

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 692 221**

51 Int. Cl.:

E21B 43/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.02.2015 PCT/EP2015/053423**

87 Fecha y número de publicación internacional: **27.08.2015 WO15124633**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.02.2015 E 15705983 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.08.2018 EP 3108088**

54 Título: **Método implementado en un ordenador para la simulación numérica de un medio poroso**

30 Prioridad:

19.02.2014 EP 14382056

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

30.11.2018

73 Titular/es:

**REPSOL, S.A. (50.0%)
C/ Méndez Álvaro, 44
28045 Madrid, ES y
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
(50.0%)**

72 Inventor/es:

**MOOKANAHALLIPATNA RAMASESHA,
LAKSHMIKANTHA;
SEGURA SERRA, JOSÉ MARÍA;
ALVARELLOS IGLESIAS, JOSE;
CAROL VILARASAU, IGNACIO;
PRAT CATALAN, PERE;
ALIGUER PIFERRER, IGNASI y
GAROLERA VINENT, DANIEL**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 692 221 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

MÉTODO IMPLEMENTADO EN UN ORDENADOR PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN MEDIO POROSO

5

OBJETO DE LA INVENCION

El objeto de la invención es un método implementado en un ordenador para la simulación numérica de un medio poroso que puede comprender una única o múltiples fracturas hidráulicas que interactúan en un medio fracturado naturalmente o continuo. El método calcula numéricamente la propagación de una fisura, o conjunto de fisuras, por ejemplo bajo la presión de fluido impuesta artificialmente a través de un pozo o perforación en una masa de roca.

Esto se consigue usando el Método de Elementos Finitos y los elementos especiales denominados elementos de unión o junta sin espesor en la bibliografía especializada, que se insertan previamente a lo largo de todas las trayectorias de fisuras potenciales en la masa de roca (trayectorias de fracturas existentes previamente naturales y artificiales más de nuevas fracturas potenciales principales).

20

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Los elementos de unión/junta sin espesor del tipo Goodman, se han usado ventajosamente para resolver muchos problemas en mecánica de sólidos que implican juntas o discontinuidades de material.

25

Estos elementos se insertan entre elementos convencionales para permitir saltos en el campo de la solución, sus variables constitutivas cinemáticas ("tipo deformación") son desplazamientos relativos, y las correspondientes variables estáticas ("tipo tensión") son tracciones de tensión.

30

En particular, se han usado estos elementos para representar uniones de rocas en el contexto de masas de roca, contactos entre el suelo y refuerzo de acero en estructuras terrestres reforzadas, o fisuras en hormigón u otros materiales cuasifrágiles, etc.

35

Cada aplicación puede requerir leyes constitutivas diferentes, o bien de tipo friccional o bien basadas en la fractura con estructura elastoplástica.

Por otro lado, el modelado numérico de la Fractura Hidráulica (HF), plantea un reto considerable debido a la naturaleza discontinua de la fractura, y al fuerte acoplamiento entre las ecuaciones que gobiernan el movimiento (equilibrio de momentos) y las ecuaciones que controlan la presión de fluido (continuidad de masa de fluido). El acoplamiento se debe a la influencia mutua entre el comportamiento de fluido y mecánico: por un lado la presión de fluido produce deformaciones, y por otro lado las deformaciones modifican las propiedades de fluido (capacidades de almacenamiento y conductividades).

La publicación "Numerical modeling of rock joints and fractures", Society of Petroleum Engineers, SPC, 1995, describe un modelo de interfaz de basado en la plasticidad para describir el comportamiento mecánico de las juntas y fracturas entre rocas, en el que se describe brevemente la formulación isoparamétrica del elemento junta sin espesor y el procedimiento de implementación de las leyes constitutivas en un modelo estándar no lineal.

Los métodos numéricos dados a conocer en la técnica anterior simulan las trayectorias de fractura existentes previamente y no pueden predecir la apertura de fractura o ramificación de fractura.

La presente invención proporciona un método numérico que permite al experto simular un medio poroso bajo situaciones de carga complejas tales como inyección en orificio, en la que se produce una apertura y propagación de la fractura sin necesidad de definir previamente e imponer la geometría de la fractura en la malla numérica como fractura existente previamente, en su lugar la fractura se desarrolla de manera espontánea durante el cálculo, entre un conjunto de líneas de fractura potenciales predefinidas.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

La presente invención se refiere a un método implementado en ordenador para su uso en la simulación numérica de una única o múltiples fracturas hidráulicas que interactúan usando elementos junta sin espesor.

Según un primer aspecto de la invención, el comportamiento geomecánico y de flujo de fluido acoplado del medio poroso se simula siguiendo las siguientes etapas:

definir el dominio de interés;

crear una malla numérica que discretiza el dominio de interés para generar un modelo geomecánico y de fluido del medio poroso con elementos finitos convencionales que comprende una delimitación asociada con el dominio en el que los bordes de la malla siguen al menos los contornos del dominio, los estratos de roca y las fracturas naturales y/o artificiales existentes previamente,

dotar a los elementos de malla numérica de propiedades mecánicas, al menos propiedades elásticas; y propiedades de flujo, al menos propiedades de permeabilidad; formando dicha malla numérica dotada de propiedades un modelo geomecánico y de flujo de fluido,

dotar a los elementos de malla numérica de los valores de tensión inicial y presión de fluido inicial,

asignar las condiciones de contorno,

ensamblar las ecuaciones de elementos finitos para todo el dominio,

resolver las ecuaciones para obtener la evolución en el tiempo para una solución acoplada de los modelos de flujo de fluido y geomecánico.

Este modelo reproduce el comportamiento del medio poroso que comprende un único fluido incompresible almacenado en dicho medio poroso. El medio poroso puede deformarse por cargas tales como el campo de tensión inicial, gravedad, presión de fluido; y, cargas adicionales tales como una carga distribuida prescrita y/o flujos en los contornos. Otras causas pueden ser desplazamientos prescritos y/o presiones de fluido en los contornos, carga prescrita y/o flujo en un punto o desplazamiento prescrito y/o presión de fluido en un punto.

A lo largo de la descripción se usa una formulación general en tres dimensiones (3D); sin embargo, la simulación bidimensional (2D) se considera un caso particular del modelo formulado en 3D, derivado según procedimientos bien establecidos en la bibliografía especializada.

Adicionalmente a los aspectos descritos en los párrafos anteriores de esta sección, crear el modelo numérico para el análisis también comprende las siguientes etapas:

crear una malla numérica usando elementos junta sin espesor a lo largo del plano medio de las trayectorias de las fracturas existentes previamente,

localizar superficies que se extienden a lo largo de contornos de elementos finitos a lo largo de las que pueden propagarse nuevas fracturas;

5 crear una malla numérica usando elementos junta sin espesor a lo largo del plano medio de las nuevas fracturas.

Una fractura comprende dos superficies enfrentadas en lados opuestos del plano medio de fractura, una primera superficie que es un contorno del medio continuo y una segunda superficie que es el contorno del medio continuo ubicado en el otro lado del plano medio de la 10 fractura. Cuando la fractura está cerrada ambas superficies están en contacto y cuando la fractura está abierta debido a las condiciones de presión, ambas superficies están lo suficientemente cerca para considerar que el espacio ubicado dentro de la fractura puede modelarse como un volumen extendido principalmente en un plano medio y que tiene un 15 determinado espesor. El uso de elementos junta sin espesor para representar fracturas, o bien abiertas o bien cerradas, está justificado por el pequeño espesor (es decir, abertura) de la fractura comparado con las otras dimensiones del problema.

Estas etapas permiten el modelado hidromecánico acoplado de un 20 medio poroso saturado para los casos de un medio intacto (es decir, sin fracturas), un medio fracturado de manera natural (es decir, fracturas existentes previamente) y/o la simulación de fracturas en desarrollo (es decir, fracturas hidráulicas) porque se alcanza la resistencia del material, o cualquier combinación de lo mencionado anteriormente.

25 El inicio de la fractura y la dirección de propagación de la fractura no pueden predecirse de antemano. La forma y trayectoria de una fractura creada recientemente depende de la estructura del medio poroso, es decir, sus propiedades materiales, pero también del campo de tensión *in situ*, la distribución de capas, los conjuntos de uniones existentes 30 previamente, o interferencias con otras fracturas hidráulicas creadas previamente, y los valores instantáneos de presión del fluido inyectado entre otros efectos.

La presente invención localiza superficies que se extienden a lo largo de contornos de elementos finitos a lo largo de las que pueden 35 propagarse nuevas fracturas aunque no existan fracturas existentes previamente. Aparecerán fracturas en estas superficies sólo si las

condiciones de tensión efectiva alcanzan la superficie de fallo (o superficie de fluencia) del medio poroso. Si no, el modelo se comportará de manera efectiva como si no existiesen elementos junta sin espesor en la superficie.

5 En una realización particular, una región del dominio se dota de superficies que se extienden a lo largo de todos los contornos de elementos finitos permitiendo al experto simular la creación de fracturas en cualquier trayectoria de fractura potencial, incluyendo fracturas que se intersecan o se ramifican en estructuras complejas. El límite de la complejidad de la estructura de las fracturas viene dado por la
10 resolución de la malla numérica.

 En una realización particular, la región del dominio dotada de superficies que se extienden a lo largo de todos los contornos de elementos finitos es el dominio completo.

15 Una ventaja de la presente invención es que las discontinuidades de presión de fluido y las líneas de flujo localizadas pueden representarse en la misma malla numérica de elementos finitos usada para el problema mecánico, así como la influencia de la presión de fluido sobre tensiones mecánicas o, al contrario, de aberturas de fractura o fisura sobre la
20 redistribución de flujo.

 Durante la simulación, si una fractura está abierta, el elemento sin espesor modela el flujo transversal y el flujo a lo largo de la fractura. Si la fractura se considera cerrada, aún puede modelar el flujo transversal a la fractura dependiendo del valor asignado a su
25 conductividad transversal.

 En una realización particular, se usa el método numérico para simular un medio poroso que comprende fracturas para la simulación de depósitos de petróleo en el que el dominio comprende al menos un orificio de inyección y en el que antes de ensamblar el sistema de ecuaciones el
30 método comprende asignar cargas según las condiciones de inyección, es decir, el caudal o la presión de fluido.

 En una realización particular, después de resolver la evolución en el tiempo para una solución acoplada de los modelos de flujo de fluido y geomecánico, la malla numérica se vuelve a mallar según los
35 desplazamientos de las fracturas para modelar la propagación de dichas fracturas.

Las fracturas existentes previamente y las nuevas fracturas pueden evolucionar de tal manera que la tensión efectiva aumenta cerrando la fractura. En este caso, el elemento finito sin espesor reproduce una fractura cerrada ubicando sus nodos en superficies adyacentes. En este caso el flujo a lo largo de la fractura es cero.

A continuación se darán a conocer realizaciones particulares de la invención.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Éstas y otras características y ventajas de la invención se verán más claramente a partir de la siguiente descripción detallada de una realización preferida proporcionada sólo a modo de ejemplo ilustrativo y no limitativo en referencia a los dibujos adjuntos.

Figura 1 Esta figura muestra un esquema con las dos superficies enfrentadas de la fractura, separadas porque la fractura está abierta, con las coordenadas locales principales definidas por el plano medio. Ambas superficies se muestran inclinadas con el fin de tener acceso visual a la fractura.

Figura 2 Esta figura muestra un esquema adicional de las superficies anteriores que muestra el vector de desplazamiento $\hat{u} = (u_n, v_{f1}, v_{f2})$.

Figura 3 Esta figura muestra la superficie de fallo hiperbólica $F(\sigma_n, \tau)$ representada en el plano σ - τ .

Figura 4 Esta figura muestra un esquema de la vista en sección de una fractura y las variables principales implicadas en el modelo de fluido para la fractura.

Figura 5 Esta figura muestra un dominio que representa una sección transversal del orificio y la fractura de un ejemplo de validación.

Figura 6 Esta figura muestra una representación esquemática de una malla de elementos finitos triangulares lineales convencional que discretiza el dominio de la figura 5.

Figura 7 Esta figura muestra un detalle de la discretización de la figura 6, en el punto de inyección.

- Figuras 8a-8b Estas figuras muestran condiciones de carga y de contorno aplicadas en la validación de un algoritmo según la invención.
- 5 Figura 9 Esta figura muestra la evolución del desplazamiento de abertura de boca de fisura (CMOD) para el caso impermeable que se obtiene usando un algoritmo de la invención, junto con soluciones de Spence, GDK y Boone & Ingraffea.
- 10 Figura 10 Esta figura muestra la evolución de la presión de fluido de boca de fisura (CMP) para el caso impermeable que se obtiene usando un algoritmo de la invención, junto con soluciones de Spence, GDK y Boone & Ingraffea.
- Figura 11 Esta figura representa el perfil de presión de fluido para un tiempo de 25s a lo largo de la fractura tanto para el presente cálculo como para los resultados de Boone & Ingraffea.
- 15 Figura 12 Esta figura muestra la evolución del desplazamiento de abertura de boca de fisura (CMOD) para el caso permeable que se obtiene usando un algoritmo de la invención, junto con resultados de Boone & Ingraffea.
- Figura 13 Esta figura muestra la evolución de la presión de fluido de boca de fisura (CMP) para el caso permeable que se obtiene usando un algoritmo de la invención, junto con resultados de Boone & Ingraffea.
- 20 Figura 14 Esta figura muestra un dominio que representa una sección transversal del orificio y tres fracturas de un ejemplo de validación.
- 25 Figuras 15a-15b Estas figuras muestran el modelo de elementos finitos 2D para el segundo ejemplo de validación y una representación detallada de la malla de elementos finitos en la zona cerca de los puntos de inyección.
- 30 Figura 16 Esta figura muestra las condiciones de contorno para el segundo ejemplo de validación.
- Figura 17 Esta figura muestra las distribuciones de abertura de fractura y presión de fluido al final de la primera fase de inyección.
- Figura 18 Esta figura muestra las distribuciones de abertura de fractura y presión de fluido al final de la segunda fase de inyección.
- 35

Figura 19 Esta figura muestra las distribuciones de abertura de fractura y presión de fluido al final de la tercera fase de inyección.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

5 La presente invención propone un método implementado en un ordenador para la simulación numérica de un medio poroso que puede comprender la interacción de múltiples fracturas hidráulicas y fracturas naturales, en el que todo el comportamiento del medio poroso se simula según un método según la reivindicación 1.

10 Los elementos junta o de unión sin espesor son elementos finitos introducidos entre caras de elementos del medio continuo adyacentes (en 3D) o bordes (en 2D), con la característica especial de que tienen una dimensión menos que los elementos del medio continuo convencionales, es decir, son líneas en 2D, o superficies en 3D. La integración de estos
15 elementos se realiza usando un sistema de coordenadas ortogonal local basado en la normal a la superficie, y la dirección longitudinal (en 2D) o direcciones (en 3D) alineadas con la línea de junta (en 2D) o superficie de junta (en 3D).

20 Se asigna un modelo numérico constitutivo a cada elemento junta sin espesor que reproduce una fractura, o bien una nueva fractura o bien una fractura existente previamente, tanto en la parte geomecánica del modelo como en la parte de flujo de fluido del modelo.

25 Desde el punto de vista geomecánico, el modelo constitutivo de los elementos junta sin espesor define, para cada punto de esta junta, la relación entre la normal de la junta y la tensión cortante, y la correspondiente normal de la junta y desplazamientos relativos de cortante, tal como se muestra en las figuras 1 y 2, o, tal como se describe en más detalle:

30 - las componentes del vector de tensión total $\sigma_{mp} = (\sigma_n, \tau_{f1}, \tau_{f2})$ en el plano medio de fractura, donde $(n, f1, f2)$ es un sistema de referencia ortogonal siendo n su normal y estando alineadas $f1$ y $f2$ con el plano medio de fractura;

35 - las componentes del vector de desplazamiento $\hat{u} = (u_n, v_{f1}, v_{f2})$ definido como el desplazamiento relativo de dos puntos enfrentados en la fractura.

Se han considerado dos modelos diferentes como modelos constitutivos de junta: el primero es una formulación elastoplástica relativamente general, que es más adecuada para fracturas existentes, y el segundo es un modelo basado en fractura que es más adecuado para nuevas fracturas que se desarrollan durante la simulación.

En el primer modelo constitutivo de junta, el modelo geomecánico está caracterizado por una función de fluencia hiperbólica $F(\sigma_n, \tau)$ con la siguiente expresión:

$$F = \tau^2 - \tan^2 \varphi (\sigma_n^2 - 2a\sigma_n) = 0$$

siendo $\tau = \sqrt{\tau_{f1}^2 + \tau_{f2}^2}$; en la que la condición $F=0$ da como resultado una curva hiperbólica en el plano σ - τ que tiene dos asíntotas que se intersecan con un ángulo φ con respecto al eje σ en el punto a para $\tau=0$.

La figura 3 representa la superficie $F(\sigma_n, \tau)$, en la que el área sombreada es la región para $F < 0$ (régimen elástico), el área clara es la región para $F > 0$ (no admisible) y el límite $F=0$ es la curva parabólica hiperbólica (plasticidad). Esta curva tiene dos asíntotas que cruzan el eje σ en el punto a .

Las principales hipótesis simplificativas en este modelo constitutivo son plasticidad perfecta, ninguna dilatación y una relación elástica lineal entre la tensión normal y el desplazamiento relativo normal a compresión (tensión normal cero a tracción).

Una gran ventaja de este modelo constitutivo es que, bajo las hipótesis expuestas, puede integrarse de manera cerrada para un incremento pequeño pero finito (no infinitesimal) de desplazamientos relativos prescritos $\Delta u_n, \Delta v_{f1}, \Delta v_{f2}$, así como las tensiones $\sigma_n^n, \tau_{f1}^n, \tau_{f2}^n$ (y

por tanto $\tau^n = \sqrt{(\tau_{f1}^n)^2 + (\tau_{f2}^n)^2}$) y los desplazamientos relativos $u_n^n, v_{f1}^n, v_{f2}^n$ al comienzo de la etapa de tiempo n .

En esta integración de manera cerrada, en primer lugar se determina el estado de tensión normal y desplazamiento relativo al final del incremento. Esto se consigue simplemente añadiendo los desplazamientos relativos normales. Si el signo del valor resultante al final del incremento $u_n^{n+1} = u_n^n + \Delta u_n$ representa una abertura, la junta se considera abierta y las tensiones de la junta al final del incremento son

todas cero. Pero si el signo representa el cierre, a la tensión normal también se le asigna un valor compresivo y se calcula como $\sigma_n^{n+1} = K_n u_n^{n+1}$.

Una vez que se conoce la tensión normal, la razón entre τ_{f1} y τ_{f2} es la única incógnita en la integración de la ley constitutiva.

Dados los valores τ_{f1}^n y τ_{f2}^n al comienzo de una etapa de tiempo predeterminada n , los valores τ_{f1}^{n+1} y τ_{f2}^{n+1} al final de la etapa de tiempo n o en el comienzo de la siguiente etapa de tiempo $n+1$ se calculan satisfaciendo la siguiente ecuación:

$$\tan\left(\frac{\beta - \lambda}{2}\right) = \tan\left(\frac{\beta - \lambda_0}{2}\right) \left(\frac{\tau + \sqrt{\tau^2 + a^2 \tan^2 \phi}}{\tau_0 + \sqrt{\tau_0^2 + a^2 \tan^2 \phi}} \right)^{\frac{K_t \Delta v}{K_n \Delta u_n \tan \phi}}$$

10

dado que $\tau^2 - \tan^2 \phi (\sigma_n^2 - 2a\sigma_n) = 0$, donde β se refiere a los desplazamientos relativos tangenciales impuestos Δv_{f1} y Δv_{f2} , K_n y K_t son los módulos de rigidez normal y a cortante respectivamente, λ_0 es la razón entre τ_{f1}^n y τ_{f2}^n ; y, λ es la razón entre τ_{f1}^{n+1} y τ_{f2}^{n+1} . El modelo está definido en más detalle con algunos ejemplos en la publicación de Gens et al. 1995 [Gens, A., Carol, I., y Alonso, E.E., 1995. *Rock joints: FEM implementation and applications*. En Selvadurai, A.S.P. y Boulon, M., editores, *Mechanics of Geomaterial Interfaces*, págs. 395-420. Elsevier].

15

20

En la segunda realización particular, el modelo constitutivo geomecánico para la junta sin espesor consiste en una formulación basada en la energía de fractura que se formula también dentro del marco de trabajo de la elastoplasticidad. La superficie de fluencia todavía es una hipérbola, igual que en el caso anterior, pero en este caso incorpora cierta resistencia a tracción χ , adicional al ángulo de fricción y cohesión aparente, c , ϕ . Los parámetros χ , c de esta hipérbola evolucionan con una variable interna denominada como el trabajo invertido en procesos de fractura, W^{cr} , de tal manera que la resistencia a tracción χ desaparece cuando W^{cr} alcanza el valor de la energía de fractura a tracción G_f^I , y la cohesión aparente desaparece cuando alcanza una segunda energía de fractura a compresión-cortante asintótica G_f^{IIa} . El modelo y algunos ejemplos de verificación básicos se describen en detalle

25

30

suficiente en el artículo de Carol *et al.*, 1997 [Carol, I., Prat, P.C., y López, C.M., 1997. *A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis. ASCE J. Engrg. Mech.*, 123(8):765-773].

5 En una realización particular el modelo de flujo de fluido se formula en términos de la Ley de Darcy. Se asume el flujo de Darcy en los elementos del medio continuo y el flujo dentro de la fractura. La formulación en los elementos junta sin espesor, comprende un flujo longitudinal y un flujo transversal (figura 4).

10 La ecuación de gobierno para el flujo de fluido longitudinal es la ecuación de continuidad dada, en el caso particular de 2D, por:

$$\frac{\partial Q_l}{\partial l} + \frac{1}{M} \frac{\partial p_m}{\partial l} + \alpha \frac{\partial u_n}{\partial t} = 0$$

15 donde la descarga total se refiere al gradiente de presión de fluido a través de una ecuación de tipo Darcy, l es la longitud a lo largo de la fractura, t el tiempo, α el coeficiente de Biot de la fractura, M el módulo de Biot y Q_l el caudal que puede expresarse de forma generalizada como

$$Q_l = -T_l \left(\frac{1}{\gamma_f} \frac{\partial p_m}{\partial l} + \frac{\partial z_m}{\partial l} \right)$$

20 siendo T_l la transmisividad longitudinal, γ_f el peso específico del fluido, p_m la presión de fluido en el plano medio de fractura y z_m la coordenada de profundidad en el plano medio de fractura.

En una realización particular, la transmisividad longitudinal se define según una ley cúbica:

$$T_l = \frac{g}{12\nu_f} u_n^3$$

25 donde g es la gravedad y ν_f la viscosidad cinemática del fluido. Por otro lado, se asume que el flujo transversal q_t depende del salto de presión de fluido en la discontinuidad, con conductividad transversal K_t

$$q_t = K_t (p^{bot} - p^{top})$$

donde p^{bot} y p^{top} son la presión del fluido sobre cada cara de la fractura.

30 El acoplamiento entre el modelo mecánico y el modelo de fluido se formula a través de la influencia de la deformación sobre la permeabilidad y el contenido de fluido tanto del medio continuo como de

las juntas por un lado, y la introducción del principio de tensión efectiva por el otro.

Las ecuaciones de gobierno para la respuesta mecánica del medio poroso son:

5 Ecuación de equilibrio: $\mathbf{L}_c^T \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}$

Principio de tensión efectiva: $\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} + \alpha_c \mathbf{m}_c p$

Relación constitutiva: $\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D}_c \boldsymbol{\varepsilon}$

Ecuación de compatibilidad: $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L}_c \mathbf{u}$

10 donde $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23})$ es el vector de 6 componentes que representa el tensor de tensiones en notación ingenieril, $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23})$ es el vector de 6 componentes que representa también el tensor de deformaciones totales en notación ingenieril en el que las componentes de la deformación a cortante ingenieriles son el doble que sus respectivas componentes tensoriales $(\gamma_{12} = 2\varepsilon_{12}, \gamma_{13} = 2\varepsilon_{13}, \gamma_{23} = 2\varepsilon_{23})$, \mathbf{L}_c es la siguiente matriz de operador diferencial

$$\mathbf{L}_c = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \end{pmatrix}^T$$

20 , \mathbf{g} es el vector de gravedad, normalmente $\mathbf{g} = g(0,0,1)$, ρ es la densidad promedio o aparente del sistema fluido-sólido, $\boldsymbol{\sigma}' = (\sigma'_{11}, \sigma'_{22}, \sigma'_{33}, \sigma'_{12}, \sigma'_{13}, \sigma'_{23})$ es el vector de tensión efectiva de 6 componentes, α_c es el coeficiente de Biot-Willis, \mathbf{m}_c es el equivalente al tensor de identidad en esta formulación del vector (es decir, $(1,1,1,0,0,0)$), p es la presión de fluido intersticial, \mathbf{D}_c es la matriz constitutiva de roca según condiciones elastoplásticas y \mathbf{u} es el vector de desplazamiento. La determinación del vector de tensión por medio de las seis componentes de tensión debe interpretarse como que el método se formula en el escenario más general, un dominio tridimensional. Si, por ejemplo, se usa un dominio bidimensional, entonces sólo las

variables existentes estarán implicadas en el cálculo; es decir, $(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})$. La misma interpretación se aplica al resto de variables.

Las ecuaciones de gobierno para el flujo de fluido en el medio poroso son:

5 Ecuación de continuidad:
$$\operatorname{div} \mathbf{q} + \left(\frac{\alpha_c - \phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f} \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha_c \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = 0$$

Ley de Darcy (forma general):
$$\mathbf{q} = -\frac{K_c}{\gamma_f} (\operatorname{grad} p - \rho_f \mathbf{g})$$

10 donde \mathbf{q} es el caudal de fluido, K_s es el módulo de permeabilidad del sólido, K_f es el módulo de compresibilidad del fluido, ϕ es la porosidad, ε_v es la deformación volumétrica, K_c es el tensor de conductividad hidráulica de la roca, γ_f es el peso específico del fluido y ρ_f es la densidad del fluido.

En una realización particular, la conductividad hidráulica de la roca se define según la deformación volumétrica (ε_v):

$$K_c = \left(\frac{K_i (e^{\varepsilon_v} - (1 - n_i))^3}{n_i^3 e^{\varepsilon_v}} \right) \mathbf{I}$$

15 donde K_i es la conductividad hidráulica inicial, n_i es la porosidad inicial e \mathbf{I} la matriz de identidad.

Las ecuaciones de gobierno del comportamiento mecánico de una fractura saturada se plantean en el plano medio de fractura y en un sistema de referencia alineado con el plano medio de fractura:

20 Principio de tensión efectiva:
$$\boldsymbol{\sigma}'_{mp} = \boldsymbol{\sigma}_{mp} + \alpha_f m_{mp} p_{mp}$$

Relación constitutiva:
$$d\boldsymbol{\sigma}'_{mp} = \mathbf{D}_{mp} d\hat{\mathbf{u}}$$

Ecuación de compatibilidad:
$$d\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{L}_{mp} d\mathbf{u}$$

25 donde $\boldsymbol{\sigma}'_{mp}$ es el vector de tensión efectiva en el plano medio de fractura, α_f es el coeficiente de Biot de la fractura, m_{mp} introduce la influencia de presión de fluido en la dirección normal al eje de discontinuidad, es decir, $[1, 0, 0]$ en el sistema de referencia ortogonal (n, ℓ_1, ℓ_2) , p_{mp} es la presión de fluido en el plano medio de la fractura, $\hat{\mathbf{u}}$ es el vector de desplazamiento relativo (u_n, v_{f1}, v_{f2}) , así v_{f1} y v_{f2} representan deslizamiento y u_n apertura/cierre), y \mathbf{L}_{mp} es un operador que

relaciona el vector de desplazamiento relativo con el desplazamiento verdadero en las caras de la fractura.

Las ecuaciones de gobierno del flujo de fluido a lo largo de y a través de la fractura también se plantean en el plano medio de discontinuidad y en el mismo sistema de referencia alineado con el plano medio de fractura:

Ecuación de continuidad:
$$\operatorname{div} \mathbf{Q}_1 + \frac{1}{M_f} \frac{\partial p_{mp}}{\partial t} + \alpha_f \frac{\partial u_n}{\partial t} = 0$$

Ley de Darcy:
$$\mathbf{Q}_1 = -\mathbf{T}_1 \operatorname{grad}_f \left(\frac{p_{mp}}{v_f} + z \right)$$

Flujo transversal:
$$q_t = K_t (p^{bot} - p^{top})$$

donde u_n es la apertura de la fractura (es decir, la primera componente del vector de desplazamiento relativo $\hat{\mathbf{u}}$ definido anteriormente), \mathbf{Q}_1 es el vector de caudal local a lo largo del plano medio de fractura, es decir, longitudinal a lo largo de (ℓ_1, ℓ_2) , α_f y M_f son respectivamente el coeficiente y el módulo de Biot de la fractura, \mathbf{T}_1 es la matriz de transmisividad longitudinal del plano medio, q_t es el vector de caudal local transversal al plano medio de fractura, es decir, a lo largo de la dirección normal (n), K_t es la conductividad transversal y p^{bot} y p^{top} son la presión de fluido sobre cada cara de la fractura.

En una realización particular, la transmisividad a lo largo del plano medio de fractura es una ley cúbica donde las componentes principales de T_1 son proporcionales al cubo de la apertura u_n^3 .

El sistema de ecuaciones acopladas presentado anteriormente se considera en un dominio Ω donde existe un conjunto de condiciones de contorno e iniciales. El dominio Ω se discretiza mediante elementos finitos convencionales para el medio continuo, y elementos junta sin espesor para fracturas existentes previamente y cualquier trayectoria de fractura potencial que puede desarrollarse tal como se ha explicado anteriormente. Cuando se consideran las ecuaciones de equilibrio de masa de fluido y momento lineal de manera débil y se introducen el resto de ecuaciones (principio de tensión efectiva, relaciones constitutivas y ecuación de compatibilidad), se obtiene un conjunto de ecuaciones acopladas discretizadas para cada elemento finito (convencional y sin espesor, cuyas expresiones para las formulaciones mecánica y de flujo de

fluido pueden encontrarse en libros clásicos para el medio continuo y en bibliografía especializada para los elementos junta sin espesor, por ejemplo Gens et al. 1995 [Gens, A., Carol, I., y Alonso, E.E., 1995. *Rock joints: FEM implementation and applications*. En Selvadurai, A.S.P. y Boulon, M., editores, *Mechanics of Geomaterial Interfaces*, págs. 395-420. Elsevier] y Segura, Carol 2004 [Segura, J.M., Carol, I., 2004. *On zero-thickness interface elements for diffusion problems*, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(9), págs. 947-962]). Después del ensamblaje, se logra el siguiente sistema de ecuaciones acopladas:

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' d\Omega - \mathbf{Lp} = \mathbf{F}^u$$

$$\mathbf{E}\mathbf{p} + \mathbf{L}^T \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{S} \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}^p$$

donde \mathbf{L} es la matriz de acoplamiento ensamblada, \mathbf{E} es la matriz de permeabilidad ensamblada, \mathbf{S} es la matriz de capacidad de almacenamiento ensamblada, \mathbf{u} y \mathbf{p} son los vectores de incógnitas principales ensamblados de desplazamiento y presión de fluido respectivamente, t es el tiempo, y \mathbf{F}^u y \mathbf{F}^p son los vectores del lado derecho ensamblados relacionados con desplazamientos y presión de fluido, y \mathbf{B} indica la matriz de elementos desplazamiento a deformación en elementos finitos convencionales o la matriz de elementos desplazamiento a desplazamiento relativo en elementos junta sin espesor especiales (Gens et al. 1995) dependiendo del elemento que está considerándose. El vector resultante de la integral de $\mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'$ sobre todo el volumen del dominio Ω debe entenderse como el resultado del ensamblaje de los vectores de elementos individuales que corresponden a las integrales sobre el volumen de cada elemento finito en la malla, dado que es un procedimiento convencional en la formulación de elementos finitos. La expresión anterior es válida para cualquier modelo de material constitutivo (lineal o no lineal). Para el caso particular de elasticidad lineal la primera de las ecuaciones anteriores se reformula generalmente como

$$\mathbf{K}\mathbf{u} - \mathbf{Lp} = \mathbf{F}^u$$

expresión en la que \mathbf{K} es la matriz de rigidez elástica global obtenida como el resultado del ensamblaje de las matrices de elementos individuales que corresponden a las integrales sobre el volumen de cada

elemento finito en la malla, dado que es un procedimiento convencional en la formulación de elementos finitos.

Esta es una expresión particular del sistema de ecuaciones. El sistema de ecuaciones puede expresarse de muchas otras formas y todas las expresiones que provienen del mismo modelo mecánico acoplado y modelo de fluido se encuentran dentro de la invención.

En una realización particular, la integración discreta en el tiempo se lleva a cabo usando la regla trapezoidal generalizada, obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones en el momento $n+\theta$, donde las incógnitas principales son los incrementos de desplazamiento $\Delta \mathbf{u}_{n+1}$ y presión de fluido $\Delta \mathbf{p}_{n+1}$ en el momento $n+1$, t_{n+1} :

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{n+\theta} d\Omega - \theta \mathbf{L} \Delta \mathbf{p}_{n+1} = \tilde{\mathbf{F}}^u_{n+\theta}$$

$$\mathbf{L}^T \Delta \mathbf{u}_{n+1} + (\mathbf{S}_{n+\theta} + \lambda \Delta t_{n+1} \mathbf{E}_{n+\theta}) \Delta \mathbf{p}_{n+1} = \tilde{\mathbf{F}}^p_{n+\theta}$$

El término $\mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{n+\theta}$ depende del comportamiento constitutivo de las fracturas y también del medio continuo si no se considera elástico. El término $\mathbf{E}_{n+\theta}$ depende de la matriz de permeabilidad que depende de la apertura de la fractura y también de la deformación volumétrica del medio continuo, si se considera que tiene una permeabilidad que depende de la deformación. Estos términos dependen de la solución en el momento $n+1$, t_{n+1} , por tanto el sistema de ecuaciones se resuelve iterativamente.

En particular, el sistema de ecuaciones puede reescribirse como:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}} & \tilde{\mathbf{L}} \\ \tilde{\mathbf{L}}^T & \tilde{\mathbf{E}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{F}}^u \\ \tilde{\mathbf{F}}^p \end{bmatrix}$$

siendo $\Delta \mathbf{u}$ el incremento de desplazamiento y $\Delta \mathbf{p}$ el incremento de presión de fluido; y, $\tilde{\mathbf{K}}$, $\tilde{\mathbf{L}}$ y $\tilde{\mathbf{E}}$ son submatrices de la matriz general de coeficientes y $\tilde{\mathbf{F}}^u$, $\tilde{\mathbf{F}}^p$ los coeficientes de subvectores relacionados con los desplazamientos y las variables de presión de fluido respectivamente; donde $\tilde{\mathbf{K}}$ recoge las variables contenidas en $\mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{n+\theta}$ y $\tilde{\mathbf{E}}$ recoge las variables contenidas en el término $\mathbf{E}_{n+\theta}$.

El sistema de ecuaciones acopladas puede resolverse usando un método numérico tal como Newton Raphson, búsqueda lineal, etc. si se usa un enfoque monolítico o de manera escalonada si se usan dos códigos separados (es decir, uno para el problema mecánico y otro para el problema de flujo de fluido) de manera aproximada, incluyendo la última

estrategia enfoques particulares tales como iterar hasta la convergencia, avanzar en el tiempo sin convergencia, o usar un enfoque de un sentido en la que la información sólo se hace pasar desde uno de los códigos hasta el otro y no se transfiere información en el otro sentido. Para cada etapa de tiempo y para todo el dominio (es decir, fracturas + medio poroso) los desplazamientos y la presión de fluido se obtienen en los nodos de la malla de elementos finitos; y, se obtienen la tensión y el flujo de fluido en los puntos de Gauss de los elementos finitos (tanto juntas convencionales como sin espesor)

10

Ejemplo particular 1: Estudio de fractura hidráulica en 2D única.

La formulación anterior se ha aplicado al estudio de ejemplos particulares de problemas acoplados hidromecánicos, para validar el algoritmo de la invención. El ejemplo presentado en el presente documento es el análisis de una fractura hidráulica única en 2D. Con el fin de verificación, se han tomado la geometría y los parámetros del trabajo de Boone and Ingraffea [Boone, T.J. & Ingraffea, A.R., 1990. *A numerical procedure for simulation of hydraulically-driven fracture propagation in poroelastic media*, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 14:27-47.], que combinaron elementos finitos 2D para el comportamiento mecánico, con diferencias finitas 1D para el flujo a lo largo del canal de fisura.

20

Se discretiza un dominio semicircular de radio de 80 m que representa una sección transversal del orificio y la fractura, tal como se representa en la figura 5, con la malla de elementos finitos triangulares lineales convencional de la figura 6. La fractura se inserta a lo largo del eje de abscisas con elementos junta lineales de nodo doble, es decir, los elementos sin espesor tal como se muestra en la figura 7.

25

Las condiciones de carga y de contorno se aplican en dos etapas, que pueden observarse en las figuras 8a y 8b: la figura 8a muestra una carga distribuida de 1,0 MPa aplicada sobre el contorno externo con el fin de simular la tensión inicial *in situ*. Se asume una presión de fluido inicial con valor nulo constante en el contorno y se ejecuta el análisis de flujo para este cálculo de tensión inicial como estado estacionario, con una presión de fluido resultante nula en todo el dominio. La figura 8b muestra un fluido que está inyectándose en la boca de la fractura con

35

$Q = 0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$ constante. Se mantienen las condiciones de contorno restantes mostradas en la figura 8a. Esta etapa se ejecuta en condiciones transitorias con etapas de tiempo crecientes hasta una duración total de 25 segundos.

5 Se asume que los elementos del medio continuo son isotrópicos y elásticos lineales. Con respecto al flujo, se consideran dos escenarios, uno sin fuga (caso impermeable, es decir, caso en el que el medio continuo que rodea a la fractura se asume impermeable), y otro con poca fuga (caso permeable, es decir, caso en el que el medio continuo que rodea la fractura se considera permeable). El caso sin fuga hace posible la comparación con soluciones analíticas, dado que el medio poroso se asume impermeable y el fluido inyectado en la fractura no se filtra al interior del medio poroso. Por otro lado, el caso permeable considera un pequeño valor de permeabilidad para el medio poroso, que permite que parte del fluido inyectado en la fractura se filtre al interior del medio poroso a través de las caras de fractura. En este caso se muestra una comparación con una solución numérica existente en la bibliografía. Todos los parámetros usados en estos casos son los siguientes:

20 Propiedades materiales para el medio continuo:

E (módulo de Young): 14400,0 MPa en ambos casos

ν (coeficiente de Poisson): 0,2 en ambos casos

K (conductividad hidráulica): $1 \times 10^{-25} \text{ m/s}$ para el caso impermeable y 2×10^{-7} para el caso permeable

25 K_s (compresibilidad del armazón): 36000 MPa en ambos casos

α (coeficiente de Biot): 0 en ambos casos

Propiedades materiales de las juntas:

K_n (rigidez normal): 1000000 MPa/m en ambos casos

30 K_t (rigidez tangencial): 1000000 MPa/m en ambos casos

$\tan\phi$ (ángulo de fricción): 0,577 en ambos casos

a (ápice): 0 en ambos casos

c (cohesión): 0 en ambos casos

Tl_0 (transmisividad longitudinal inicial): 0 m^2/s en ambos casos

35 Kt (conductividad transversal): 1 Hz en ambos casos

α (coeficiente de Biot): 1 en ambos casos

M (módulo de Biot): 10000000000 MPa/m en ambos casos

Se asume que los elementos junta se comportan según el modelo elastoplástico descrito anteriormente. La rigidez elástica normal y a cortante se fijan a valores muy altos (al menos tres órdenes de magnitud mayores que el módulo elástico del medio continuo dividido por la separación promedio entre las discontinuidades), lo que puede entenderse como coeficientes de penalización con el fin de minimizar las deformaciones elásticas incluyendo la interpenetración. Como resultado, prácticamente todos los desplazamientos relativos corresponderán a deformaciones plásticas que representan apertura/deslizamiento de la junta. Los parámetros de la superficie de fluencia (asumidos fijos en este análisis, plasticidad perfecta) representan un escenario de límite inferior de la resistencia de la junta, en particular la resistencia a tracción se asume cero como en el trabajo de Boone and Ingraffea citado anteriormente, es decir, se usa la primera realización particular descrita anteriormente para la ley constitutiva geomecánica de junta para estos cálculos.

Se asume que el comportamiento hidráulico de la junta sigue una ley cúbica, es decir, la transmisividad a lo largo del plano medio de fractura es una ley cúbica donde T_1 es proporcional al cubo de la apertura u_n^3 . Excepto por los parámetros relacionados con el modelo elastoplástico, la lista mencionada anteriormente de propiedades materiales de juntas muestra los parámetros usados para este estudio.

25 Caso impermeable

Spence [Spence, D. & Sharp, P., 1985. *Self-Similar Solutions for Elastohydrodynamic Cavity Flow*, Proc. R. Soc. Lond. A, 400(1819):289-313] y GDK [Geertsma, J. & de Klerk, F., 1969. *A rapid method of predicting width and extent of hydraulic induced fractures*, J. Pet. Tech., 246:1571-1581.] obtienen las siguientes expresiones para la longitud de fractura (L), desplazamiento de abertura de boca de fisura (CMOD) y presión de fluido en la boca de fisura (P_{cm}):

$$L = A \left(\frac{GQ^3}{\mu(1-\nu)} \right)^{1/6} t^{2/3}$$

$$CMOD = B \left(\frac{\mu(1-\nu)Q^3}{G} \right)^{1/6} t^{1/3}$$

$$P_{cm} = C \left(\frac{G^3 Q \mu}{(1-\nu)^3 L^2} \right)^{1/4} + \sigma_0$$

En esas fórmulas, A , B y C toman los valores 0,65, 2,14 y 1,97 para el modelo de Spence, y 0,68, 1,87 y 1,38 para el modelo de GDK, Q es el caudal de inyección, G es el módulo de corte, μ es la viscosidad dinámica, ν es el coeficiente de Poisson y σ_0 es la tensión normal *in situ* a la trayectoria de fisura.

Las figuras 9-10 muestran los resultados obtenidos usando un algoritmo de la invención, junto con esas tres fórmulas, y los resultados numéricos obtenidos por el trabajo de Boone & Ingraffea para los primeros 25 segundos de inyección. Las tres curvas muestran una coincidencia relativamente buena.

La figura 11 representa el perfil de presión de fluido a lo largo de la fractura en la fase final de 25 s, tanto para el presente cálculo como para los resultados de Boone & Ingraffea. La concordancia es bastante buena excepto cerca de la punta de fisura, lo que parece posible dados los diferentes enfoques para el modelado de continuidad de flujo. Obsérvese en la figura 11 la presión de fluido negativa cerca de la punta de fisura conocida como desfase de fluido, que se ha obtenido en el modelo propuesto como resultado del retraso entre la apertura de la fisura y el llenado con fluido, que en un medio impermeable sólo puede alcanzar la punta de fisura a lo largo de la propia fractura.

Ha de observarse que para roca impermeable, la velocidad de CMOD parece evolucionar hacia un valor límite constante, de manera similar a la velocidad de extensión de la fisura, que corresponde naturalmente al hecho de que todo el fluido inyectado a velocidades constantes tiene que almacenarse en el volumen de la fisura.

Caso permeable

Los únicos cambios con respecto a la sección anterior son la consideración de roca permeable, y la tensión *in situ*, con valores similares a los usados en Boone and Ingraffea, concretamente: permeabilidad del medio continuo $K = 2 \cdot 10^{-7}$ m/s y tensión *in situ* inicial 1,2 MPa (tensión total= tensión efectiva en este caso).

En este caso, no existe fórmula analítica y sólo puede realizarse la comparación con los resultados publicados en Boone and Ingraffea. Como novedad, también puede evaluarse la cantidad de fluido que se filtra al interior del medio continuo de roca. La referencia original sólo proporciona resultados para los primeros 10 segundos y así las comparaciones iniciales mostradas en las figuras 12-13 se realizan para ese tiempo.

Ejemplo particular 2: Interacción de fractura hidráulica en medio homogéneo.

El ejemplo presentado en el presente documento es el análisis de múltiples fracturas hidráulicas que interactúan en 2D, según un método de la invención. El fin de este ejemplo es mostrar cómo el método propuesto puede capturar la influencia de una fractura hidráulica previa en una fractura posterior, modificando la trayectoria de la fractura debido a los cambios locales inducidos en el campo de tensión.

El ejemplo consiste en una secuencia de tres procesos de fractura a lo largo de una perforación horizontal (véase la figura 14). El modelo de elementos finitos se representa en la figura 15, con una representación detallada de la malla de elementos finitos en la zona cerca de los puntos de inyección, que son tres puntos ubicados en intervalos regulares en la parte inferior del contorno. Todas las líneas en esta zona incorporan elementos junta sin espesor para permitir que las fracturas tengan múltiples posibilidades de propagación. Esto incluye las trayectorias rectas triviales que corresponderían a una propagación en roca homogénea virgen, pero también muchas otras opciones. El análisis se realiza asumiendo una deformación plana, deformaciones pequeñas y condiciones isotérmicas.

Se supone que el comportamiento del medio continuo es elástico, y las propiedades se muestran a continuación. Para el flujo a través del medio continuo, se ha asumido un medio de permeabilidad baja sin acoplamiento entre deformaciones mecánicas y fluidas. El comportamiento mecánico de las fracturas (elementos junta) se controla mediante la ley elastoplástica definida anteriormente como la primera realización particular descrita en la invención. El comportamiento hidráulico de las juntas se controla mediante la ley cúbica, considerando una

transmisividad longitudinal inicial nula. Los valores de los parámetros usados en los cálculos son los siguientes:

Propiedades materiales para el medio continuo:

- 5 E (módulo de Young): 14400 MPa
 ν (coeficiente de Poisson): 0,2
 K_c (conductividad hidráulica de la roca): 1×10^{-10} m/s
 K_s (compresibilidad sólida): 36000 MPa
 α (Coeficiente de Biot): 1

10

Propiedades materiales de las juntas:

- K_n (rigidez normal): 1000000 MPa/m
 K_t (rigidez tangencial): 1000000 MPa/m
 $\tan\phi$ (ángulo de fricción): 0,5773
- 15 c (cohesión): 0,01 MPa
 Tl_0 (transmisividad longitudinal inicial): 0 m²/s
 K_t (conductividad transversal): 1 Hz
 α (coeficiente de Biot): 1
M (módulo de Biot): 10^{10} MPa/m

20

Las condiciones de contorno se aplican en una secuencia de cuatro etapas (véase la figura 16):

1. Inicio de tensión: Se aplican cargas uniformes distribuidas sobre los contornos externos, con valores de $\sigma_h=1,0$ MPa a lo largo de la dirección y y $\sigma_v=0,9$ MPa a lo largo de la dirección x . La diferencia de tensiones principales garantiza que la dirección de fractura principal para la primera fractura es una línea vertical recta.
- 25 2. Primer proceso de fractura: se inyecta un caudal de 0,0001 m³/s en el primer punto de inyección durante 25 s ($\Delta t = 25$ s).
- 30 3. Segundo proceso de fractura. La segunda inyección comienza justo después de que termine la primera (sin tiempo de espera). Las condiciones para la segunda inyección son las mismas que para la primera: caudal de 0,0001 m³/s durante 25 s ($\Delta t = 25$ s).

4. Tercer proceso de fractura: De nuevo, el tercer proceso comienza cuando termina el segundo (sin tiempo de espera) y las condiciones de inyección son las mismas (caudal de $0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 25 s)

5 Las figuras 17, 18 y 19 representan las aberturas de fractura y distribuciones de presión de fluido al final de cada una de las tres inyecciones, mostrando claramente cómo la presencia de la primera fisura altera la trayectoria de la segunda (que da como resultado una pequeña desviación hacia la izquierda de la trayectoria recta que habría tenido lugar en ausencia de la primera fractura), y la presencia de las dos primeras afecta incluso más a la trayectoria de la tercera, que se desvía
10 claramente hacia la izquierda prácticamente 45 grados.

REIVINDICACIONES

1. Método implementado en un ordenador para la simulación numérica de un medio poroso que puede comprender una fractura hidráulica, en el que todo el comportamiento del medio poroso se simula siguiendo las siguientes etapas:
- 5 definir el dominio;
- crear una malla numérica en el dominio para generar un modelo geomecánico y de flujo de fluido del medio poroso con elementos finitos convencionales que comprende una delimitación asociada con el dominio en el que los bordes de la malla siguen al menos los
- 10 contornos del dominio y las fracturas existentes previamente,
- dotar a los elementos de malla numérica de propiedades mecánicas, al menos propiedades elásticas; y propiedades de flujo, al menos propiedades de permeabilidad, formando dicha malla numérica dotada
- 15 de propiedades un modelo geomecánico y de flujo de fluido,
- dotar a los elementos de malla numérica de los valores de tensión inicial y presión de fluido inicial,
- asignar las condiciones de contorno,
- ensamblar el sistema de ecuaciones,
- 20 resolver la evolución en el tiempo para una solución acoplada del modelo de flujo de fluido y el geomecánico;
- caracterizado por que crear la malla numérica comprende:
- crear una malla numérica usando elementos junta sin espesor que se insertan a lo largo de la trayectoria de las fracturas existentes
- 25 previamente,
- localizar superficies que se extienden a lo largo de contornos de elementos finitos a lo largo de las que pueden propagarse nuevas fracturas; y,
- crear una malla numérica usando elementos junta sin espesor a lo
- 30 largo del plano medio de las nuevas fracturas.
2. Método según la reivindicación 1, en el que el método comprende un modelo geomecánico constitutivo para los elementos sin espesor ubicados en las fracturas, formulándose el modelo geomecánico constitutivo en términos de:

el vector de tensión total $\sigma_{mp} = (\sigma_n, \tau_{f1}, \tau_{f2})$ en el plano medio de fractura donde $(n, f1, f2)$ es un sistema de referencia ortogonal con $f1$ y $f2$ alineados con el plano medio de fractura y n es su normal;

5 el vector de desplazamiento $\hat{u} = (u_n, v_{f1}, v_{f2})$ definido como el desplazamiento relativo de dos puntos enfrentados en los elementos sin espesor ubicados en la fractura,

una superficie de fallo hiperbólica $F(\sigma_n, \tau)$ siendo $\tau = \sqrt{\tau_{f1}^2 + \tau_{f2}^2}$ que define la superficie de fluencia; en el que la condición $F=0$ da como resultado una curva hiperbólica en el plano σ - τ teniendo
 10 $F = \tau^2 - \tan^2 \varphi (\sigma^2 - 2\alpha\sigma) = 0$ dos asíntotas que se intersecan con un ángulo φ con respecto al eje σ en el punto a para $\tau=0$;

en el que dados los valores τ_{f1}^n y τ_{f2}^n en una etapa de tiempo predeterminada n , los valores τ_{f1}^{n+1} y τ_{f2}^{n+1} en la siguiente etapa de tiempo $n+1$ se calculan satisfaciendo la siguiente ecuación:

15
$$\tan\left(\frac{\beta - \lambda}{2}\right) = \tan\left(\frac{\beta - \lambda_0}{2}\right) \left(\frac{\tau + \sqrt{\tau^2 + \alpha^2 \tan^2 \varphi}}{\tau_0 + \sqrt{\tau_0^2 + \alpha^2 \tan^2 \varphi}} \right)^{\frac{K_t \Delta v}{K_n \Delta u_n \tan \varphi}}$$

dado que $\tau^2 - \tan^2 \varphi (\sigma^2 - 2\alpha\sigma) = 0$,

donde β se refiere a los desplazamientos relativos tangenciales impuestos Δv_{f1} y Δv_{f2} , K_n y K_t son los módulos de rigidez normal y a cortante respectivamente, λ_0 es la razón entre τ_{f1}^n y τ_{f2}^n ; y, λ es la
 20 razón entre τ_{f1}^{n+1} y τ_{f2}^{n+1} .

3. Método según las reivindicaciones 1 y 2, en el que después de resolver la evolución en el tiempo para una solución acoplada del modelo de flujo de fluido y el geomecánico la malla numérica se vuelve a mallar según los desplazamientos de las fracturas para
 25 modelar la propagación de dichas fracturas.

4. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el dominio comprende al menos un orificio de inyección y en el que antes de ensamblar el sistema de ecuaciones el método comprende asignar cargas según las condiciones de inyección, es decir, el
 30 caudal o la presión de fluido.

5. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las ecuaciones de gobierno para el medio poroso son:

Ecuación de equilibrio: $\mathbf{L}_c^T \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}$

Principio de tensión efectiva: $\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} + \alpha_c \mathbf{m}_c p$

5 Relación constitutiva: $\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D}_c \boldsymbol{\varepsilon}$

Ecuación de compatibilidad: $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L}_c \mathbf{u}$

donde $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23})$ es el vector de tensión total de 6 componentes,

$$\mathbf{L}_c = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \end{pmatrix}^T$$

10 es el operador diferencial, \mathbf{g} es el vector de gravedad, ρ es la densidad promedio o aparente del sistema fluido-sólido, $\boldsymbol{\sigma}' = (\sigma'_{11}, \sigma'_{22}, \sigma'_{33}, \sigma'_{12}, \sigma'_{13}, \sigma'_{23})$ es el vector de tensión efectiva de 6 componentes, α_c es el coeficiente de Biot-Willis, \mathbf{m}_c es el equivalente al tensor de identidad en esta formulación del vector (es decir, (1,1,1,0,0,0)), p es la presión de fluido intersticial, \mathbf{D}_c es la matriz constitutiva de roca según condiciones elásticas, $\boldsymbol{\varepsilon}$ es el vector de deformación, y \mathbf{u} es el vector de desplazamientos; las ecuaciones de gobierno para el flujo de fluido en el medio continuo son:

20 Ecuación de continuidad: $\text{div } \mathbf{q} + \left(\frac{\alpha_c - \phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f} \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha_c \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = 0$

Ley de Darcy (forma general): $\mathbf{q} = -\frac{K_s}{\gamma_f} (\text{grad } p - \rho_f \mathbf{g})$

25 donde \mathbf{q} es el caudal de fluido, K_s es el módulo de permeabilidad del sólido, K_f es el módulo de compresibilidad del fluido, ϕ es la porosidad, ε_v es la deformación volumétrica, K_c es el tensor de conductividad hidráulica de la roca, γ_f es el peso específico del fluido; y ρ_f es la densidad del fluido,

las ecuaciones que gobiernan el comportamiento mecánico de las fracturas se plantean en el plano medio de fractura y en un sistema de referencia alineado con el plano medio de fractura:

Principio de tensión efectiva: $\sigma'_{mp} = \sigma_{mp} + \alpha_f m_{mp} p_{mp}$

5 Relación constitutiva: $d\sigma'_{mp} = D_{mp} d\hat{u}$

Ecuación de compatibilidad: $d\hat{u} = L_{mp} du$

donde σ'_{mp} es el vector de tensión efectiva en el plano medio de fractura, α_f es el coeficiente de Biot de la fractura, m_{mp} introduce la influencia de la presión de fluido en la dirección normal al eje de discontinuidad, es decir, $[1,0,0]$ en el sistema de referencia ortogonal (ℓ_1, ℓ_2, n) , p_{mp} es la presión de fluido en el plano medio de la fractura, \hat{u} es el vector de desplazamiento relativo $(u_n, v_{\ell_1}, v_{\ell_2})$, así v_{ℓ_1} y v_{ℓ_2} representan deslizamiento y u_n apertura/cierre), y L_{mp} es un operador que relaciona el vector de desplazamiento relativo con el desplazamiento verdadero en las caras de la fractura.

15 6. Método según la reivindicación 5, en el que las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluido a lo largo de la fractura se plantean en el plano medio de fractura y en un sistema de referencia alineado con el plano medio de fractura:

20 Ecuación de continuidad: $\text{div } Q_1 + \frac{1}{M_f} \frac{\partial p_{mp}}{\partial t} + \alpha_f \frac{\partial u_n}{\partial t} = 0$

Ley de Darcy: $Q_1 = -T_1 \text{grad}|_f \left(\frac{p_{mp}}{\gamma_f} + z \right)$

Flujo transversal: $q_t = K_t (p^{bot} - p^{top})$

25 donde u_n es la apertura de la fractura, es decir, la primera componente del vector \hat{u} , Q_1 es el vector de caudal local a lo largo del plano medio de fractura, es decir, longitudinal a lo largo de (ℓ_1, ℓ_2) , α_f y M_f son respectivamente el coeficiente y el módulo de Biot de la fractura, T_1 es la matriz de transmisividad longitudinal del plano medio, q_t es el vector de caudal local transversal al plano medio de fractura, es decir, a lo largo de la dirección normal (n) , K_t es la conductividad transversal y p^{bot} y p^{top} son la presión del fluido sobre cada cara de la fractura.

7. Método según la reivindicación 5 ó 6, en el que la conductividad hidráulica de la roca se define según la deformación volumétrica (ϵ_v) como:

$$K_\epsilon = \left(\frac{K_i (e^{\epsilon_v} - (1 - n_i))^3}{n_i^3 e^{\epsilon_v}} \right) I$$

5 donde K_i es la conductividad hidráulica inicial, n_i es la porosidad inicial e I la matriz de identidad.

8. Método según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7 anteriores, en el que la transmisividad a lo largo del plano medio de fractura es una ley cúbica donde T_1 es proporcional al cubo de la apertura
10 u_n^3 .

9. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que una región del dominio se dota de superficies discretizadas usando elementos junta sin espesor que se extienden a lo largo de todos los contornos de elementos finitos.

- 15 10. Método según la reivindicación 9, en el que la región del dominio dotada de superficies discretizadas usando elementos junta sin espesor que se extienden a lo largo de todos los contornos de elementos finitos es el dominio completo.

11. Sistema de procesamiento de datos que comprende medios para llevar a cabo un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10.
20

12. Producto de programa informático que comprende instrucciones que, al ser ejecutadas por un ordenador, llevan a cabo el método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10.

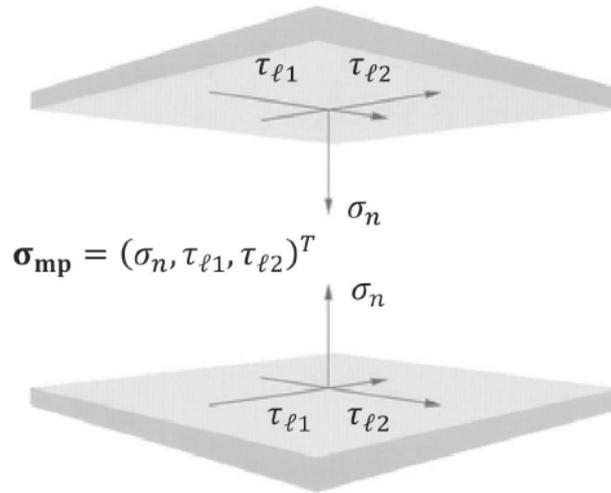


FIG. 1

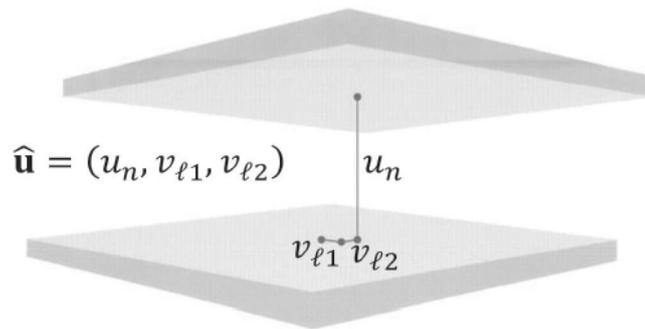


FIG. 2

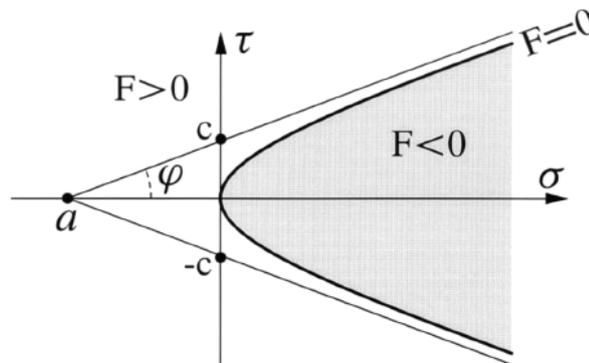


FIG. 3

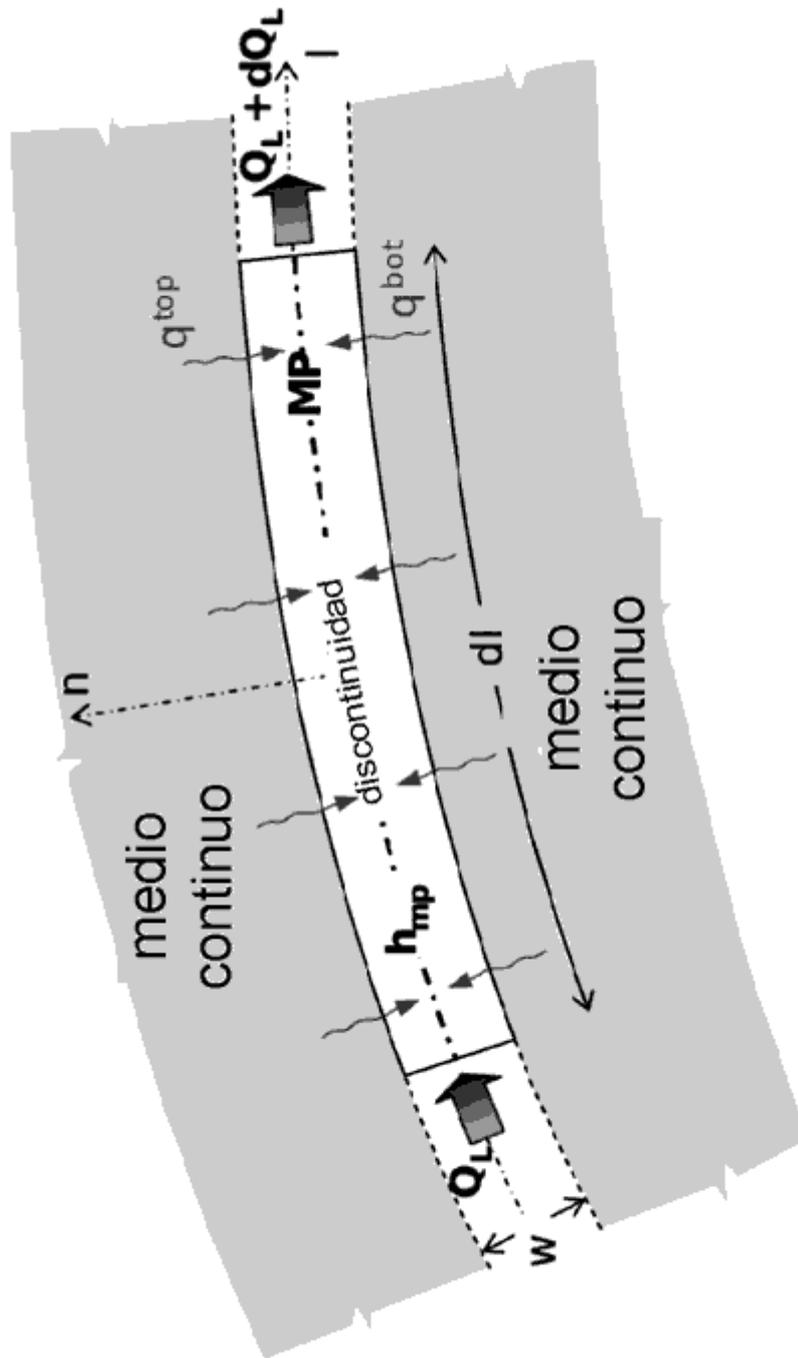


FIG. 4

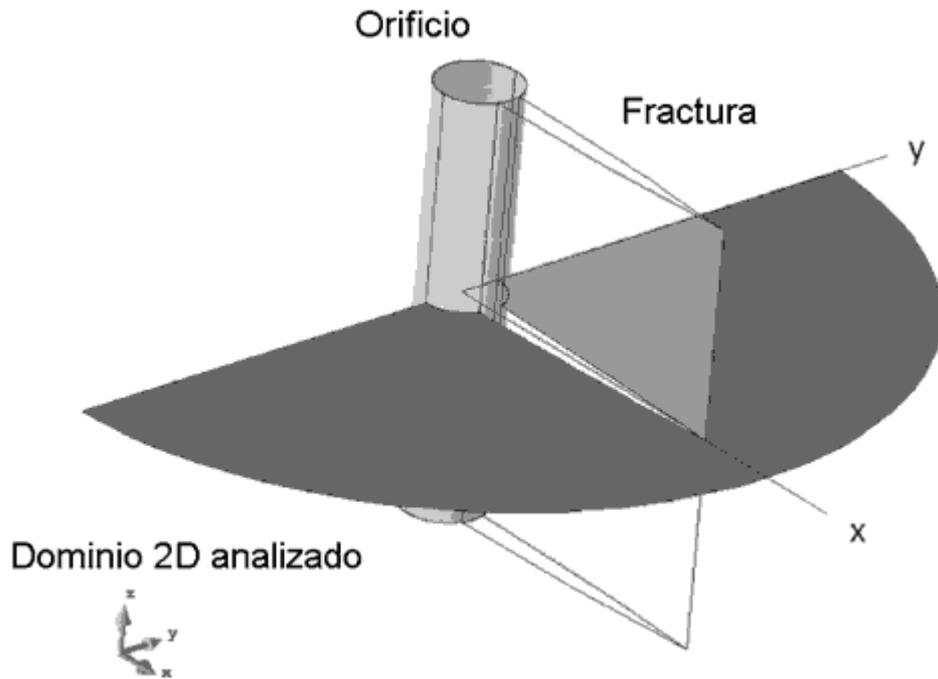


FIG. 5

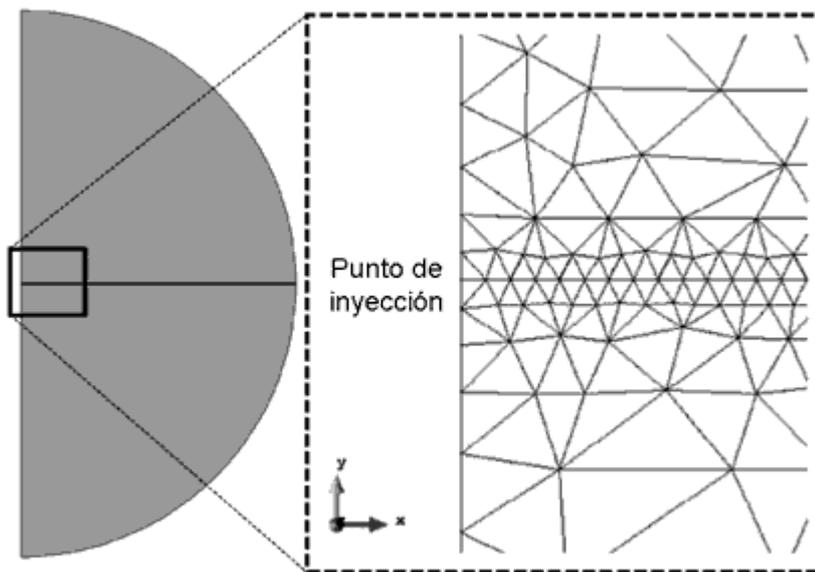


FIG. 6

FIG. 7

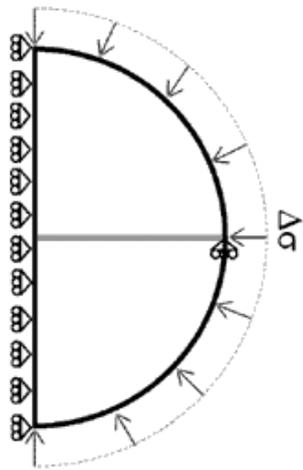
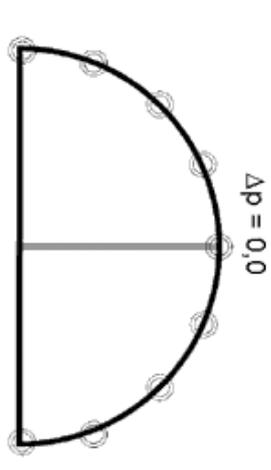
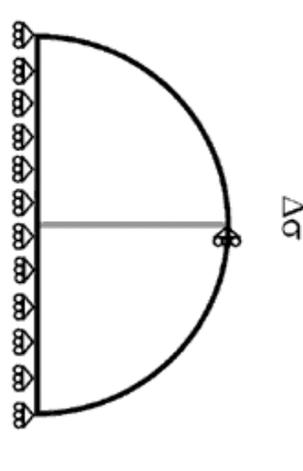
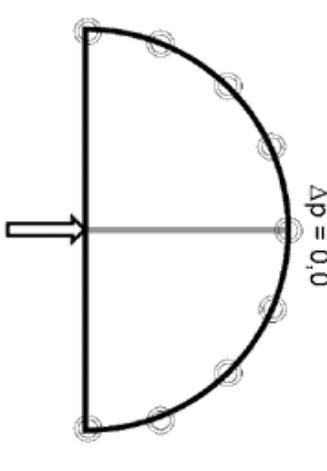
	Condiciones mecánicas	Condiciones hidráulicas
ETAPA 1 - condiciones <i>in situ</i>		
ETAPA 2 - proceso de fractura		

FIG. 8a

FIG. 8b

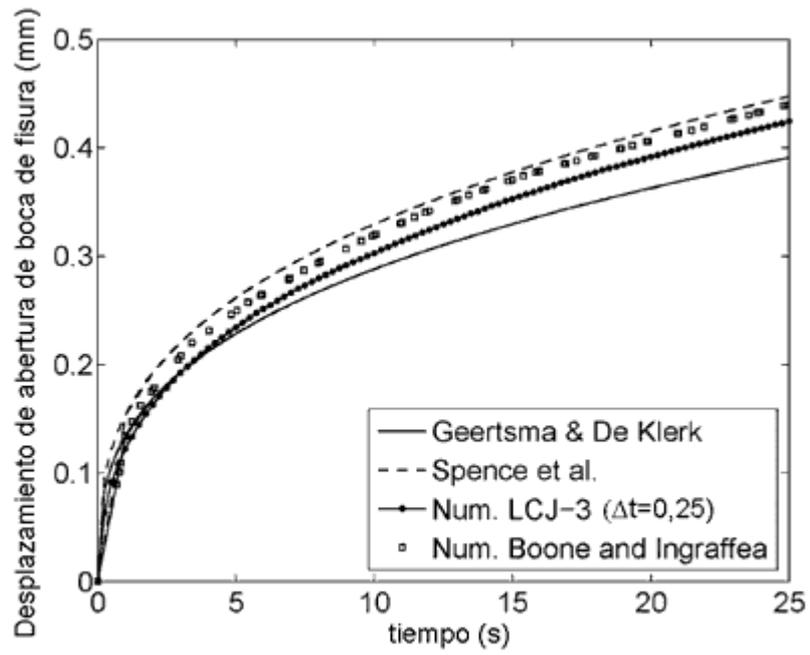


FIG. 9

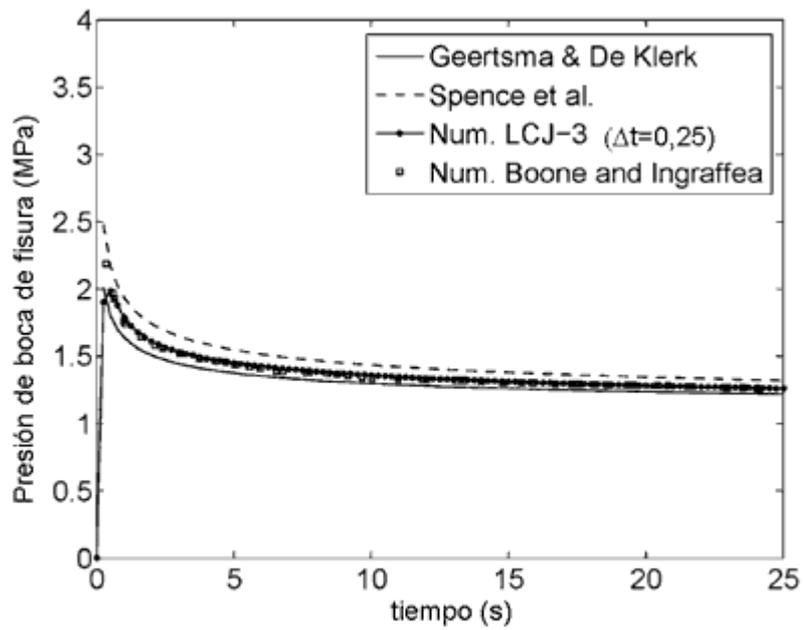


FIG. 10

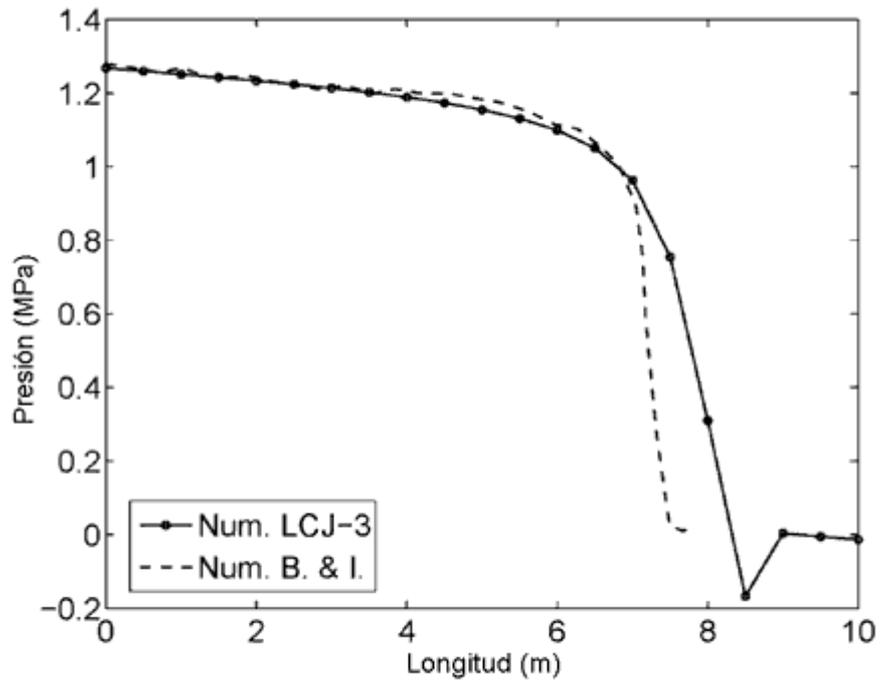


FIG. 11

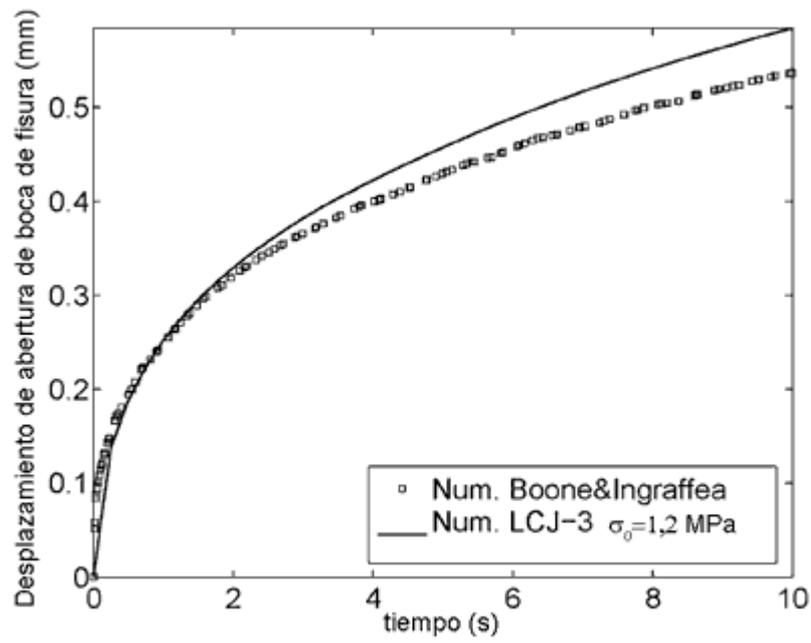


FIG. 12

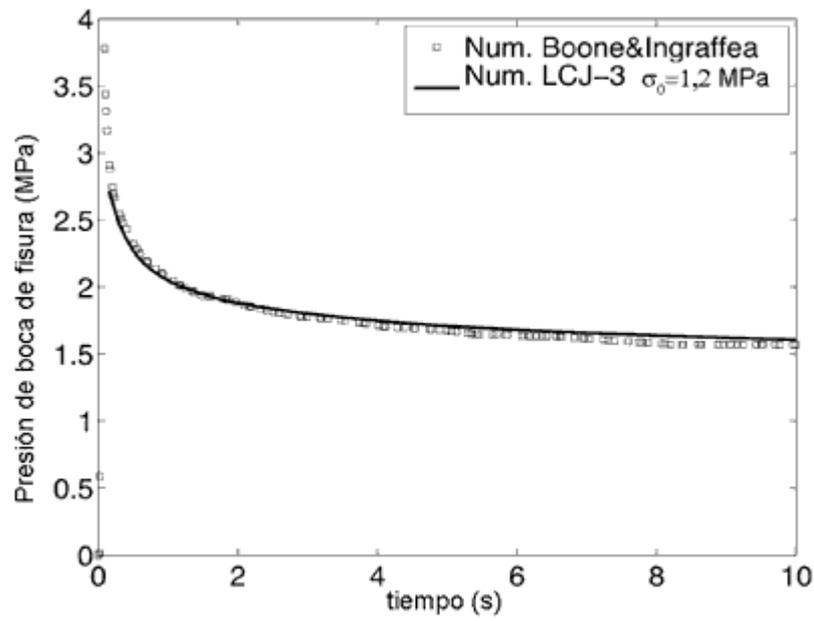


FIG. 13

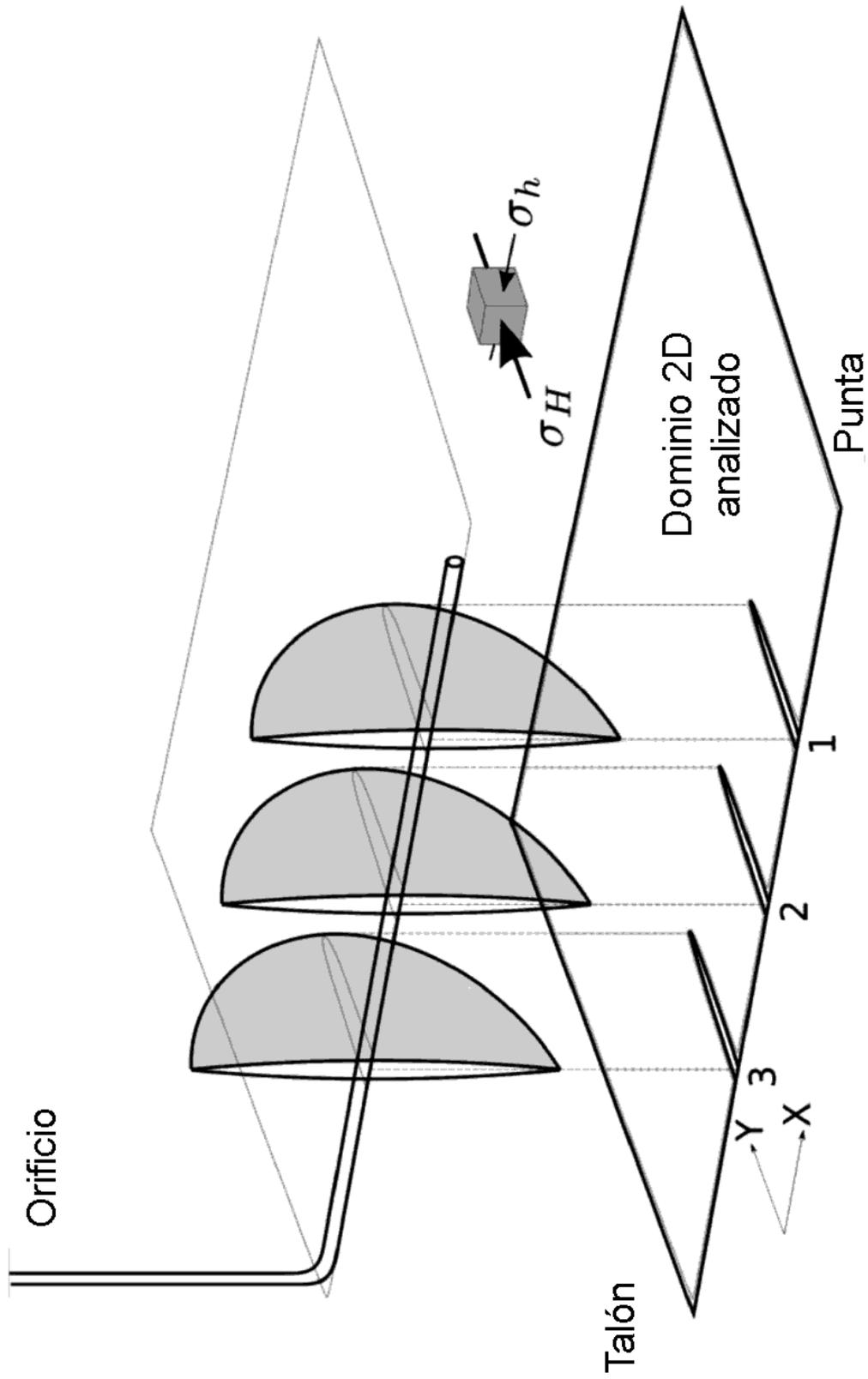


FIG. 14

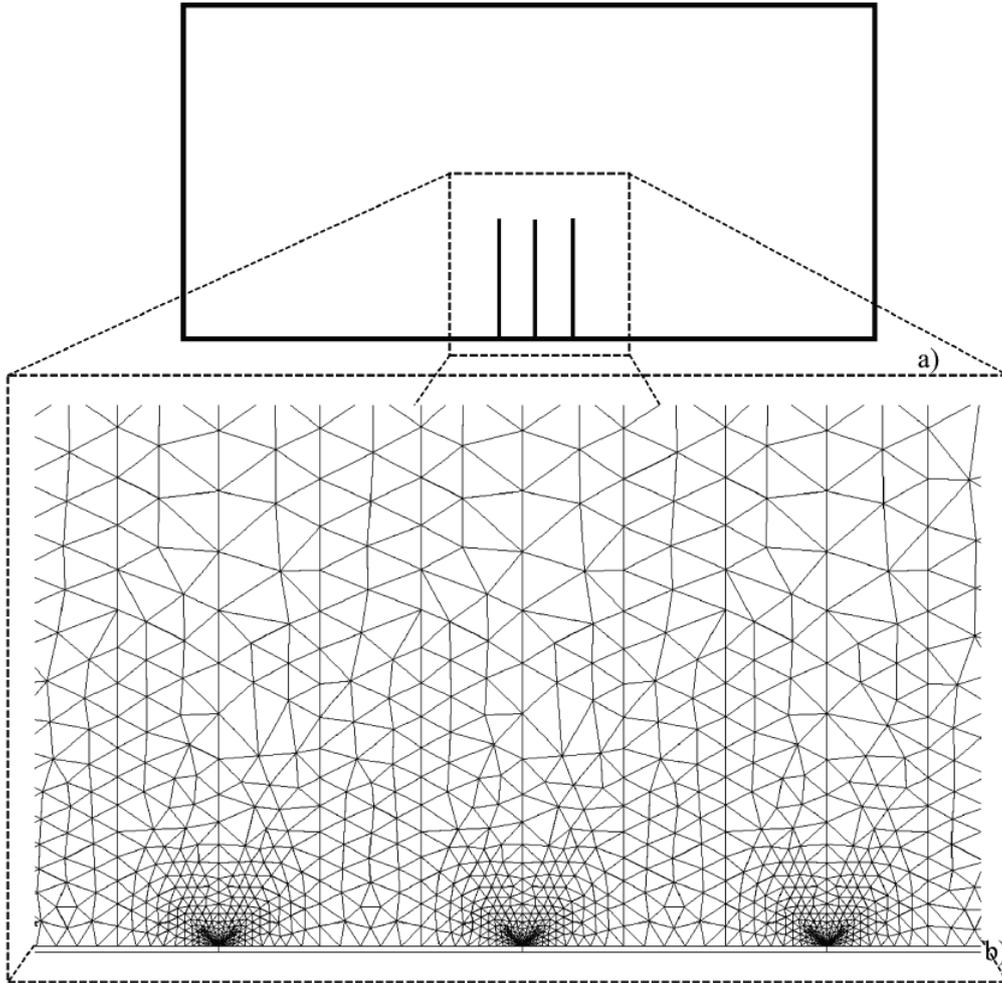


FIG. 15

	Condiciones mecánicas	Condiciones hidráulicas
Condiciones <i>in situ</i>	<p>$\Delta\sigma = 1,0 \text{ MPa}$</p> <p>$\Delta\sigma = 0,9 \text{ MPa}$</p>	<p>$\Delta p = 0,0 \text{ MPa}$</p>
Primer proceso de fractura		<p>$\Delta p = 0,0 \text{ MPa}$</p> <p>$Q = 0,001 \text{ m}^3/\text{s}$</p>
Segundo proceso de fractura		<p>$\Delta p = 0,0 \text{ MPa}$</p> <p>$Q = 0,001 \text{ m}^3/\text{s}$</p>
Tercer proceso de fractura		<p>$\Delta p = 0,0 \text{ MPa}$</p> <p>$Q = 0,001 \text{ m}^3/\text{s}$</p>

FIG. 16

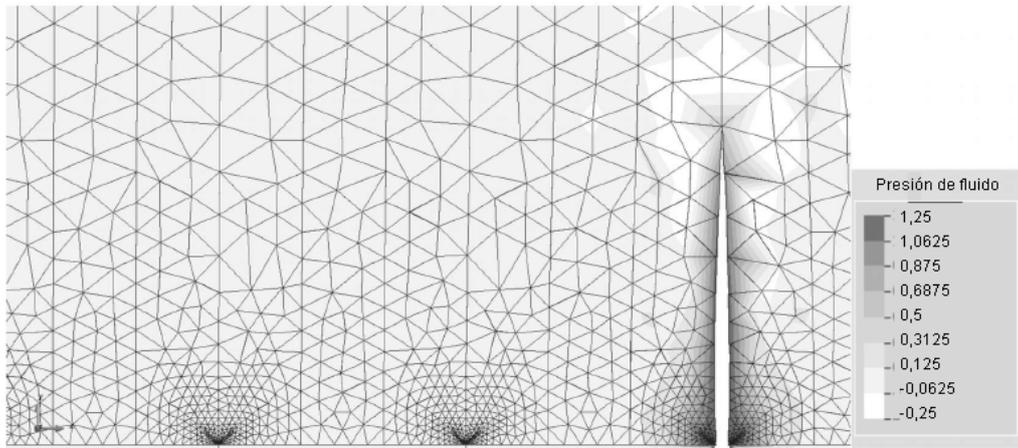


FIG. 17

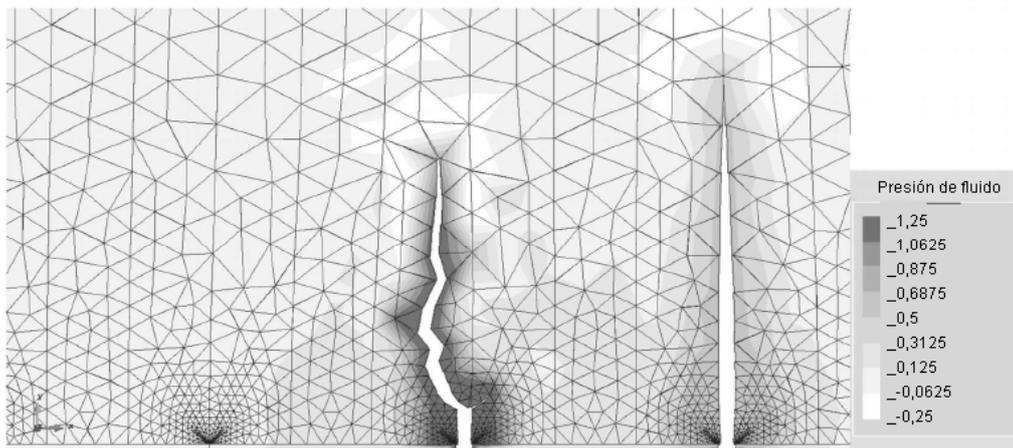


FIG. 18

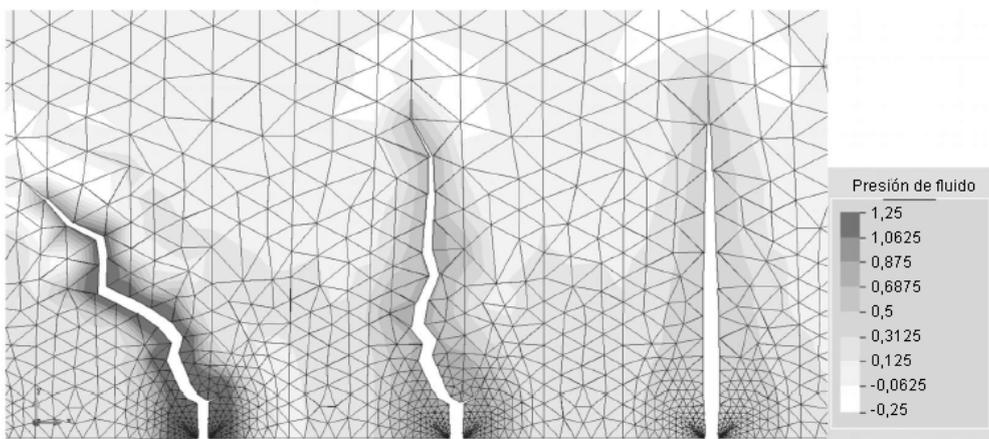


FIG. 19