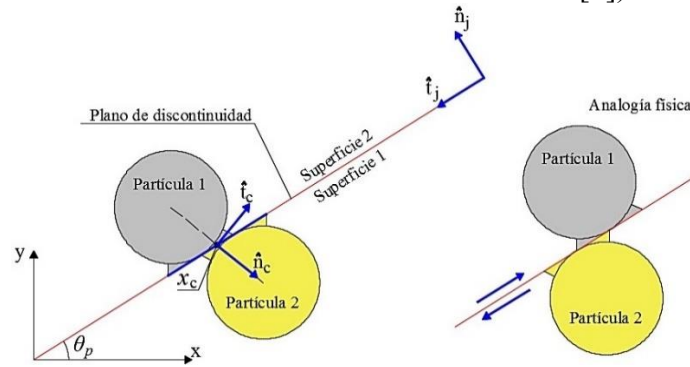


Figura 4. Notación utilizada para definir la junta en el modelo smooth-joint (modificado de [3]).

2.2. Modelo numérico del ensayo de compresión uniaxial en PFC2D

La elaboración y ejecución del ensayo de corte directo en PFC, requiere la calibración previa de los microparámetros del modelo *flat-joint* asignado a los materiales presentes en la simulación. El proceso de calibración consiste en modelar el ensayo de compresión uniaxial en PFC a través de un proceso iterativo (ver Figura 5), usando como variables de control el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν) y la resistencia de compresión uniaxial (σ_c) obtenidos a partir de las curvas experimentales del ensayo de compresión uniaxial del material.

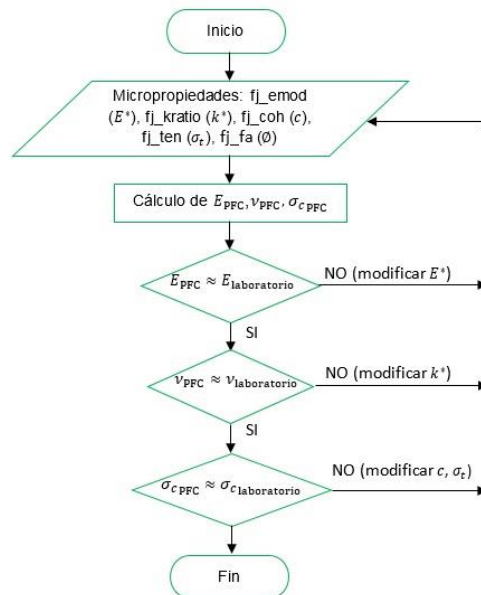


Figura 5: Proceso iterativo de calibración de las micropropiedades *flat-joint*.

En esta investigación, las probetas han sido generadas empleando la metodología de Potyondy y Cundall [3] a muestras ensayadas por Gutiérrez [9] (Gneis y Hormigón) y Gu *et al.* [13] (Arenisca S1, Arenisca S3 y Hormigón) (Figura 6). Finalmente, un total de 10 ensayos por cada muestra se realizan en PFC2D variando la forma aleatoria del proceso de generación de la probeta. En las Tabla 1-3 se presentan los parámetros calibrados en cada una de las probetas para el modelo de contacto *flat-joint*.

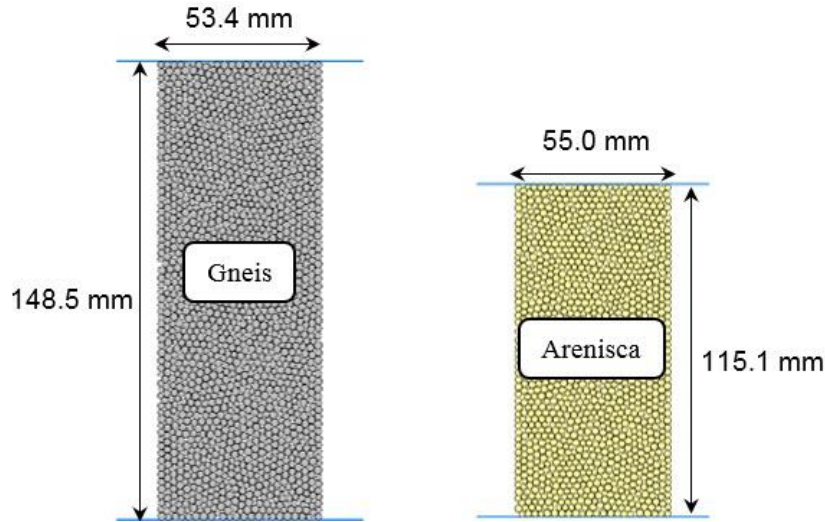


Figura 6: Dimensiones de las probetas generadas en PFC2D.

Probeta	Parámetros de las partículas		Parámetros del modelo de contacto <i>Flat-joint</i>			
	Datos de entrada	Gneis	Modulo efectivo, E^* (GPa)	43	Modulo efectivo, \bar{E}^* (GPa)	43
$k^* = k_n/k_s$			3.25	$\bar{k}^* = \bar{k}_n/\bar{k}_s$	3.25	
Ángulo de fricción ϕ (°)			35	Cohesión (MPa)	40.8	
Densidad, ρ (kg/m ³)			2690	Resistencia a la tracción, σ_t (MPa)	20	
Hormigón		Modulo efectivo, E^* (GPa)	26.2	Modulo efectivo, \bar{E}^* (GPa)	26.2	
		$k^* = k_n/k_s$	3.0	$\bar{k}^* = \bar{k}_n/\bar{k}_s$	3.0	
		Ángulo de fricción ϕ (°)	30	Cohesión (MPa)	18.8	
		Densidad, ρ (kg/m ³)	2500	Resistencia a la tracción, σ_t (MPa)	9	
Datos de salida	Variable	Experimental por Gutiérrez [9]		Numérico en PFC2D		
		Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	
	Gneis	σ_c (MPa)	158.87	7.11	157.84	7.14
		E (GPa)	50.0	-	50.23	0.40
		ν	0.25	-	0.24	0.03
	Hormigón	σ_c (MPa)	62.20	0.74	62.12	3.01
		E (GPa)	30.0	-	29.98	0.26
		ν	0.20	-	0.20	0.02

Tabla 1. Micropropiedades *flat-joint* calibradas para el gneis y hormigón a partir de datos experimentales de Gutiérrez [9]

	Probeta	Parámetros de las partículas		Parámetros del modelo de contacto <i>Flat-joint</i>		
Datos de entrada	Arenisca (S1)	Modulo efectivo, E^* (GPa)	1.55	Modulo efectivo, \bar{E}^* (GPa)	1.55	
		$k^* = k_n/k_s$	1.40	$\bar{k}^* = \bar{k}_n/k_s$	1.40	
		Ángulo de fricción ϕ (°)	35	Cohesión (MPa)	6.50	
		Densidad, ρ (kg/m ³)	2550	Resistencia a la tracción, σ_t (MPa)	3.00	
	Arenisca (S3)	Modulo efectivo, E^* (GPa)	1.90	Modulo efectivo, \bar{E}^* (GPa)	1.90	
		$k^* = k_n/k_s$	1.45	$\bar{k}^* = \bar{k}_n/k_s$	1.45	
		Ángulo de fricción ϕ (°)	35	Cohesión (MPa)	7.90	
		Densidad, ρ (kg/m ³)	2550	Resistencia a la tracción, σ_t (MPa)	3.50	
Datos de salida		Variable	Experimental por Gu <i>et al.</i> [13]		Numérico en PFC2D	
			Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
	Arenisca (S1)	σ_c (MPa)	17.44	0.71	17.39	0.83
		E (GPa)	2.75	0.25	1.89	0.02
		ν	0.09	0.00	0.10	0.02
	Arenisca (S3)	σ_c (MPa)	21.77	1.19	21.65	1.43
		E (GPa)	3.25	0.39	2.32	0.02
		ν	0.10	0.00	0.11	0.01

Tabla 2. Micropropiedades *flat-joint* calibradas para la arenisca S1 y S3 a partir de datos experimentales de Gu *et al.* [13].

	Probeta	Parámetros de las partículas		Parámetros del modelo de contacto <i>Flat-joint</i>		
Datos de entrada	Hormigón	Modulo efectivo, E^* (GPa)	27.0	Modulo efectivo, \bar{E}^* (GPa)	27.0	
		$k^* = k_n/k_s$	2.75	$\bar{k}^* = \bar{k}_n/k_s$	2.75	
		Ángulo de fricción ϕ (°)	30	Cohesión (MPa)	13.5 5	
		Densidad, ρ (kg/m ³)	2500	Resistencia a la tracción, σ_t (MPa)	6.0	
Datos de salida		Variable	Experimental por Gu <i>et al.</i> [13]		Numérico en PFC2D	
			Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
	Hormigón	σ_c (MPa)	40.0	0.33	39.87	2.73
		E (GPa)	29.95	0.08	30.08	0.23
		ν	0.20	-	0.20	0.02

Tabla 3. Micropropiedades *flat-joint* calibradas para el hormigón a partir de datos experimentales de Gu *et al.* [13]

2.3. Modelo numérico del ensayo de corte directo en PFC2D

La elaboración del ensayo de corte directo roca-hormigón se realizó usando como base el esquema teórico mostrado en la Figura 7: en condición CNL, con junta plana y sin cohesión en la interfaz de ambos materiales.

El proceso de generación de la muestra en la caja de corte superior (hormigón) e inferior (roca) se realizó similar al procedimiento realizado por Bahaaddini *et al.* [6-8] y Potyondy y Cundall [3]. Las micropropiedades asignadas a la roca y hormigón corresponden al modelo *flat-joint* previamente calibradas a través del ensayo de compresión uniaxial. En la junta de contacto roca-hormigón se empleó el modelo *smooth-joint*.

Posteriormente, se aplica la carga vertical (condición CNL) y se impone a la caja de corte superior una velocidad constante en la dirección horizontal de 0.01 m/s, manteniendo la caja inferior fija, midiendo durante todo el ensayo los parámetros de interés (desplazamiento, resistencia al cortante, entre otros).

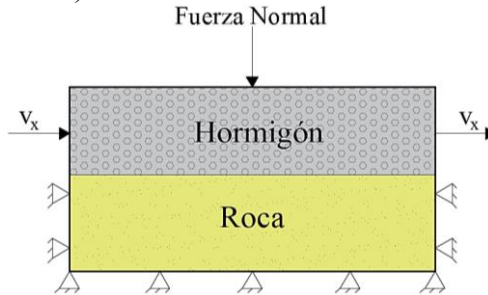


Figura 7. Esquema teórico del ensayo de corte directo en PFC.

2.3.1 Calibración de los parámetros *smooth-joint*

Esta etapa del ensayo se realiza similar al esquema planteado por Bahaaddini *et al.* [6-8] y se divide en dos partes en función de los parámetros *smooth-joint* a calibrar (ver Figura 8):

- Rigidez normal (\bar{k}_n)
- Rigidez al cortante (\bar{k}_s) y coeficiente de fricción (μ)

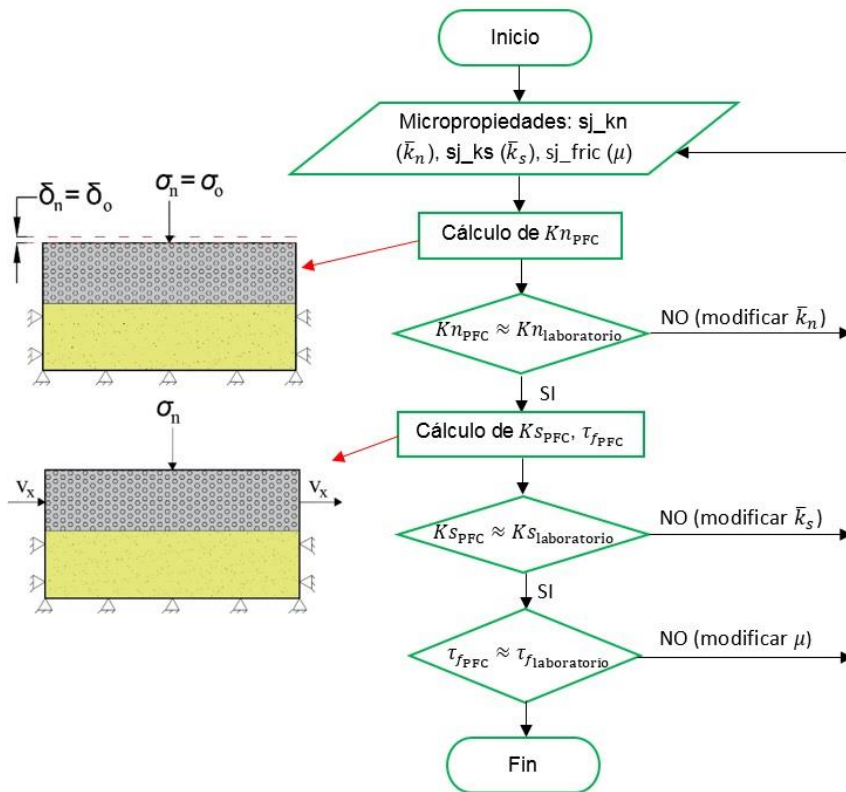


Figura 8: Proceso iterativo de calibración de las micropropiedades *smooth-joint*.

La rigidez normal *smooth-joint* (\bar{k}_n) es calibrada de forma iterativa, comparando la rigidez normal del sistema obtenida en el ensayo del laboratorio ($K_{n\text{laboratorio}}$) con la hallada en PFC2D ($K_{n\text{PFC}}$). De no poseer la información experimental, Malkowski [11] sugiere que K_n es del orden de 1 a 10 veces la rigidez al cortante del sistema (K_s).

En PFC, la rigidez normal del sistema (K_n) se determina aplicando sobre la caja de corte superior valores de esfuerzo normal incrementales, midiendo para cada intervalo de carga vertical normal aplicada el desplazamiento producido en la dirección vertical; la caja de corte inferior se mantiene fija (ver Figura 9). Cuando $K_{n\text{PFC}} \approx K_{n\text{laboratorio}}$ se establece que la rigidez normal *smooth-joint* (\bar{k}_n) ha sido calibrada.

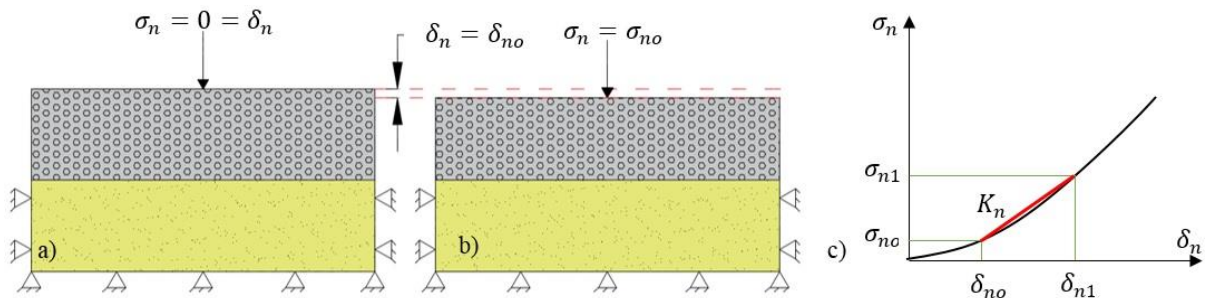


Figura 9. Modelo conceptual del cálculo de la rigidez normal del sistema (K_n): a) Estado inicial, b) Estado para un esfuerzo normal aplicado, c) Curva esfuerzo normal (σ_n) - desplazamiento normal (δ_n) para diferentes incrementos de esfuerzo normal aplicados.

La calibración de la rigidez al cortante (\bar{k}_s) y el coeficiente de fricción (μ) del modelo *smooth-joint* se realiza de forma iterativa por “ensayo y error”, ejecutando el ensayo de corte directo hasta reproducir en forma aproximada la curva resistencia al esfuerzo cortante (τ) – desplazamiento al cortante (δ_s) obtenida en el laboratorio para diferentes esfuerzos normales, es decir, $K_{s\text{PFC}} \approx K_{s\text{laboratorio}}$ y $\tau_{f\text{PFC}} \approx \tau_{f\text{laboratorio}}$ (ver Figura 10).

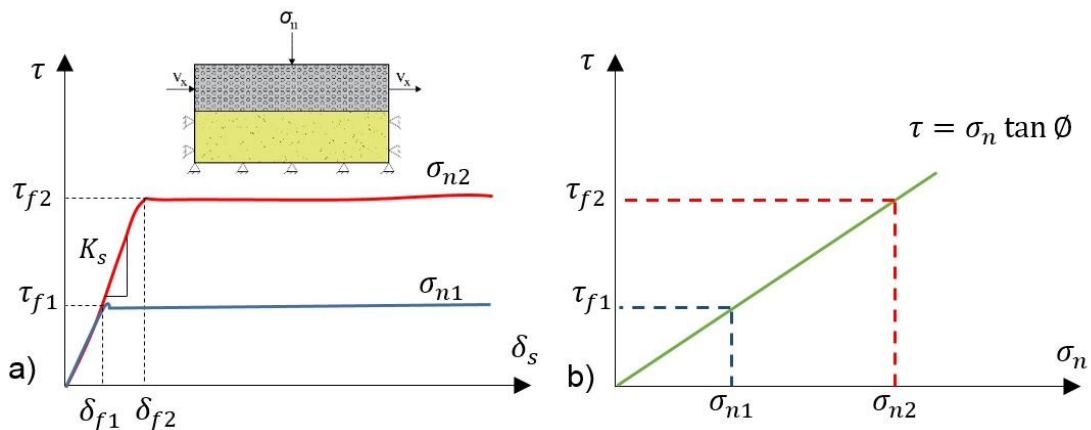


Figura 10. Modelo conceptual del cálculo de la rigidez al cortante (K_s) y coeficiente de fricción (μ , ($\tan \phi$)) del sistema: a) Curva $\tau - \delta_s$, b) Curva $\tau - \sigma_n$.

Para el ensayo de corte directo para la junta plana Arenisca (S1,S3)-Hormigón se usaron dimensiones de 400mm × 135mm mientras que la geometría para el modelo de la junta Gneis-Hormigón es de 240mm × 260mm; para todos los ensayos se dejó un espaciado de 5mm entre la pared de la caja de corte superior e inferior. En la Figura 11 se ilustran las características empleadas en los modelos de la junta Hormigón-Arenisca (S1 o S3) y Hormigón-Gneis.

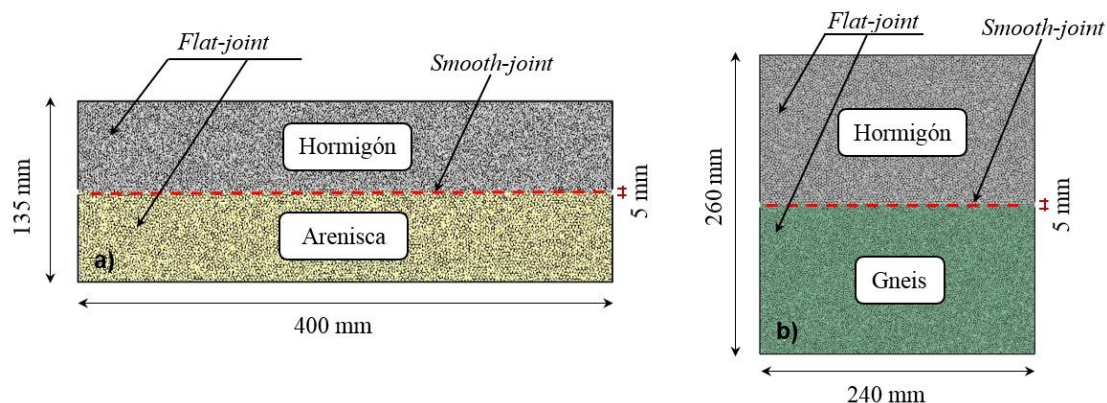


Figura 11: Geometría del modelo de ensayo de corte directo en PFC2D, a) Hormigón (7300 partículas) - Arenisca-S1 (4941 partículas), Hormigón (7202 partículas) - Arenisca-S3 (5054 partículas), b) Hormigón (5780 partículas) - Gneis (8377 partículas).

La aplicación de la condición CNL se realizó haciendo uso del mecanismo *servo control* del que dispone PFC, el cual permite ejercer cualquier fuerza en determinada pared del ensayo por medio del control de la velocidad de traslación de la misma [4]. Durante toda la realización del ensayo se registra continuamente los desplazamientos en los ejes x e y de las paredes de la caja corte superior, así como también, la fuerza en la dirección x (F_x) sobre la pared lateral derecha de la caja de corte inferior. La resistencia al esfuerzo cortante del ensayo (τ) se obtiene al dividir F_x entre la longitud total de la discontinuidad.

3. RESULTADOS

En las tablas 4-6 se presentan los parámetros calibrados para el modelo *smooth-joint* con la junta plana en el contacto roca-hormigón, en la cual se observa una adecuada correspondencia entre los valores obtenidos de forma experimental con los halladas con el método de elementos discretos a través de PFC2D.

	Probeta	Parámetros del modelo de contacto <i>smooth-joint</i>		
Datos de entrada	Gneis-Hormigón	Rigidez normal, k_n , (GPa/m)	10	
		Rigidez al cortante, k_s , (GPa/m)	2	
		Coefficiente de fricción (μ)	0.62	
Datos de Salida	Gneis-Hormigón		Experimental por Gutiérrez [9]	Numérico en PFC2D
		Rigidez normal del sistema, K_n , (MPa/mm)	-	16.49
		Rigidez al cortante del sistema, K_s , (MPa/mm)	2.51	2.53
		Ángulo de fricción, ϕ , (°)	31.22	31.10

Tabla 4. Micropropiedades *smooth-joint* calibradas para la junta plana Gneis-Hormigón.

Probeta		Parámetros del modelo de contacto <i>smooth-joint</i>		
Datos de entrada	Arenisca (S1) - Hormigón	Rigidez normal, \bar{k}_n , (GPa/m)	10	
		Rigidez al cortante, \bar{k}_s , (GPa/m)	100	
		Coefficiente de fricción (μ)	0.63	
Datos de Salida	Arenisca (S1) - Hormigón		Experimental por Gu <i>et al.</i> [13]	Numérico en PFC2D
		Rigidez normal del sistema, K_n , (MPa/mm)	-	9.91
		Rigidez al cortante del sistema, K_s , (MPa/mm)	3.37	3.40
		Ángulo de fricción, ϕ , (°)	32.29	32.17

Tabla 5. Micropropiedades *smooth-joint* calibradas para la junta plana Arenisca (S1)-Hormigón.

Probeta		Parámetros del modelo de contacto <i>smooth-joint</i>		
Datos de entrada	Arenisca (S3) - Hormigón	Rigidez normal, \bar{k}_n , (GPa/m)	10	
		Rigidez al cortante, \bar{k}_s , (GPa/m)	2	
		Coefficiente de fricción (μ)	0.70	
Datos de Salida	Arenisca (S3) - Hormigón		Experimental por Gu <i>et al.</i> [13]	Numérico en PFC2D
		Rigidez normal del sistema, K_n , (MPa/mm)	-	10.297
		Rigidez al cortante del sistema, K_s , (MPa/mm)	1.366	1.360
		Ángulo de fricción, ϕ , (°)	34.96	34.99

Tabla 6. Micropropiedades *smooth-joint* calibradas para la junta plana Arenisca (S3)-Hormigón.

Las investigaciones de Gutiérrez [9] y Gu *et al.* [13] no reflejan el cálculo experimental de de la rigidez normal del sistema ($K_{n\text{laboratorio}}$). No obstante, durante la modelización numérica en PFC2D se calculó el valor de $K_{n\text{PFC}}$, arrojando resultados acordes con rango planteado para este parámetro en la formulación de Malkowski [11].

En las Figuras 12-14, se presentan las curvas de resistencia al esfuerzo cortante (τ) – desplazamiento al cortante (δ_s) obtenidas con el MED a través de PFC2D para diferentes valores de carga normal aplicada. En este sentido, se observa que las curvas obtenidas reflejan el típico patrón observado en las juntas roca-hormigón no cementadas, en la cual la resistencia al cortante pico se alcanza para pequeñas deformaciones, manteniéndose constante durante toda la realización del ensayo.

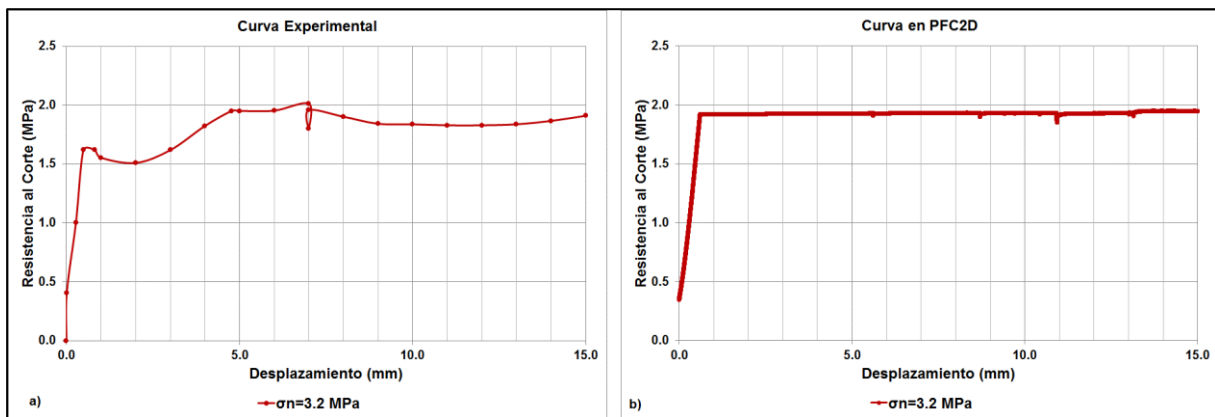


Figura 12: Curvas de resistencia al esfuerzo cortante (τ) – desplazamiento al cortante (δ_s) para junta plana

Hormigón-Gneis, a) Experimental (modificado de [10]), b) PFC2D

En la Figura 14 se observa como el modulo E inicial es el mismo para las 4 probetas, con un comportamiento lineal (ideal) tanto en el caso de PFC2D como en las curvas obtenidas en los ensayos experimentales, mientras que en la Figura 13 se nota como este comportamiento no están lineal debido a que las características microscópicas de ambas areniscas son totalmente diferentes, comportamiento que se ha reflejado en la calibración de los microparámetros del modelo a partir de los ensayos de compresión uniaxial.

Adicionalmente, se nota un buen ajuste entre las curvas obtenidas por métodos numéricos en esta investigación con las curvas experimentales derivadas de los ensayos de Gutiérrez [9] y Gu *et al.* [13]. En la Figura 15 se muestra la comparación de los resultados de resistencia al cortante pico versus el esfuerzo normal aplicado en los ensayos, en la que se refleja la adecuada correspondencia entre los datos experimentales de Gu *et al.* [13] y los valores numéricos obtenidos en PFC2D.

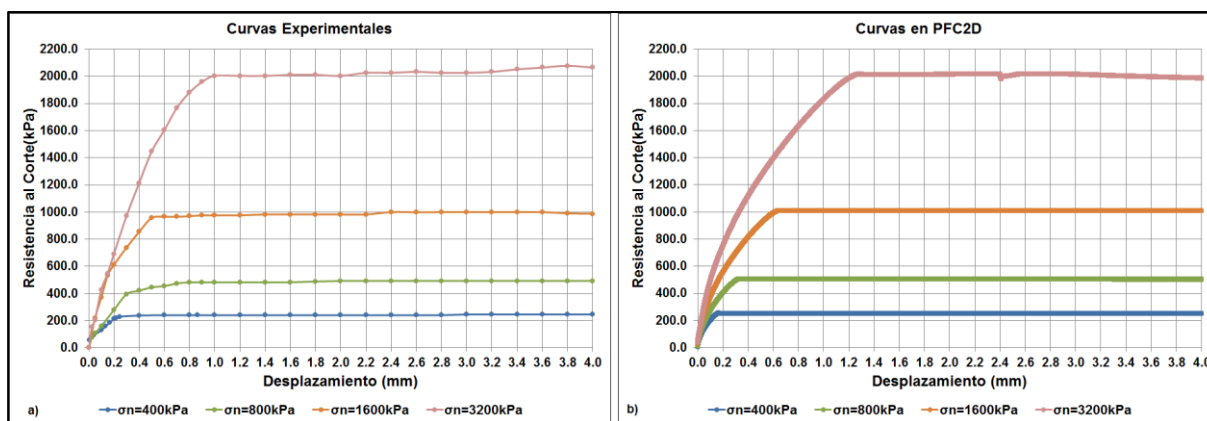


Figura 13: Curvas de resistencia al esfuerzo cortante (τ) – desplazamiento al cortante (δ_s) para junta plana Hormigón-Arenisca (S1), a) Experimental (modificado de [15]), b) PFC2D

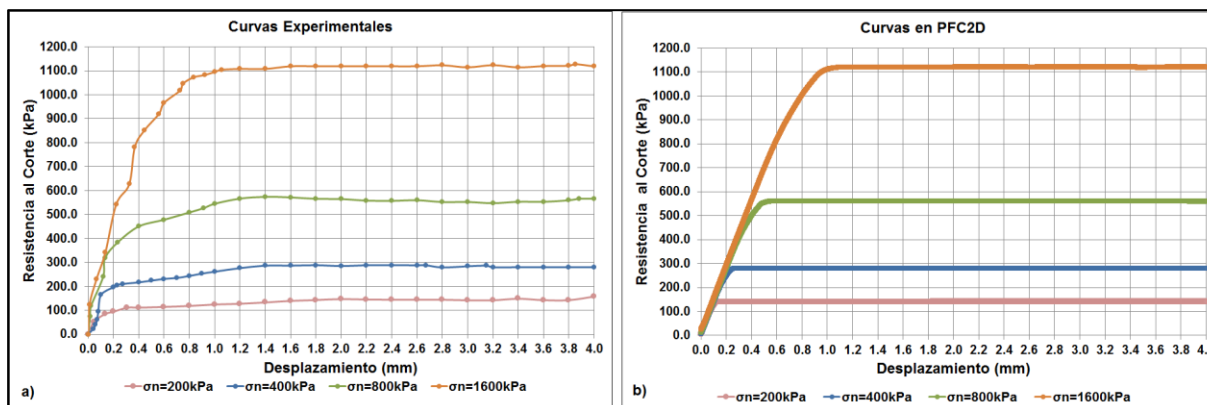


Figura 14: Curvas de resistencia al esfuerzo cortante (τ) – desplazamiento al cortante (δ_s) para junta plana Hormigón-Arenisca (S3), a) Experimental (modificado de [15]), b) PFC2D

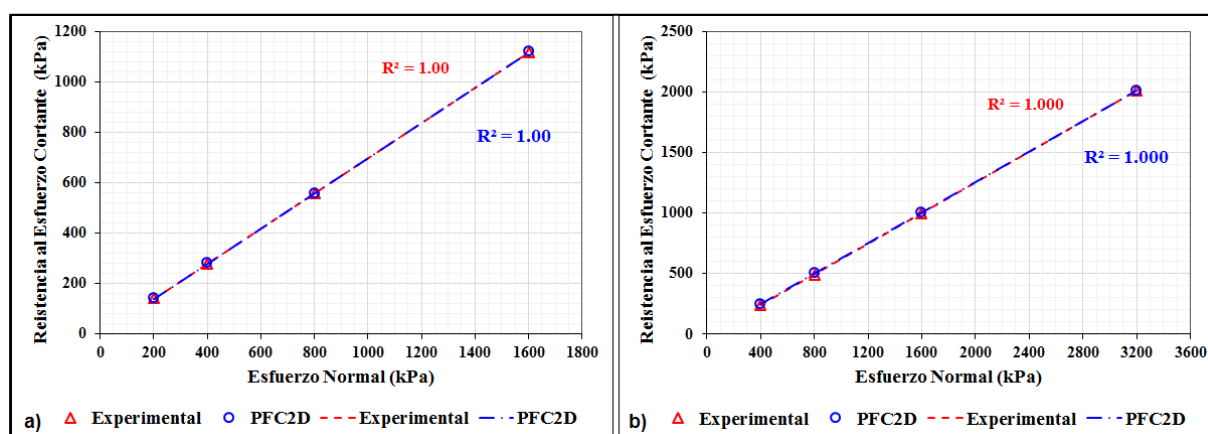


Figura 15: Resistencia al cortante pico (τ) – esfuerzo normal aplicado (σ_n) para junta plana: a) Hormigón-Arenisca (S1), b) Hormigón-Arenisca (S3).

4. CONCLUSIONES

El estudio de la interfaz roca-hormigón es de vital importancia en diversas obras de ingeniería, no obstante, la estimación de los parámetros de resistencia *in situ* trae consigo una serie de limitantes que impiden que los mismos sean realizados con frecuencia. En consecuencia, los ensayos de laboratorio se convierten en una alternativa idónea para cuantificar la resistencia en las juntas roca-hormigón.

La preparación y ejecución de ensayos de corte directo en laboratorio para juntas roca-roca o roca-hormigón conlleva a un trabajo extenso y que ha sido objeto de estudio en las investigaciones realizadas por Gutiérrez [9] y Gu *et al.* [13]. Sin embargo, los tiempos de ejecución y la cantidad de ensayos pueden ser reducidos haciendo uso de herramientas computacionales potentes como el código PFC2D.

Tal como se ha visto en los modelos desarrollados en esta investigación y su comparación con las curvas experimentales de Gutiérrez [9] y Gu *et al.* [13], se establece que PFC2D permite modelar de manera adecuada el comportamiento de ensayos de compresión uniaxial en roca y hormigón, así como también, ensayos de corte directo en juntas planas roca-hormigón bajo las mismas condiciones del ensayo en el laboratorio, permitiendo su aplicación como herramienta predictiva en el cálculo de los parámetros de resistencia en este tipo de problemas.

5. AGRADECIMIENTOS

Queremos mostrar nuestro agradecimiento a la Fundación José Entrecanales Ibarra, una de cuyas Becas Doctorales ha financiado parcialmente esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] A. Krounis, F. Johansson y S. Larsson, “Shear strength of partially bonded concrete-rock interfaces for application in dam stability analyses”, *Rock Mech Rock Eng*, doi: 10.1007/s00603-016-0962-8, 49:2711-2722 (2016).
- [2] A. Serrano, C. Olalla y R.A. Galindo, “Micromechanical basis for shear strength of

- rock discontinuities”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 70:33-46 (2014).
- [3] D.O. Potyondy y P.A. Cundall, “A bonded-particle model for rock”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41:1329-1364 (2004).
- [4] Itasca Consulting Group Inc. PFC (Particle Flow Code), Version 5.0. Minneapolis: ICG. (2014).
- [5] J.M. Royo y S. Melentijevic, “Comparison of laboratory direct shear test results with the numerical analysis”, *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 199 -204 (2014).
- [6] M. Bahaaddini, G. Sharrock y B.K. Hebblewhite, “Numerical direct shear tests to model the shear behavior of rock joints”, *Computers and Geotechnics*, 51: 101-1015 (2013).
- [7] M. Bahaaddini, P.C. Hagan, R. Mitra y M.H. Khosravi, “Experimental and numerical study of asperity degradation in the direct shear test”, *Engineering Geology*, 204: 41-52 (2016).
- [8] M. Bahaaddini, P.C. Hagan, R. Mitra y B.K. Hebblewhite, “Numerical investigation of asperity degradation in the direct shear test of rock joints”, *Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment*, 391-397 (2013).
- [9] M.C. Gutiérrez, “Shear resistance for concrete dams: Laboratory test”, *Master’s thesis*, Norwegian University of Science and Technology (2013).
- [10] M.S. Asadi, V. Rasouli y G. Barla, “A laboratory shear cell used for simulation of shear strength and asperity degradation of rough rock fractures”, *Rock Mech Rock Eng*, doi: 10.1007/s00603-012-0322-2, 46:683-699 (2013).
- [11] P. Malkowski, “Behaviour of joints in sandstones during the shear tests”, *Acta Geodun. Geomater*, doi: 10.13168/AGG.2015.0034, 12, 4(180):399-410 (2015).
- [12] S.A. Liahagen, “Stabilitet av betongdammer – Ruhetens påvirkning på skjærkapasiteten mellom betong og berg”, *Master’s thesis*, Norwegian University of Science and Technology (2012).
- [13] X.F. Gu, J.P. Seidel y C.M. Haberfield, "Direct Shear Test of Sandstone-Concrete Joints", *Int. J. Geomech*, doi:10.1061/(ASCE)1532-3641(2003)3:1(21), 21-33 (2003).