

ANÁLISIS MESOESTRUCTURAL DE MATERIALES CUASIFRÁGILES: NUEVOS DESARROLLOS Y APLICACIONES

Carlos M. López* e Ignacio Carol*

* Depto. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña
Jordi Girona 1-3, Campus Nord, Módulo D2, CP 08034, Barcelona, España. TE: 34-(93)-4016509
e-mail: carlos.maria.lopez@upc.es, web page: <http://www.upc.es/>
e-mail: ignacio.carol@upc.es

Palabras clave: Materiales cuasifrágiles, Método de los Elementos Finitos, Análisis meso-mecánico, Hormigón, Hueso poroso, Producción de arena.

Resumen. Durante los últimos años, los autores junto con otros miembros del grupo de investigación de la ETSECCPB.UPC han venido desarrollando un modelo mesoestructural para materiales cuasifrágiles. La modelización consiste básicamente en representar explícitamente la microestructura de primer nivel del material (a veces también llamada mesoestructura), caracterizada por la geometría y propiedades de sus componentes individuales. La muestra resultante se discretiza para el análisis numérico mediante el Método de los Elementos Finitos. Un aspecto distintivo del análisis propuesto es el elemento junta o interfase de espesor nulo. Elementos de este tipo se introducen sistemáticamente en la malla entre elementos finitos standard, de modo que las posibles trayectorias de fisuras más significativas se encuentren incluidas a priori en la discretización. Los resultados iniciales obtenidos para hormigón han permitido reproducir el comportamiento experimental para distintas situaciones de carga, tales como tracción y compresión uniaxial, biaxial, ensayo brasileño, etc. Posteriormente, el modelo se ha aplicado en otros materiales cuasifrágiles como el hueso poroso, y en estudios de producción de arena en explotaciones petrolíferas. En este artículo se muestran algunos de los desarrollos y aplicaciones más recientes del modelo, los cuales permiten apreciar la potencialidad de la metodología empleada. En hormigón se presentan resultados de la simulación del comportamiento de fluencia y retracción por secado, para lo cual se incorpora la influencia del tiempo en la ley constitutiva de junta y un análisis de la difusión de humedad. También se presenta el análisis del comportamiento anisótropo del hueso trabecular bajo cargas con distinta orientación respecto de los ejes de ortotropía, y finalmente se muestran algunos aspectos importantes de la simulación del comportamiento de producción de arena (“rock sanding”) en pozos petrolíferos.

1 INTRODUCCIÓN

Bajo la denominación de *cuasifrágiles* se agrupa a una serie de materiales que presentan un comportamiento mecánico de características similares. Si bien estos materiales pueden ser muy diversos en cuanto a su naturaleza y campo de aplicación, presentan en común una estructura interna heterogénea a un nivel de observación a mesoescala, que influye considerablemente en el comportamiento observado a un nivel macroscópico. Entre estos materiales se incluyen algunos habitualmente empleados en Ingeniería Civil, como los hormigones de diversos tipos, las rocas, algunos suelos, el hielo, etc., pero también materiales de otros ámbitos como por ejemplo cerámicas y algunos compuestos en Ingeniería Mecánica o Aeroespacial, o materiales óseos en Bioingeniería.

En el transcurso de los últimos años, el grupo de investigación sobre comportamiento mecánico de materiales del Departamento de Ingeniería del Terreno de la ETSECCPB-UPC (España) ha venido desarrollando un modelo mesoestructural en dos dimensiones (actualmente la formulación también se extiende a 3D) para materiales heterogéneos, basado en elementos junta de espesor nulo. Los elementos junta representan el modo más natural de integrar el “fictitious crack model” (modelo de la fisura ficticia) de Hillerborg¹ en un análisis numérico avanzado mediante el método de los elementos finitos. En este estudio, la estructura interna del material cuasifrágil se representa explícitamente y las interfases se insertan a priori entre los elementos estándar del medio continuo, a lo largo de las principales potenciales trayectorias de fisuración. En la sección 2 se describe la modelización mesoestructural y en los siguientes apartados se presentan resultados correspondientes al comportamiento diferido del hormigón (sección 3), el hueso trabecular (sección 4) y la producción de arena en pozos petrolíferos (sección 5).

2 MODELIZACIÓN MESOESTRUCTURAL

El comportamiento de materiales heterogéneos como el hormigón o el hueso poroso está claramente influenciado por la geometría y las propiedades mecánicas de los componentes de la estructura interna del material. Por ello, una manera más adecuada de profundizar el estudio de estos materiales consiste en representar explícitamente la microestructura de primer nivel (a veces también llamada mesoestructura), introducir leyes de comportamiento de sus componentes básicos, e intentar reproducir el comportamiento “macro” del material como resultado del análisis mecánico, de difusión, etc. a nivel “meso”.

Las figuras 1a y 1b muestran las imágenes de una probeta de hormigón de 15 cm de diámetro y una muestra de hueso trabecular de $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$, tomada de ². En la probeta de hormigón se puede identificar fácilmente una mesoestructura constituida por partículas de áridos de un tamaño mayor, embebidas en una matriz formada por el mortero y los áridos de menor tamaño. El hueso poroso presenta una estructura entramada de barras y placas de tejido calcificado, orientadas aleatoriamente (arquitectura trabecular). En la muestra de la figura 1b se puede distinguir una estructura porosa no homogénea. Se puede apreciar en estas figuras que salvo por la diferencia de escala de longitud (cm en un caso y mm en el otro), a este nivel de observación las geometrías de ambos materiales no es muy diferente si se reemplazan los

áridos por huecos. Dada la analogía entre ambas estructuras internas, en este trabajo se modeliza de manera similar ambas mesoestructuras. Para ello, una muestra 2D se representa mediante una matriz (correspondiente al mortero en hormigón y a la fase sólida en hueso trabecular) que rodea a una fase de partículas irregulares correspondientes a los áridos de mayor tamaño en hormigón y de vacíos en el caso de hueso (Fig. 1c). Para la generación de la geometría se utiliza un procedimiento aleatorio basado en la teoría de Voronoï/Delaunay³. A fin de posibilitar la no linealidad de comportamiento, mecanismos de rotura y fisuración, etc., la malla de elementos finitos incluye elementos junta sin espesor, distribuidos entre algunos contactos de la matriz y a lo largo de todos los contactos entre elementos árido-mortero (interfase) en el hormigón, de modo de representar las principales direcciones potenciales de fisuración (Fig. 1c inf.).

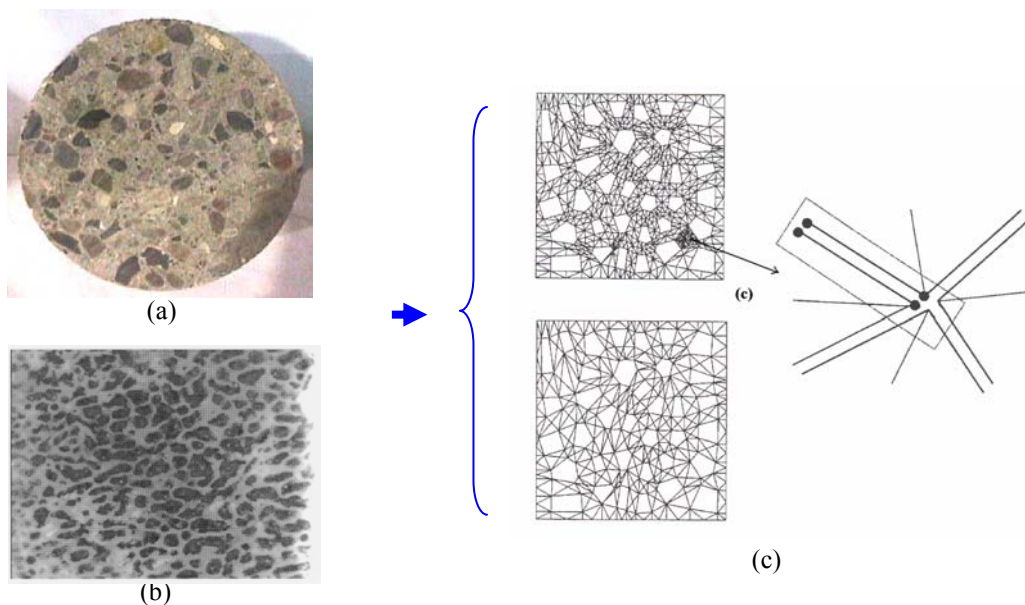


Figura 1. a) Muestra de 15 cm de hormigón, b) muestra de 1cm x 1cm de hueso trabecular, c sup.) ejemplo de la discretización de la matriz, c inf.) disposición de las junta, c der.) detalle de elementos junta.

En la figura 2a se presenta una muestra real de la roca arenisca de un pozo petrolífero⁴, en la que también puede apreciarse una geometría mesoestructural de diferente tamaño, aunque de características similares a la del hormigón y el hueso. En este caso, a fin de limitar el alto número de grados de libertad de la malla global (en la sección 5 se describe en mayor detalle), la discretización de la fase intergranular se ha simplificado a un contacto entre granos simulado mediante elementos junta sin espesor (Fig. 2b).

2.1 Modelización del medio continuo

En la formulación original del modelo los elementos de medio continuo se discretizan mediante elementos finitos triangulares a los cuales se les asigna un comportamiento elástico lineal. Más recientemente, para el estudio de la fluencia del hormigón, el comportamiento de

los áridos se mantiene elástico lineal, mientras que para la matriz de mortero se considera un comportamiento visco-elástico lineal con envejecimiento mediante el modelo de la “cadena de Maxwell” (Fig. 3a). Este modelo resulta equivalente al desarrollo en serie de Dirichlet de la función de relajación $R(t, t_0)$, función de relación “dual” respecto a la habitualmente conocida función de fluencia $J(t, t_0)$, siendo t_0 la edad de aplicación de la carga y t el instante en el que se desea conocer el valor de la función. Los modelos reológicos de formulaciones diferenciales tienen ventajas fundamentales para el análisis numérico frente a formulaciones integrales, ya que no requieren conservar en todo momento la historia completa de deformaciones en cada punto de integración⁵. Si bien sólo el mortero presenta un comportamiento dependiente del tiempo, por lo general, la función de fluencia se determina globalmente para el hormigón mediante expresiones que ajustan resultados obtenidos experimentalmente. Como en nuestra simulación mesoestructural las principales fases del material se representan explícitamente, entonces los parámetros de la Cadena de Maxwell para la matriz tienen que ser ajustados de modo de obtener el comportamiento visco-elástico global deseado. En nuestro caso, el ajuste se ha hecho con respecto a la función de fluencia $J(t, t_0)$ dada en el código español⁶, (Fig. 3b).

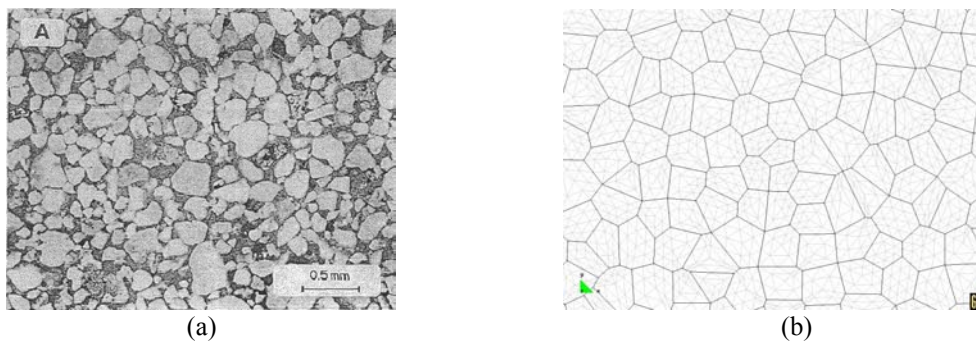


Figura 2. a) Muestra real de la distribución de granos de arena, b) modelización simplificada.

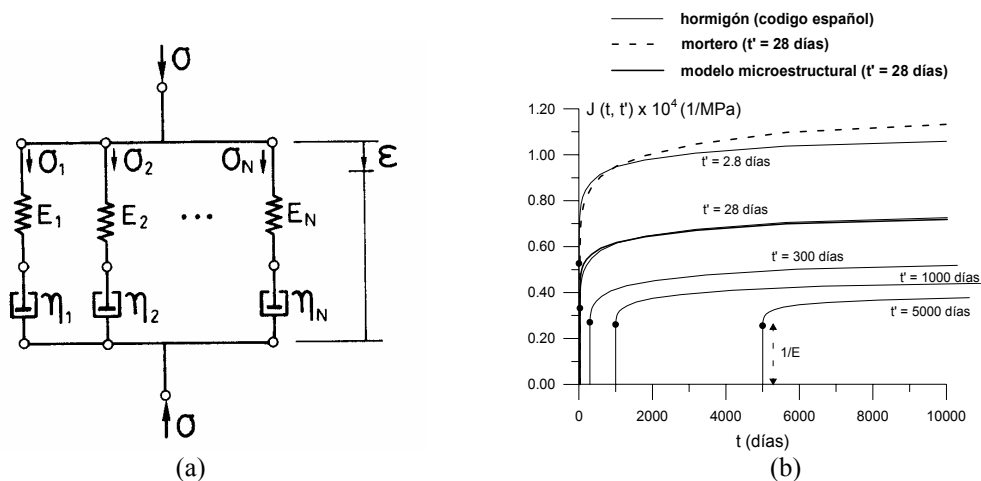


Figura 3. a) Modelo reológico “Cadena de Maxwell”, b) Función de fluencia para la matriz de mortero ($t_0 = 28$ días), obtenida del ajuste entre el modelo mesoestructural y el código español⁶.

2.2 Ley constitutiva de junta

La ley constitutiva de junta permite representar dos aspectos importantes del comportamiento resistente del material: el reblandecimiento debido al trabajo disipado en procesos de fractura y el incremento de resistencia con el paso del tiempo (este último, necesario para el análisis de la fluencia del hormigón). El comportamiento está formulado en términos de las componentes normal y tangencial de las tensiones en el plano de la junta, $\sigma = [\sigma_N, \sigma_T]^t$ y los desplazamientos relativos correspondientes $\mathbf{u} = [u_N, u_T]^t$ ($t =$ transpuesta). La superficie de rotura $F = 0$ se define mediante una hipérbola de tres parámetros que se muestran en la figura 4 (la resistencia a tracción χ y los parámetros c y $\tan\phi$ de la asíntota, que representan la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna, respectivamente). Una vez iniciada la fisuración, la superficie de rotura se contrae mediante el decrecimiento de los parámetros de la hipérbola en función de unas leyes basadas en el trabajo consumido en procesos de fractura, W^{cr} . Para controlar el proceso de evolución de F , el modelo también posee dos parámetros que representan la energía de fractura clásica en modo I, G_F^I (tracción pura) y un segundo modo denominado Modo IIa definido bajo corte y alta compresión sin dilatación, G_F^{IIa} . Para tracción pura la superficie de rotura final viene dada por una hipérbola con vértice en el origen (curva “2” en la Fig. 4). En el estado final para el cual $c = 0$ y $\tan\phi = \tan\phi_r$ la superficie de fractura queda definida por un par de líneas rectas que representan una fricción pura residual (curva “3” en la Fig. 4). En ^{7,8} se puede consultar una descripción más detallada de esta versión de la ley de junta.

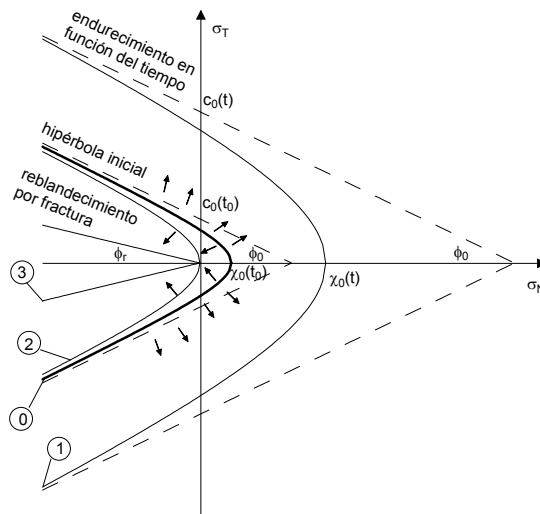


Figura 4. Evolución de la superficie de rotura: reblandecimiento por trabajo de fractura y endurecimiento debido al tiempo.

En la versión original del modelo los valores iniciales de las variables de estado, χ_0 , c_0 y $\tan\phi_0$, son constantes que determinan una configuración inicial de la superficie de rotura representada por la curva “0” en la figura 4. Para tener en cuenta el aumento de resistencia del material con el paso del tiempo, se establece una evolución de los parámetros en función del

tiempo que tiene la siguiente expresión:

$$f(t) = f(t_0) \left[1 - e^{-k \left(\frac{t}{28} \right)^p} \right] \quad (1)$$

en la cual f pueden ser los parámetros χ_0 , c_0 y G_F^I (G_F^{IIa} se adopta proporcional a G_F^I) y k y p son dos coeficientes que permiten controlar la forma de la curva y la relación entre el valor de las variables a $t_0 = 28$ días (edad a la que habitualmente se refieren las características mecánicas del hormigón) y el valor final a un tiempo suficientemente prolongado (p.e. 10000 días). De esta manera, la superficie de rotura para una determinada edad inicial de carga se expande con el tiempo como se muestra por ejemplo en la curva “1” de la figura 4.

3 APLICACIÓN A HORMIGÓN

La primera aplicación del modelo mesoestructural ha sido en muestras de hormigón, cuyos resultados han permitido reproducir el comportamiento experimental observado en distintas situaciones de carga instantánea, tales como tracción y compresión uniaxial, biaxial, ensayo brasileño, etc.^{8,9}. En este artículo se presentan algunos resultados recientes de la simulación del comportamiento diferido.

3.1 Compresión instantánea a distinta edad de carga

Para verificar el comportamiento de madurez del modelo se ha llevado a cabo un ensayo de compresión uniaxial en condiciones cuasi-estáticas. A fin de simular unas condiciones de análisis más aproximadas a las reales, también se discretiza el plato de carga superior y la interfase hormigón-plato, como se muestra en la figura 5a (en los ensayos de fluencia que se presentan en el siguiente apartado, se prescribe la tensión promedio sobre el lado superior de la probeta pero al mismo tiempo los desplazamientos verticales son prácticamente uniformes debido a la rigidez del plato de carga). En este caso, la carga se impone en términos de desplazamientos uniformes verticales en los nodos de la cara superior del plato (los nodos del lado inferior de la probeta permanecen fijos en dicha dirección), mientras que los desplazamientos transversales se dejan libres. Los ensayos se realizan en tensión plana y las tensiones medias (nominales) en los bordes superior e inferior de la malla se obtienen sumando las correspondientes reacciones nodales y dividiéndolas por el tamaño de la muestra. En la figura 5b se presentan las curvas tensión-deformación promedio para varias edades de carga t_0 , graficadas hasta el valor de su carga máxima. Se puede apreciar en la figura que a medida que aumenta la edad de carga se produce un aumento de la resistencia (valor de pico), propiciado por la nueva formulación de la ley constitutiva de junta que permite un endurecimiento de los parámetros χ y c de la superficie de rotura con el paso del tiempo. También se puede observar un incremento del módulo de elasticidad que es debido al envejecimiento de la ley visco-elástica de los elementos continuos del mortero. Por lo tanto, mediante la combinación de efectos de las leyes constitutivas de la matriz y de las interfases, el modelo puede reproducir adecuadamente el conocido comportamiento de envejecimiento detectado en las curvas tensión-deformación del hormigón.

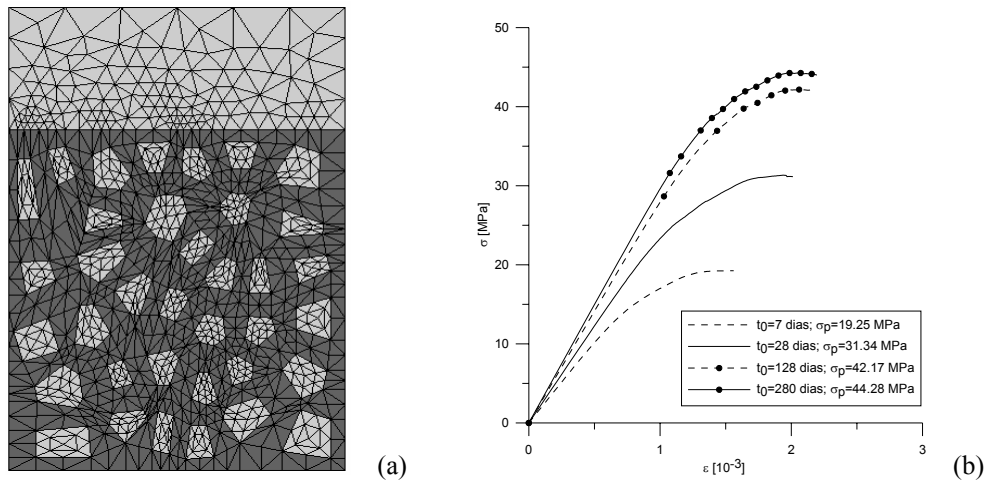


Figura 5. a) Malla de EF de la muestra de hormigón que incluye el plato de carga superior, b) curvas de compresión uniaxial instantánea para distintas edades de carga.

3.2 Fluencia básica en compresión

En los ensayos de fluencia básica (sin cambios de humedad) se emplea la misma malla para el hormigón con la incorporación del plato de carga (Fig. 5a). La única diferencia es que ahora la carga se aplica en términos de tensiones en el plato superior, en vez de desplazamientos. La prueba se ha llevado a cabo para dos diferentes edades de carga t_0 de 7 y 28 días. En la edad t_0 , se aplica una carga de compresión hasta un cierto valor, y luego se deja constante durante un período de 10.000 días. El cálculo se repite para diferentes valores de tensión. En la figura 6a se muestra para ambos casos, los diagramas tensión nominal-deformación, representados en la forma tradicional de “curvas isocronas”. La curva situada en cada caso a la izquierda corresponde al ensayo de compresión “instantáneo” (graficado hasta el valor de su carga máxima). Cada uno de los cálculos de fluencia sigue la curva instantánea correspondiente hasta el nivel de tensión establecido, y a partir de allí se mueven horizontalmente, con deformación creciente mientras que la tensión permanece constante. Las “curvas isocronas” se obtienen conectando los puntos correspondientes a tiempos $t-t_0$ iguales en los distintos cálculos como se representa en la figura 6a, en línea continua para $t_0 = 28$ días y mediante líneas a trazos para $t_0 = 7$ días. Se puede apreciar en la figura que para niveles bajos de tensión (inferiores a 0.3-0.5 de la resistencia), la respuesta resulta proporcional (líneas isocronas rectas), mientras que para porcentajes superiores el modelo capta la no linealidad del comportamiento. Asimismo, comparando las isocronas con el mismo tiempo $t-t_0$ de ambas edades del material, se puede advertir unas mayores deformaciones para la muestra más joven, lo cual concuerda con el comportamiento observado experimentalmente.

En las figuras 6b y 6c se muestra la evolución de la fisuración en ambos casos, para una carga que se mantiene constante mientras $t-t_0$ varía desde 0 hasta 10000 días. El espesor de las líneas representa el trabajo disipado durante el proceso de fractura en cada punto de la junta. Puede apreciarse que para $t_0 = 28$ días, la microfisuración se va incrementando en el tiempo

(Fig. 6b), mientras que para $t_0 = 7$ días se produce la descarga de varias juntas (de tonalidad más clara en Fig. 6c). La evolución de la fisuración depende de dos procesos superpuestos. Por un lado, con el paso del tiempo se produce un endurecimiento debido al efecto de madurez de los parámetros de la superficie de rotura de las interfases. Por otro lado, debido al comportamiento visco-elástico de la matriz, se genera una redistribución interna de tensiones, que se transfieren progresivamente desde la matriz de mortero a los áridos. Esta redistribución de tensiones produce un aumento de carga sobre las juntas, lo cual puede dar lugar a un proceso de evolución de la fisuración a lo largo del tiempo aunque la carga exterior permanezca constante. La evolución a lo largo del tiempo que finalmente siga la fisuración depende de la combinación de estos dos procesos, y del papel que en cada uno de ellos jueguen los parámetros de resistencia y envejecimiento que se adopten para las juntas. En el ejemplo presentado se puede apreciar que para $t_0 = 7$ días resulta predominante el efecto del endurecimiento de los parámetros de la junta y por lo tanto la tendencia de fisuración general entra en descarga, mientras que para $t_0 = 28$ días el proceso de fisuración se va incrementando debido al predominio del efecto de redistribución interna de tensiones.

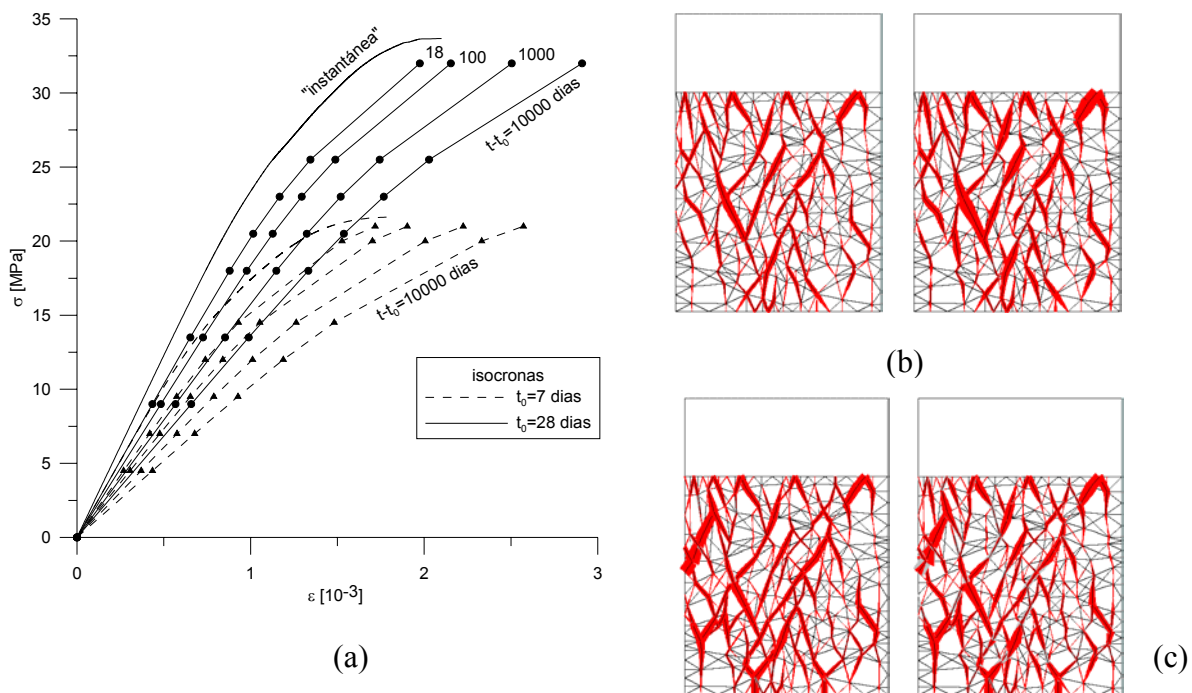


Figura 6. a) "Curvas isocronas" para carga aplicada a 7 y 28 días, b) Evolución de la fisuración para $t_0 = 28$ días, c) y para $t_0 = 7$ días, para carga constante con $t - t_0 = 0$ (izquierda) y $t - t_0 = 10000$ días (derecha).

3.3 Retracción por secado

Los mecanismos físicos que gobiernan la retracción por secado involucran varios fenómenos y efectos acoplados. De acuerdo con la ley de Fick, el gradiente de humedad relativa en los poros conduce los movimientos de humedad. La pérdida de agua causa una reducción del volumen de la pasta de cemento, que en una primera aproximación se puede

considerar de tipo lineal. Las distribuciones de temperatura también juegan un papel, causando unas expansiones térmicas que afectan las relaciones e intercambios del contenido de humedad. Durante el proceso de retracción se desarrollan nuevas fisuras, las cuales representan un camino preferencial para la difusión de humedad. Por lo tanto, un modelo numérico completo debería considerar todos los procesos mecánicos y de difusión, así como los mecanismos de acoplamiento. Aunque pueden encontrarse algunas referencias en la literatura, tal formulación general está lejos de ser práctica en cálculos a gran escala como el análisis a nivel meso desarrollado en este estudio. El modelo empleado representa una primera aproximación en el cual el flujo de humedad se considera desacoplado y sus resultados se utilizan como datos de entrada para el análisis mecánico. A pesar de las simplificaciones inherentes, esta modelización da resultados razonables.

El gradiente de humedad relativa conduce la difusión de la humedad en la matriz de mortero. Se ha realizado un análisis de elementos finitos sobre la misma malla usada para la prueba de fluencia básica (sin el plato de carga), en la cual la humedad relativa H son las variables nodales desconocidas. Se imponen unas condiciones de borde de $H = 0.5$ sobre los nodos de los bordes laterales, y no se permite el flujo de humedad en las superficies inferior y superior. La condición inicial ($t_0 = 28$ días) prescribe que $H(t_0) = 1$ en todos los nodos. El análisis dependiente del tiempo se rige por la ecuación¹⁰:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(D_H \cdot \text{grad}H) \quad (2)$$

donde D_H puede expresarse mediante la siguiente ecuación hiperbólica:

$$D_H(H) = D_0 + (D_1 - D_0) \cdot f(\beta, H) \quad (3)$$

en la cual D_H decrece acentuadamente a medida que H disminuye de 1 a 0.

En cada paso de cálculo, se obtiene la cantidad de agua evaporable W_e en los poros con respecto al contenido de cemento en cada nodo, en función de la humedad relativa, siguiendo la curva de desorción propuesta por Norling¹¹. Luego se calculan las deformaciones equivalentes relativas a la pérdida de peso, las cuales se introducen como deformaciones impuestas en el análisis de EF mecánico. En la figura 7 se presenta la difusión de humedad a través de un período de tiempo que va desde 15 a 10.0000 días. A medida que el tiempo avanza, la distribución uniforme de $H = 0.5$ se extiende hacia el interior, hasta que al final prácticamente alcanza la muestra completa. En las figuras 8 y 9 se muestran las interfases fisuradas (en rojo) y la malla deformada, para $t-t_0$ igual a 15, 150 y 1500 días. Las fisuras principales como cabía esperar se presentan a lo largo de los bordes laterales, aunque también en el interior de las muestras se activan algunas juntas. Este último efecto concuerda con los resultados experimentales recientes obtenidos por van Mier¹².

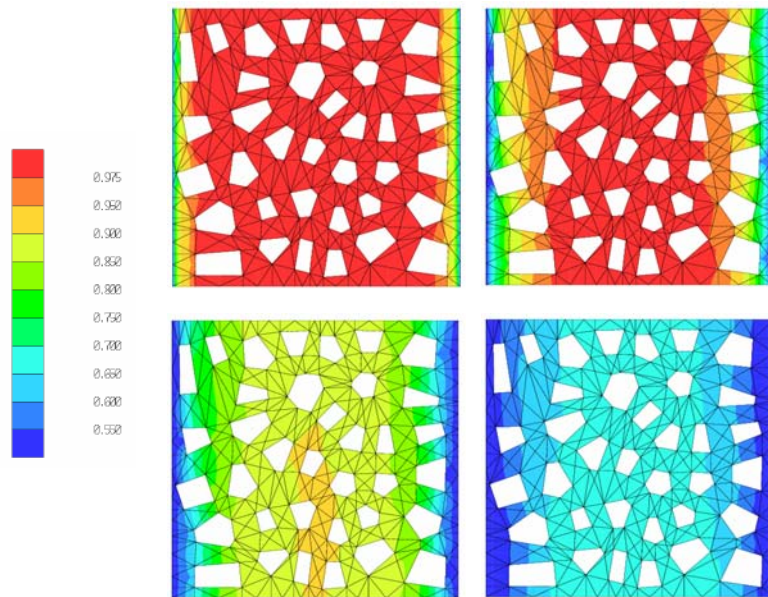


Figura 7. Difusión de humedad para $t-t_0 = 15, 150, 1500$ y 10000 días (de izq. a der. y de sup. a inf.).

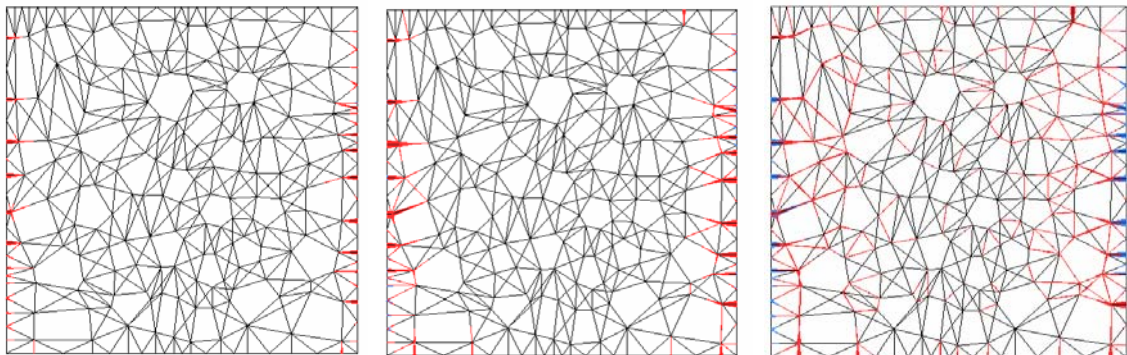


Figura 8. Energía de fractura disipada en las interfaces para $t-t_0 = 15, 150$ y 1500 días (de izq. a der.).

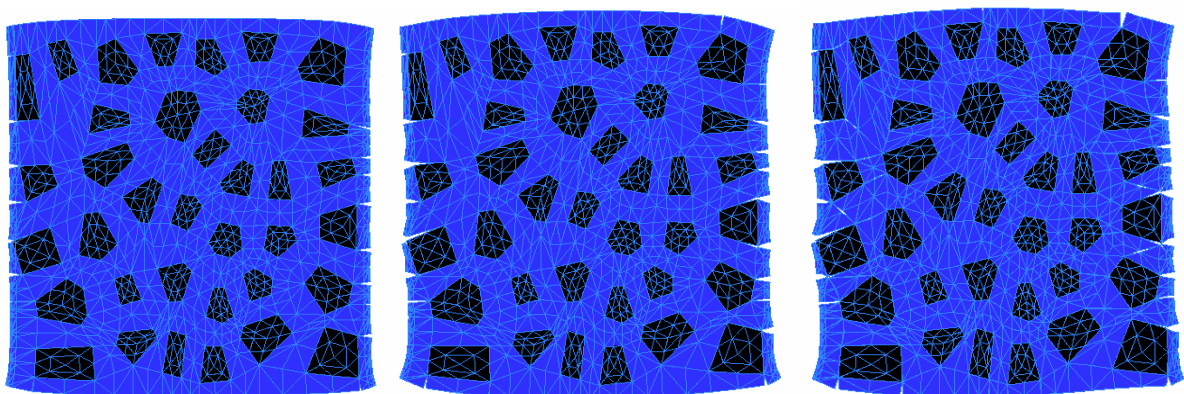


Figura 9. Malla deformada para $t-t_0 = 15, 150$ y 1500 días (de izq. a der.).

4 APLICACIÓN A HUESO TRABECULAR

En esta línea de trabajo se están desarrollando diversos estudios, muchos de los cuales forman parte de una tesis doctoral, actualmente en su fase final¹³ (en⁷ se incluyen resultados obtenidos para mallas isotropas). En este artículo se comentarán los resultados obtenidos en muestras anisótropas frente a cargas de distinta orientación respecto de los ejes de ortotropía.

Tanto el módulo de elasticidad como la resistencia dependen de la dirección de la carga aplicada para la misma morfología trabecular¹⁴, y varían considerablemente en función de los valores de los principales parámetros geométricos como la porosidad y el tensor de fábrica¹⁵. Se ha realizado una serie de ensayos numéricos de tracción uniaxial en ambas direcciones de muestras cuadradas cortadas con distinta orientación de los ejes principales del tensor de fábrica. Se han analizado seis muestras cortadas cada 15° de giro con respecto al eje horizontal (dirección principal con menor valor de tensor de fábrica) para cinco diferentes valores de la porosidad (la relación entre los valores principales del tensor de fábrica H_1 / H_2 se mantiene constante al variar la porosidad).

En la figura 10 se presenta el diagrama polar del módulo de elasticidad (izquierda) y de la tensión máxima (derecha), en función del ángulo de giro. En ambos gráficos los resultados del primer cuadrante corresponden a los ensayos en la dirección transversal (horizontal) de la muestra para los distintos ángulos de giro analizados, mientras que los del segundo cuadrante corresponden a la carga en dirección longitudinal (vertical). En la figura de la izquierda se puede apreciar que el módulo de elasticidad aumenta para igual porosidad desde la dirección horizontal hasta la vertical, en acuerdo con los valores principales del tensor de fábrica. Asimismo, se observa que a medida que disminuye la porosidad, se incrementa el módulo en cada orientación, si bien la relación entre los módulos a 90° y 0° decrece en términos relativos (de más del doble para porosidad de 0,74 hasta aproximadamente 1.4 para 0.34). En el diagrama de tensiones máximas puede apreciarse una característica diferente: la resistencia en función del ángulo presenta una discontinuidad; mientras que se mantiene constante en un cierto rango de ángulos cercanos a la dirección principal de valor más bajo (trayectoria aproximadamente circular), luego, en el otro rango cercano al mayor valor sigue una tendencia distinta tipo “elipse”. Este tipo de comportamiento ya ha sido señalado en la literatura para materiales como suelos o algunos metales.

En las figuras 11 y 12 se presentan las mallas deformadas con porosidades de 0.44 y 0.74, respectivamente, para tres distintas orientaciones de la carga de tracción. Para la malla de menor porosidad el comportamiento obtenido se asemeja al que cabe esperar de un medio continuo, con desplazamientos y efecto Poisson en las direcciones principales del tensor de fábrica y con desplazamientos de corte perpendiculares a la dirección de carga para otras orientaciones, como se aprecia en la malla girada 45°.

Para la malla de mayor porosidad puede apreciarse una localización más acentuada. En las direcciones principales la deformación se produce a lo largo de la muestra, mientras que para otros ángulos de giro (véase la representación de 45°) se observa una zona localizada en la que las trabéculas giran y tienden a orientarse según la dirección de carga, mientras que la otra parte de la muestra prácticamente permanece sin deformarse.

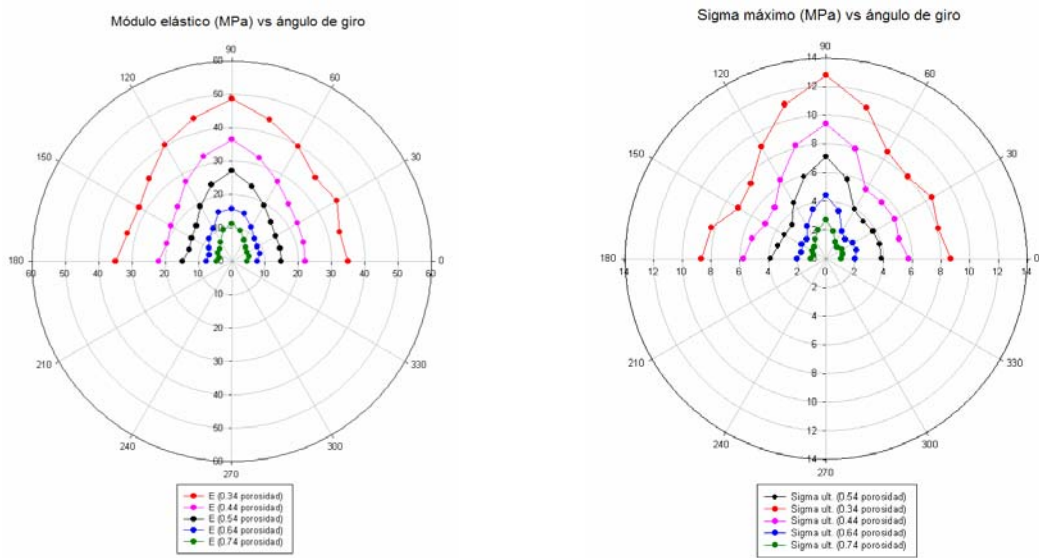


Figura 10. Diagrama polar del módulo elástico (izq.) y de la tensión máxima (der.) en función del ángulo de giro, para distintos valores de la porosidad.

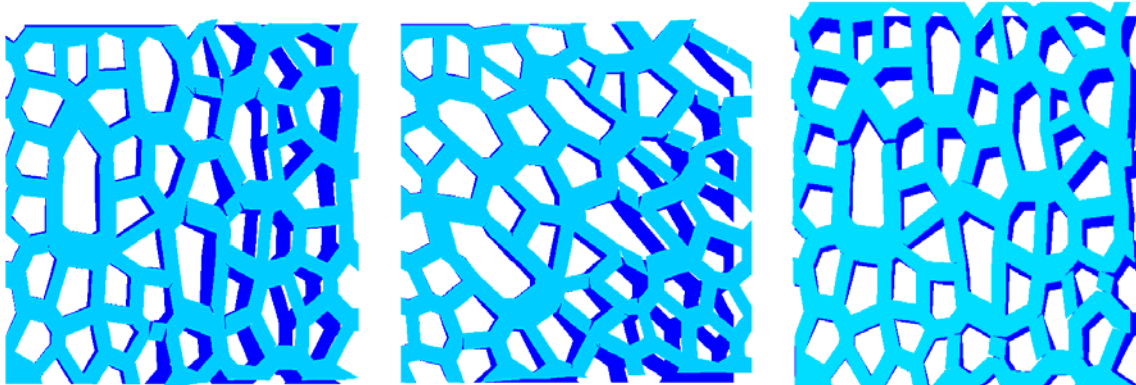


Figura 11. Mallas deformadas correspondientes a una porosidad de 0.44 para tres ángulos de giro de 0° (izq.), 45° (medio) y 90° (der.).

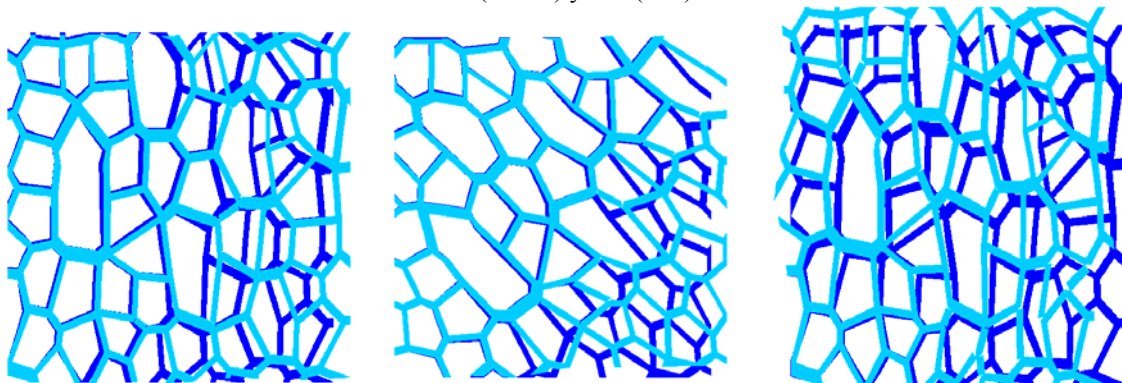


Figura 12. Mallas deformadas correspondientes a una porosidad de 0.74 para tres ángulos de giro de 0° (izq.), 45° (medio) y 90° (der.).

5 PRODUCCIÓN DE ARENA (ROCK SANDING)

La producción de arena es un fenómeno de disgregación del medio que se genera en formaciones débilmente cohesionadas, como arenas poco cementadas. Este fenómeno está gobernado por varios factores, entre los que destacan principalmente el estado tensional y la presión del flujo de extracción. Los estudios realizados hasta el momento han puesto de manifiesto que el primer factor gobierna la fisuración del medio, y el segundo es el responsable del transporte¹⁶. El estudio de la producción de arena (rock sanding) en pozos petrolíferos ha sido objeto importante de investigación durante las últimas décadas debido al auge de nuevas técnicas de producción como la perforación con cañones (perforating guns). Esta técnica consta de un tubo con orificios laterales (Fig. 13a) que en su interior lleva un cordón detonante. Este tubo se introduce dentro del sondeo y se hace detonar, de modo que la onda expansiva de la explosión pasa a través de los orificios y crea pequeñas perforaciones laterales de poco diámetro (alrededor de 2 cm), transversales a la perforación principal (Fig. 13b). De esta manera se aumenta la capacidad de drenaje del pozo, si bien, dado que no resulta factible el revestimiento, se necesita analizar la producción de arena a fin de evaluar la viabilidad del método. Para nuestro análisis se ha discretizado una sección transversal de perforación lateral tal como se muestra en la figura 13c.

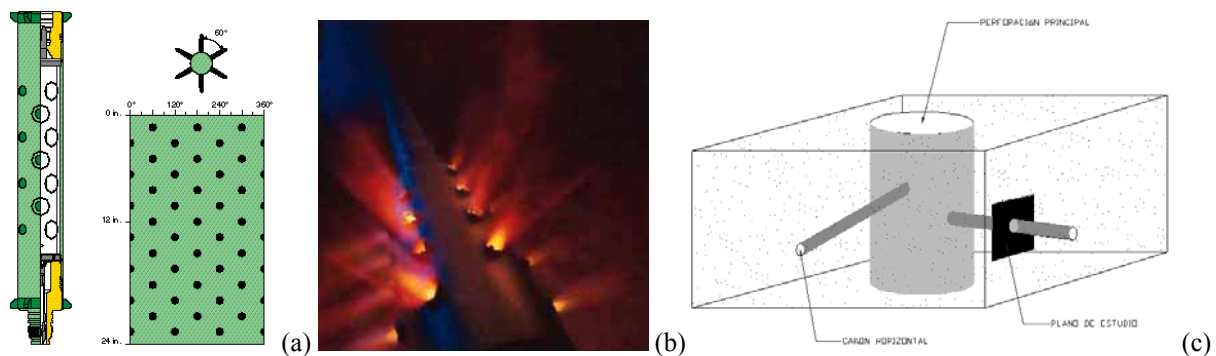


Figura 13. a) Cañón de perforación, b) detonación de un cañón de perforación, c) esquema de una perforación petrolífera mediante cañones y zona de modelización.

Para ello se consideran dos zonas bien diferenciadas:

a) una corona circular que rodea el hueco de perforación, en la que se representan explícitamente granos de arena distribuidos de forma aleatoria mediante elementos finitos triangulares de comportamiento elástico lineal (Fig. 14a). El contacto entre granos se simula mediante elementos junta sin espesor, cuya ley constitutiva no lineal con reblandecimiento por trabajo de fractura se ha presentado en el apartado 2.2.

b) Una malla de elementos continuos, que rodea la zona anterior, con una extensión suficiente como para garantizar la transmisión de las tensiones de confinamiento, a la vez que permite disminuir el número de elementos de la discretización (Fig. 14b). La malla final se obtiene mediante la unión de ambas discretizaciones (Fig. 14c).

La simulación numérica del proceso consta de tres etapas principales:

1) generación del estado inicial de tensiones: se impone una carga de compresión a lo

largo de todos los contornos de la malla, que puede dar lugar a un estado hidrostático ($K_0 = 0$) o no hidrostático ($K_0 \neq 0$) de tensiones iniciales.

2) simulación del hueco de perforación. Para estados iniciales hidrostáticos, a fin de simplificar los cálculos, la malla inicial incluye el hueco en cuyos contornos se impone la presión inicial, y por lo tanto el proceso de excavación se simula mediante una descompresión progresiva de la corona interior. Para estados no hidrostáticos, la malla inicial incluye elementos continuos en el interior de la corona, que en esta etapa se extraen.

Como en estas dos etapas la presión de fluido se mantiene constante, entonces es posible realizar el cálculo en tensiones efectivas.

3) disminución de la presión dentro de la perforación (drawdown), simulando el proceso de extracción de petróleo. En estas condiciones la presión de fluido deja ser constante y por lo tanto el problema hidro-mecánico (HM) involucrado debe ser tratado de forma acoplada y en tensiones totales. En nuestro trabajo el problema acoplado se resuelve mediante una estrategia de tipo “staggered” y utilizando una misma malla de elementos finitos.

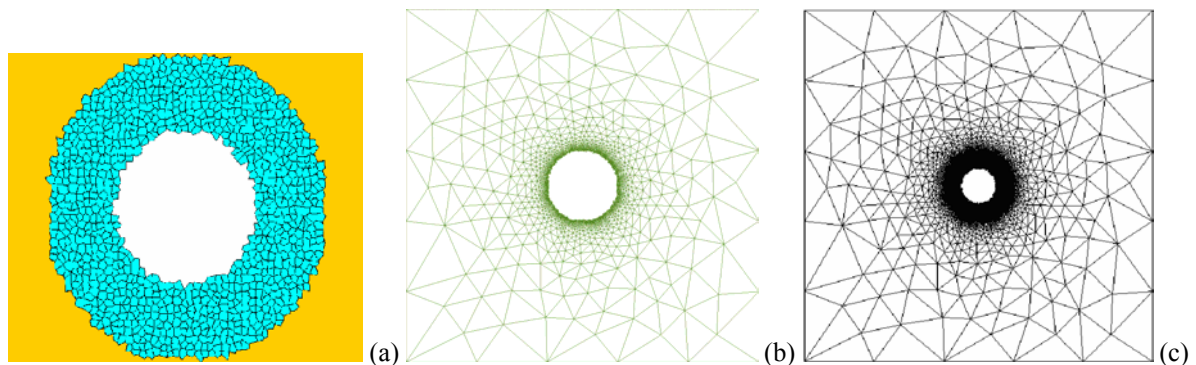


Figura 14. Proceso de construcción de la malla, a) corona circular de granos de arena, b) malla de elementos continuos, c) malla completa.

En la figura 15 se presentan los resultados obtenidos para un estado hidrostático de 200 kg/cm^2 de tensiones iniciales (lo cual podría corresponder a una muestra situada a una profundidad de unos 650 metros, suponiendo sólo carga debida al peso propio). En cada gráfico se muestra el estado de fisuración en términos de la energía disipada durante el proceso, para tres niveles de descompresión de la corona interior (etapa 2 según la clasificación precedente). Como se puede apreciar en las figuras, con el aumento de la descompresión se va incrementando el número de juntas que se fisuran en la zona alrededor de los granos cercanos al hueco de la perforación. Incluso en esta etapa anterior al “drawdown” puede comenzar la disgregación del medio que en nuestra modelización se lleva a cabo mediante la extracción de los granos (individuales o en grupo) cuyos elementos junta que los mantienen en contacto con el restante medio granular, alcanzan un determinado grado de deterioro.

En la figura 16 se presenta la fisuración correspondiente a un estado no hidrostático de tensiones iniciales con $K_0 = 2$ en la fase de simulación de la excavación del hueco de

perforación. El resultado obtenido concuerda con el comportamiento detectado experimentalmente en cuanto a una tendencia de rotura preferencial en la dirección perpendicular a la máxima tensión aplicada.

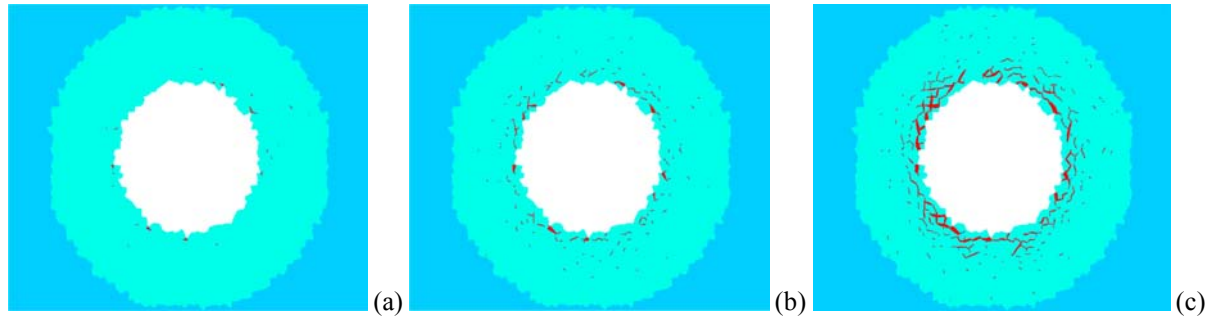


Figura 15. Evolución del estado de fisuración para tres niveles crecientes de descompresión.

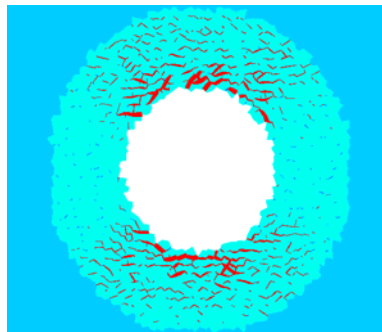


Figura 16. Distribución de la fisuración durante la excavación del hueco de perforación para el estado no hidrostático de tensiones iniciales.

6 CONSIDERACIONES FINALES

Como se desprende de las aplicaciones presentadas en este trabajo, el análisis de materiales cuasifrágiles mediante una modelización mesomecánica posibilita un enfoque potente que permite detectar y explicar diversos aspectos internos, tales como la influencia de las fases componentes, zonas de debilidad, iniciación y propagación de la microfisuración, mecanismos de rotura, especialmente en situaciones complejas de carga e interacción con otros fenómenos ambientales, como grado de humedad, temperatura, presión de fluidos, etc. Estos aspectos, que resultan determinantes del comportamiento observado en muchos materiales, resultan a menudo imposibles de detectar mediante planteamientos macroscópicos.

Los resultados obtenidos hasta el momento en el análisis diferido del hormigón constituyen un marco muy promisorio para profundizar el estudio de fenómenos más complejos del comportamiento acoplado mecánico-difusión, que involucran la fluencia básica, la retracción y la fluencia por secado, así como otros procesos de difusión que inciden en la durabilidad de las estructuras constituidas por este material.

El estudio numérico del hueso trabecular mediante geometrías generadas aleatoriamente con la teoría de Voronoi/Delaunay se presenta como una buena alternativa de profundizar el conocimiento del comportamiento no lineal y los modos de rotura del material, sobre todo en el ámbito anisótropo. Aún deben ser investigados aspectos básicos importantes de la geometría, sobre todo con respecto a las propiedades y el alcance del tensor de fábrica de segundo orden para caracterizar la estructura trabecular del material.

En lo referente al estudio de producción de arena, en la actualidad se están completando los aspectos de la instrumentación automática del procedimiento de extracción de granos y se están analizando diversos factores que inciden en la problemática general, tales como la influencia del nivel de las tensiones iniciales o el efecto tamaño del hueco de perforación¹⁷. También se han iniciado los trabajos específicos encaminados a la simulación de la tercera etapa de disminución de la presión, caracterizada por un efecto hidráulico-mecánico acoplado, asociado al proceso de producción de arena durante la extracción de petróleo.

7 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MCYT (Madrid, España) la ayuda recibida a través del proyecto de investigación MAT2000-1007 y BTE2001-2227. Asimismo agradecen la colaboración de la empresa Schlumberger Cambridge Research, y en particular del Dr. Panos Papanastasiou, por el soporte técnico recibido en la temática de producción de arena. El primer autor quiere agradecer al MCYT la incorporación al sistema español de ciencia y tecnología mediante el “Programa Ramón y Cajal”. Los autores agradecen especialmente la contribución de las personas del equipo de investigación que han participado en los distintos estudios específicos que se incluyen en este artículo: Olga Roa, Daniela Ciancio, José María Segura y Daniel Garolera.

8 REFERENCIAS

- [1] A. Hillerborg, M. Modéer and P.E. Petersson, “Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements”, *Cement and Concrete Research*, 6 (6): 773-781 (1976).
- [2] M. Pini, *Modellazione ed analisi di un tessuto osseo spongioso*, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Italia., (1998).
- [3] R. Klein, *Concrete and abstract Voronoï diagrams*, Berlin [etc.]: Springer-Verlag, cop. (1989).
- [4] P. Papanastasiou, -Colección de microfotografías de las texturas de las rocas ensayadas en el estudio de producción de arena-. Documento interno de *Schlumberger Cambridge Research*, (2001).
- [5] I. Carol and Z. P. Bažant., “Viscoelasticity with aging caused by solidification of a non-aging constituent”. *ASCE J. Engrg. Mech.* 119: 2252-2269, (1993).
- [6] EH-91. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, (1991).
- [7] I. Carol, C. M. López and O. Roa, “Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements”, *Int. J. Numer. Meth. in Engrg.* 52: 193-215

- (2001).
- [8] C. M. López, *Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta. Aplicación a diferentes hormigones*. Tesis Doctoral. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España (1999).
 - [9] C. López, I. Carol, y A. Aguado, “Modelización microestructural de la fractura del hormigón. I: tracción y compresión uniaxial y ensayo brasileño”, XIX Encuentro del Grupo Español de Fractura, Gerona, 13-15 de marzo (2002).
 - [10] J. Roncero, R. Gettu and I. Carol, “Effect of superplasticizers on the shrinkage weight loss of cement mortars subjected to drying”, *Creep, Shrinkage of Concrete Structures, CONCREEP 6*, pp 101-107, Edited by F.-J. Ulm, Z.P. Bazant and F.H. Wittmann.
 - [11] K. Norling, *Self-desiccation in concrete*; Licentiate Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden (1994).
 - [12] J. G. M. van Mier, J. Bisschop, T. Shiotani, Experimental observation of drying shrinkage cracking at the meso-level: preliminaries to numerical modeling and analyses; *Model-based simulation of durability of materials and structures*, Czech Technical University, Prague, Czech Republic, pp45, (2002).
 - [13] O. Roa, *Análisis microestructural del comportamiento mecánico del hueso trabecular*. Tesis Doctoral en curso. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
 - [14] H. A. Yuehuei, R. A. Draughn. *Mechanical testing of bone and the bone-implant interface*. CRC Press (2000).
 - [15] S. C Cowin, *Bone Mechanics*. CRC Press, (1991).
 - [16] J. M. Cook, I. D. Bradford, and R. A. Plumb, “A study of the physical mechanisms of sanding and application to sand production prediction”. Presented in *European Petroleum Conference* in London, UK, October 1994. *SPE paper* No. 28852, 1994.
 - [17] D. Garolera, I. Carol y C. M. López. “Microstructural analysis of rock sanding production using finite element method with interface elements”. *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 20, pag.71-76, (2003).