

ESTUDIO DEL EFECTO DE TAMAÑO EN LA MODELIZACIÓN MESOMECAÁNICA DE LA PRODUCCIÓN DE ARENA EN PERFORACIONES.

D. Garolera, C.M. López, I. Carol

Departament d'Enginyeria del Terreny i Cartogràfica, ETSECCPB,
Universitat Politècnica de Catalunya, C/ Jordi Girona nº 1-3, mòdul D2,
08034 Barcelona.
daniel.garolera@upc.edu

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta de estudio a nivel mesoestructural para el problema de la producción de arena en pozos. Se propone un análisis numérico de elementos finitos con elementos junta sin espesor, que permite representar directamente la estructura granular mediante la analogía interfase-contacto. Los granos son discretizados como grupos de elementos continuos separados por elementos junta. En el estadio en el que se encuentra la simulación (resolución del problema mecánico) se ha podido constatar la importancia de los aspectos microestructurales y que, aunque de manera cualitativa aún, el procedimiento es capaz de capturar resultados observados experimentalmente. Se presentan resultados del modelo para dos simulaciones del efecto escala: el tamaño de grano y el diámetro de perforación. Se ha observado que cuando disminuye el tamaño de grano a igual diámetro y cuando aumenta el diámetro a igual tamaño de grano, disminuye la resistencia y crece el grado de fisuración.

ABSTRACT

This paper presents a proposal of mesostructural analysis for the rock sanding problem in oil reservoirs. A finite elements analysis with zero-thickness interface is used. This technique allows a direct representation of the granular microstructure by means of interface-joint analogy. Grains are discretized as groups of continuum elements and the contact between grains is represented by means of interface elements. The ongoing results (mechanic stage) show us the importance of microstructural aspects of the modelling: even though the results are qualitative, the procedure is able to capture experimental behaviour. In the present paper two size-effect simulations are presented, the effect of the grain size and the effect of diameter size. A decrease of resistance and increase of fissuration have been observed in two cases: decrease of grain size for the same perforation diameter; increase of diameter for the same grain size.

PALABRAS CLAVE: Producción de arena, modelización mesoestructural, elementos de interfase.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se centra en el estudio de la producción de arena en pozos, un problema de interés económico en la ingeniería del petróleo. La producción de arena (*sand production* o *rock sanding*) es un fenómeno que tiene lugar en los pozos cuando la roca almacén no es capaz de resistir la tensión impuesta durante el proceso de extracción, produciéndose una disgregación del medio. En el caso de pozos de extracción de hidrocarburos, según la SPE¹, esta problemática afecta en menor o mayor grado al 70% de las reservas de gas y petróleo, dado que se encuentran en materiales arenosos.

El fenómeno es causado por la fracturación del medio debido a la liberación de tensiones que tiene lugar durante la excavación, así como al gradiente de presiones impuesto en la extracción del petróleo. Esta fracturación lleva consigo, una pérdida de cohesión de los granos y, consecuentemente, la producción de partículas sólidas. El resultado final de este proceso

puede variar desde la simple erosión de la pared de la perforación hasta el colapso de la cavidad. Los principales factores que influyen en este problema son:

- El estado tensional del medio, el cual provoca un gradiente de presiones alrededor de la perforación.
- El tipo de perforación y terminación².
- El flujo de extracción, que actúa de dos maneras. Por una parte impone un gradiente de presión de fluido, que provoca a su vez una disminución de las tensiones efectivas, lo cual aumenta el estado tensional de la matriz de la roca. Por otra parte, las partículas arrastradas que facilitan el proceso.
- La naturaleza de la roca, propiedades resistentes y plásticas del material.

Tradicionalmente esta problemática se ha solventado con la utilización de sondeos revestidos y filtros. No obstante, se ha constatado una pérdida de productividad debido al uso de dichas técnicas, cosa que ha impulsado el estudio de la producción de arena, con objeto de mejorar los rendimientos. Cabe señalar que en la actualidad, y utilizando técnicas avanzadas, solamente

¹ SPE: *Society of Petroleum Engineering*

² *Completion*

el 40% del volumen total de petróleo puede ser extraído del reservorio.

Con el estudio de esta temática, se pretende hallar un equilibrio entre la producción de arena y la producción de petróleo, donde los principales problemas asociados a una sobreproducción de arena son:

- Bloqueo de la perforación. Consecuentemente, la pérdida de producción de crudo.
- Aumento de los costes de explotación, debido a la corrosión de los equipos.
- Problemas medioambientales con los residuos impregnados de petróleo.

Este trabajo se ha centrado en el análisis de las perforaciones realizadas mediante cañones³. Este tipo de orificios, de poco diámetro (2 cm) y realizados transversalmente a la perforación principal, tienen como objetivo aumentar la capacidad de drenaje del pozo (figura 1). Debido a la técnica utilizada, el estudio de producción de arena es básico para conocer la viabilidad del procedimiento, puesto que las técnicas de revestimiento no son factibles. En el presente estudio se analiza una sección tipo de estas perforaciones laterales (señalada en negro en la figura 1). Mayor información sobre la temática puede consultarse en [1-2].

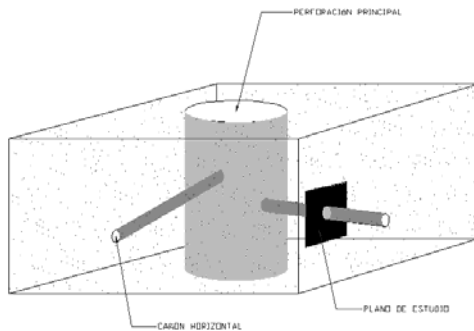


Figura 1. Esquema de una perforación petrolífera utilizando la técnica de perforación con cañones. En negro, detalle de la zona modelizada en este estudio.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

2.1. Modelo de discontinuidades

Entre los métodos que permiten una aproximación discreta al problema de la fisuración, se ha empleado el método de los elementos finitos (MEF) con la inserción de elementos junta. Estos elementos especiales sin espesor [3], formulados en términos de tensiones (normal y tangencial) y desplazamientos relativos correspondientes, permiten representar el fenómeno de generación y propagación de la fisuración. Un aspecto importante a definir es la ley constitutiva de estos elementos, en nuestro caso un modelo basado en la teoría de la elasto-plasticidad que incorpora conceptos y parámetros de la Mecánica de Fractura. La superficie de

fractura es una hipérbola de tres parámetros: c , cohesión aparente; χ , resistencia a tracción y ϕ , ángulo de fricción interna, expresada como:

$$F(\sigma, p(W^{cr})) = \sigma_T^2 - (c - \sigma_N \tan \phi)^2 + (c - \chi \tan \phi)^2 \quad (1)$$

La evolución de la superficie de fractura (softening) se produce por el decrecimiento de sus parámetros, controlados por una variable de historia que es el trabajo de fractura disipado, definido de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} (\sigma_N \geq 0) \quad dW^{cr} &= \sigma_N \delta u_N^{cr} + \sigma_T \delta u_T^{cr} \\ (\sigma_N < 0) \quad dW^{cr} &= \sigma_T \delta u_T^{cr} \left(1 - \left| \frac{\sigma_N \tan \phi}{\sigma_T} \right| \right) \end{aligned} \quad (2)$$

La integración de la ley constitutiva se realiza mediante un algoritmo basado en un procedimiento implícito (*Backward-Euler*) con subincrementación [4]. Este método proporciona una evaluación de la matriz tangente que es consistente, incluso cuando se requiere subincrementación. Mayores detalles del modelo constitutivo pueden encontrarse en [3,5,6].

2.2. Modelización microestructural

Para el estudio del proceso de producción de arena se emplea una metodología similar a la utilizada anteriormente para en el análisis de muestras de hormigón [6]. Ambos materiales están compuestos por fases de distintas características que inciden de manera determinante en el comportamiento mecánico observado. La discretización de la zona de estudio se inicia con la creación de una corona circular de polígonos de Voronoi, que representa cada grano de arena. Posteriormente, sobre el perímetro exterior, se agrega un mallado continuo con el fin de asegurar una correcta transmisión de las condiciones de contorno hacia el interior (Figura 2). Los polígonos se subdividen con elementos triangulares en su interior, y se incorporan elementos junta en los contornos de cada grano. Una detallada descripción de la generación de este tipo de mallas puede consultarse en [7,8].

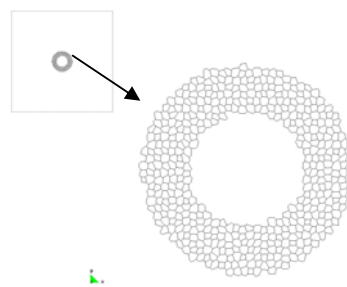


Figura 2. Modelización propuesta para el análisis de producción de arenas mediante el MEF con elementos junta.

³ Perforations guns

2.3. Metodología de la simulación

Durante el proceso de cálculo se contemplan diferentes estados de carga. En primer lugar, se procede a una compresión de la muestra, simulando la introducción de las tensiones iniciales ($\sigma'_{\text{exterior}}$). Luego, se inicia la disminución de tensión en el interior de la perforación ($\sigma'_{\text{interior}}$), simulando de esta manera el proceso de excavación. Finalmente, al introducir las presiones de fluido, se inicia el proceso de extracción (interpretado como un gradiente hidráulico hacia el interior de la perforación). Durante los dos últimos pasos, y en función de la fracturación producida en la junta, puede tener lugar la producción de arena, que se lleva a cabo mediante la eliminación automática de los granos o conjuntos de granos que quedan sueltos.

Cabe resaltar que en los dos primeros pasos, compresión y perforación, se considera que el cambio del estado tensional es debido exclusivamente al cambio de tensiones efectivas, o lo que es lo mismo, no hay variación de presiones de fluido. Esta suposición permite franquear el problema acoplado en los primeros pasos, con el consecuente ahorro computacional.

3. RESULTADOS

Se han analizado cualitativamente y para las dos primeras etapas de la simulación (aplicación de tensiones in-situ y excavación) dos aspectos del efecto tamaño de la microestructura:

1. Variación del tamaño de grano a igual diámetro de perforación.
2. Variación del diámetro para igual tamaño de grano.

En todos los casos, en un primer paso se ha impuesto una compresión uniforme en los contornos de la malla (borde externo e interior de la corona) de 10 MPa. Posteriormente, se disminuye progresivamente la tensión en el interior de la perforación. Se han adoptado los siguientes parámetros materiales:

Tabla 1 - Parámetros del modelo elástico correspondientes a los elementos del continuo (granos y roca)

E	25E+06 kPa
v	0.27000

Tabla 2 - Parámetros del modelo elasto-plástico correspondientes a los elementos de interfase. (contactos).

Kn	250E+09 kPa/m
Kt	250E+09 kPa/m
tan(ϕ)	0,57735 ($\phi = 30^\circ$)
Xo	10,0 kPa
C	40,0 kPa
GfI	0,00010 kN/m
GfIIa	0,00100 kN/m

El similar proceso de evolución de la fisuración en cada caso analizado, se ejemplifica en la Figura 3 para un tamaño de grano de 0,7 mm y un diámetro de perforación de 2 cm. En la secuencia se puede apreciar el progresivo crecimiento de la fisuración, expresado por la evolución de la energía de fractura gastada en cuatro etapas de la disminución de la presión interior.

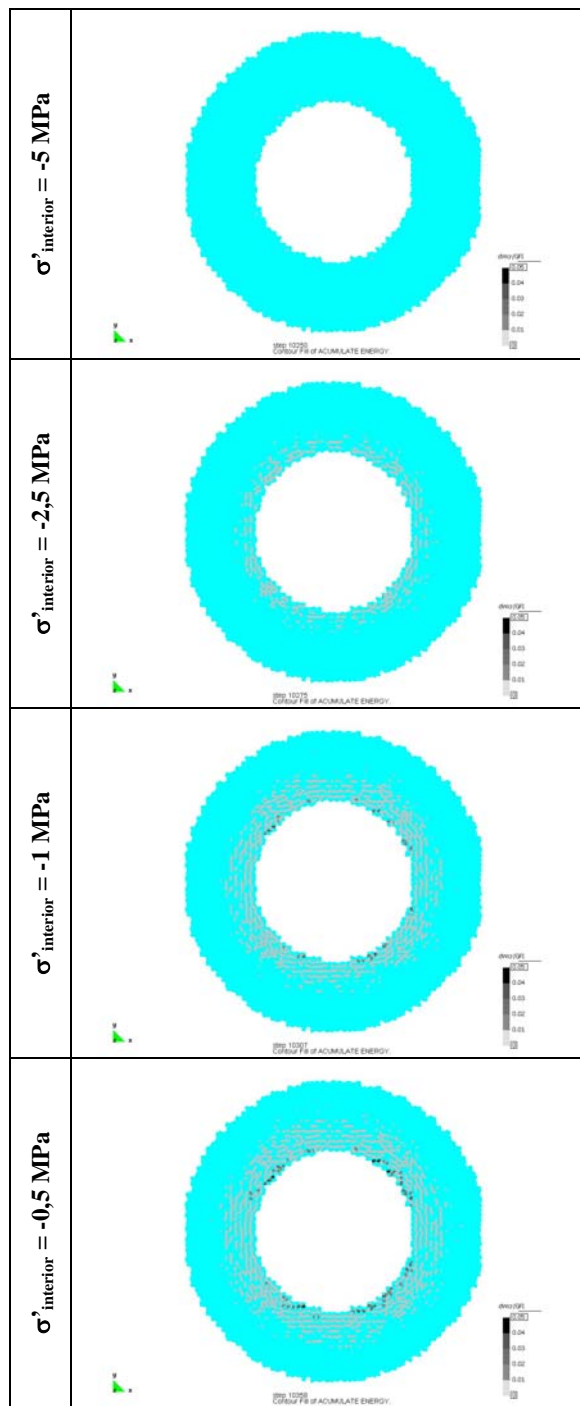


Figura 3. Evolución de la fisuración (en términos de la energía de fractura disipada) para la malla con tamaño de grano de 0,7 mm y diámetro de perforación de 2 cm.

3.1. Influencia del tamaño de grano.

En este caso se han analizado tres diferentes discretizaciones para un mismo tamaño del diámetro de perforación de 2 cm, correspondientes a los siguientes tamaños de grano: 1,4 mm, 0,7 mm y 0,3 mm (Figura 4).

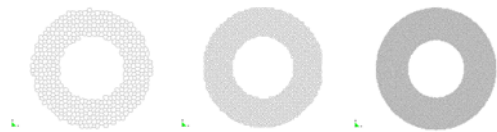


Figura 4 - Geometrías de la corona circular para diferentes tamaños de grano (1,4 mm, 0,7 mm y 0,3 mm de izquierda a derecha).

En la Figura 6 se presentan los resultados de la energía de fractura disipada en cada uno de los tres casos, para dos valores de la presión en el interior de la perforación. Se puede apreciar en la figura, que para igual instante de disminución de la presión, el estado e intensidad de la fisuración aumenta a medida que disminuye el tamaño de grano.

3.2. Influencia del diámetro de la perforación.

En este caso se han analizado tres diferentes tamaños del diámetro de perforación para un mismo tamaño de grano (0,3 mm): 3 cm, 2 cm y 1 cm (Figura 5).



Figura 5 - Geometrías de la corona circular para diferentes diámetros de perforación (3 cm, 2 cm y 1 cm de izquierda a derecha).

En la figura 7 (de características similares a la Figura 6) se puede apreciar claramente para ambos niveles de presión interior, que el estado de fisuración resulta más intenso en la medida que aumenta el diámetro de la perforación.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado, para la parte mecánica del problema de la producción de arena, dos aspectos de la influencia del tamaño del grano respecto al tamaño de perforación. Los resultados, aunque cualitativos, ponen de manifiesto lo que a priori cabría esperar, mayor estabilidad y menor degradación en la medida que aumenta la relación entre el tamaño de grano y el tamaño de la perforación.

Asimismo, se ha podido verificar la potencialidad de la metodología desarrollada frente a otras que no tienen en cuenta la microestructura, que para estos casos de diámetro pequeño de perforación, juega un papel importante en el comportamiento general de la

estructura. Resulta notable que estos “efectos de tamaño”, que no pueden obtenerse con modelos de continuo, sin embargo surgen de forma natural con la metodología empleada. Actualmente, el análisis acoplado (tercera etapa de extracción) se encuentra aún en período de pruebas, siendo sus resultados muy incipientes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MEC (Madrid) y al Ministerio de Fomento (Madrid) la ayuda recibida a través de los proyectos de investigación BIA2006-12717 y 80015/A04, respectivamente. El primer autor agradece la beca FPU concedida por el MEC y la ayuda de la ETSECCPB-UPC para la asistencia al congreso.

REFERENCIAS

- [1] E. Papamichos, I. Vardoulakis, J. Tronvoll, and A. Skjaerstein. *Volumetric sand production model and experiment. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* (2001). 25:789-808.
- [2] P. Papanastasiou, E. Nicholson, G. Goldsmith, and J. Cook. *Sanding prediction: Experimental results and numerical modeling.* In et al., T., editor, *Poromechanics*, pp 457_462. Balkema, Rotterdam
- [3] I. Carol, P. Prat, y C.M. López. *Normal/shear cracking model: application to discrete crack analysis. Journal of engineering mechanics*, (1997). pp 765-773.
- [4] A. Pérez-Foguet, A. Rodríguez-Ferran, and A. Huerta. *Consistent tangent matrices for substepping schemes. Computer methods in applied mechanics and engineering.* (2001). 190:4627 4647.
- [5] A. Caballero. *3D meso-mechanical numerical analysis of concrete using interface elements.* Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya, (2005).
- [6] C.M. López. *Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta.* Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya, (1999).
- [7] D. Garolera, C.M. López y I. Carol. *Microestructural analysis of the rock sanding production using finite element method with interface elements. XX Anales de la Mecánica de Fractura.* (2003). Vol. 20, pp 71-76.
- [8] D. Garolera, C.M. López, I. Carol y P. Papanastasiou. *Micromechanical analysis of the rock sanding problem. Journal of the Mechanical Behaviour of Materials.* (2006). Vol 16, NOS 1-2 pp 45-53.

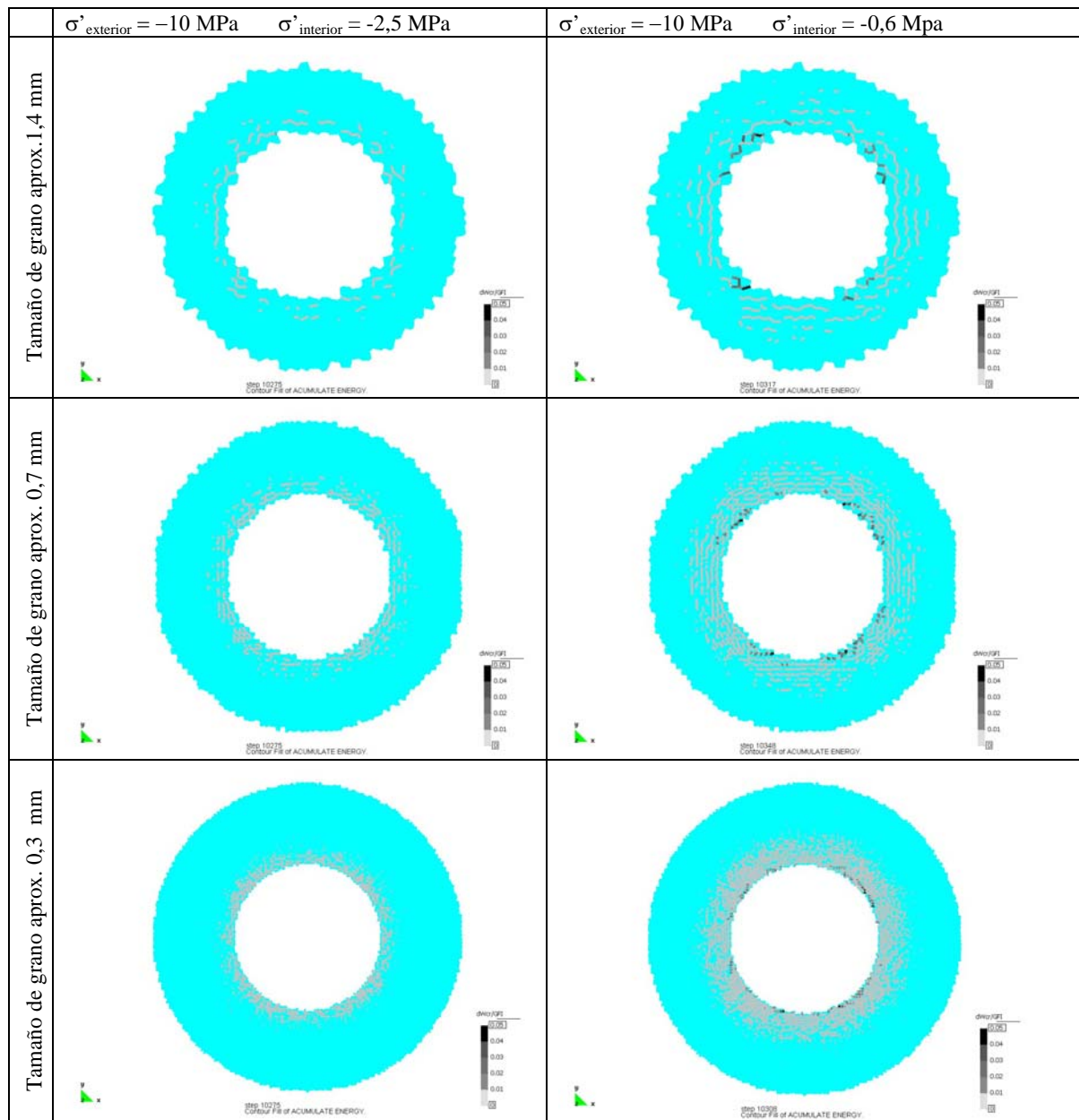


Figura 6 - Evolución de la energía de fractura disipada (W_{cr}/G_{fI}) para igual tamaño de perforación (2 cm) y diferentes tamaños de grano (1,4 mm, 0,7 mm y 0,3 mm). Los casos se presentan en dos estados de carga, siendo $\sigma'_{\text{exterior}}$ el valor de la tensión en el contorno exterior de la malla (en ambos casos equivalente a 10 MPa); el valor de $\sigma'_{\text{interior}}$ corresponde al valor de la tensión en el interior de la perforación.

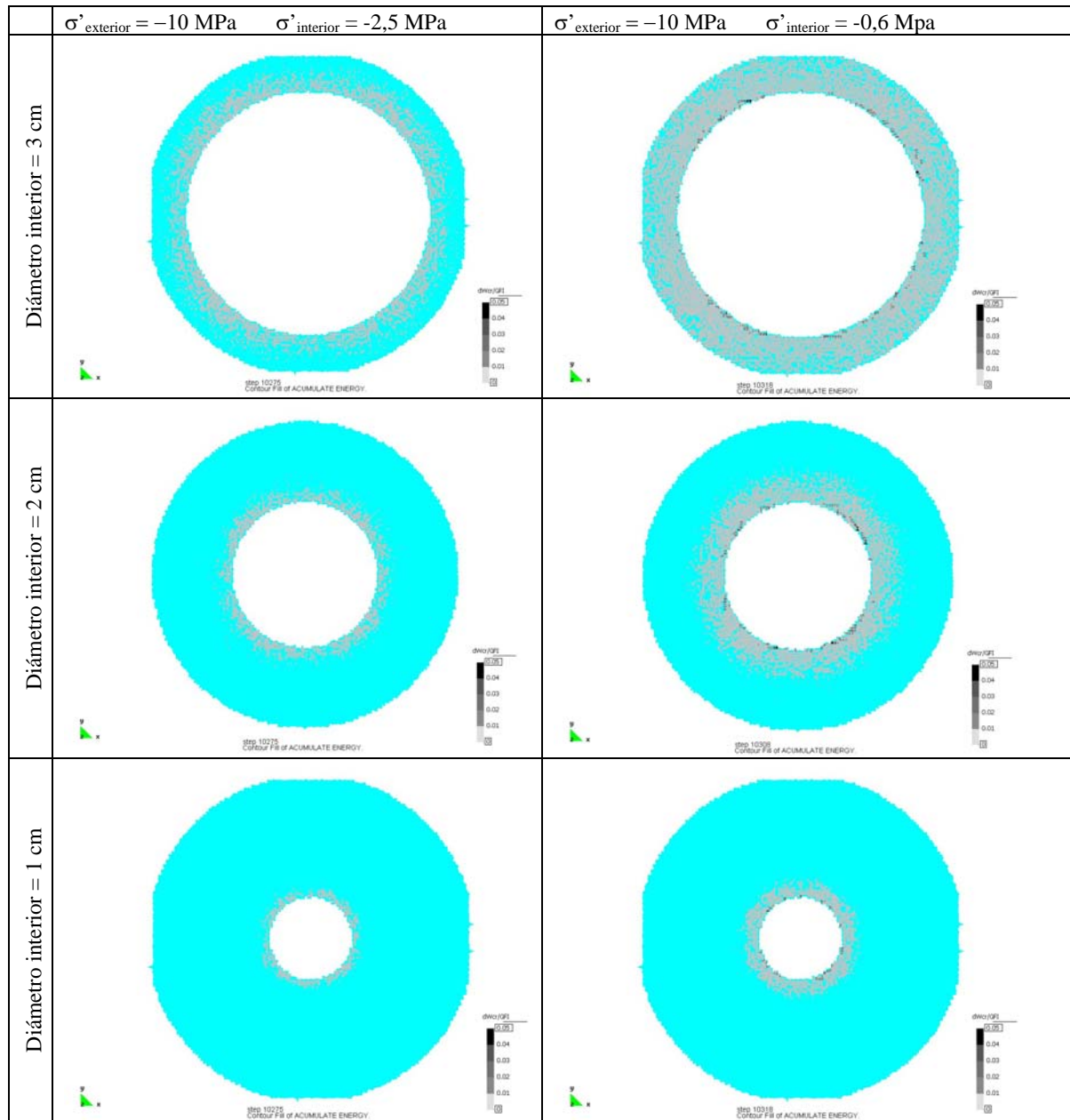


Figura 7 - Evolución de la energía de fractura disipada (W_{cr}/G_{fI}) para igual tamaño de grano (0,3 mm) y diferente tamaños de perforación (3 cm, 2 cm y 1 cm). Los casos se presentan en dos estados de carga, siendo $\sigma'_{\text{exterior}}$ el valor de la tensión en el contorno exterior de la malla (en ambos casos equivalente a 10 MPa); el valor de $\sigma'_{\text{interior}}$ corresponde al valor de la tensión en el interior de la perforación.