EXTENSIÓN A 3D DEL ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL DAÑO Y FRACTURA DEL HORMIGÓN UTILIZANDO ELEMENTOS JUNTA.

A. Caballero[*], I. Carol[*] y C.M. López[*]

[*]Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica,
ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona

Resumen. En este artículo se presentan los primeros trabajos desarrollados a fines de generalizar una modelización microestructural del hormigón de 2 (2D) a 3 dimensiones (3D). El modelo consiste en representar una probeta de hormigón en la cual un arreglo de piezas irregulares correspondientes a los áridos de mayor tamaño se encuentra rodeado por una matriz de mortero. En el análisis mediante elementos finitos, los elementos de medio continuo se suponen elásticos y para el comportamiento de las interfases se utiliza una ley constitutiva no lineal con reblandecimiento por trabajo de fractura. Esta ley se ha obtenido de la generalización a 3D del modelo de junta formulado inicialmente para 2D. Posteriormente se describe el procedimiento de discretización tridimensional de una muestra. El generador de mallas desarrollado permite obtener una geometría básica en la que se introduce también una familia de posibles superficies de fractura, y posteriormente una discretización de elementos finitos para esta geometría. Finalmente, se muestran algunos ejemplos de las mallas obtenidas.

Abstract. In this article are presented the first researches developed to generalize a microstructural modeling of concrete from 2 (2D) to 3 dimensions (3D). The microstructural model consists in a concrete specimen representation, in which an array of irregular pieces corresponding to the larger aggregates are surrounded by a mortar matrix. In the FE analysis, the continuum elements remain elastic and interface behavior is given by a fracture energy-based work-softening plastic model. This law has been obtained by the generalization to 3D of the joint model originally formulated to 2D. Following, the three dimensional discretization procedure of a specimen is described. This program allows to obtain a basic geometry in which it is also introduced a family of possible fracture surfaces and later on, a mesh of finite elements for this geometry. Finally, some examples of obtained meshes are shown.

1. INTRODUCCIÓN

Si bien en numerosas aplicaciones estructurales el hormigón suele considerarse como un medio continuo homogéneo, en realidad se trata de un material compuesto, cuya estructura interna heterogénea influye de manera determinante en su comportamiento macroscópico. Una opción que ofrece una mayor potencialidad de profundizar el conocimiento del comportamiento material 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 a nivel "micro".

Durante los últimos años se ha venido desarrollando un modelo mesoestructural en dos dimensiones (2D) 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 Hillerborg [1] en un análisis numérico avanzado mediante el método de los elementos finitos. En este estudio, la estructura interna del material 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. Los resultados obtenidos para hormigón han permitido reproducir en 2D el comportamiento experimental observado en distintas situaciones, tales como tracción y compresión uniaxial, biaxial, ensayo brasileño, etc. [2-4]. Actualmente, se están estudiando fenómenos más complejos en los cuales los ensayos experimentales son muy costosos o no resultan factibles de ser realizados con las actuales técnicas disponibles, como son por ejemplo el test teórico propuesto por Willam et. al. [5] o los ensayos en modo mixto de fractura realizados por Nooru-Mohamed [6].

Si bien la modelización 2D permite analizar aspectos importantes de la fractura del hormigón, la extensión del modelo microestructural a tres dimensiones (3D), a pesar del notable incremento en la demanda de memoria y tiempo de calculo que requiere, resulta imprescindible para completar una simulación más realista y general del comportamiento. En este artículo se presentan los primeros trabajos desarrollados para la generalización del modelo microestructural del hormigón de 2D a 3D. En primer lugar se presentan sintéticamente los principales aspectos de la ley constitutiva que determina el comportamiento de las interfases, obtenida de la generalización a 3D del modelo de junta formulado inicialmente para 2D. Luego, se describe detalladamente el procedimiento de discretización tridimensional de una muestra de hormigón, obtenida mediante un generador automático de mallas desarrollado íntegramente dentro del grupo de investigación de la UPC, y que forma parte de la

tesis doctoral en curso del primer autor de este trabajo. Para la generación de la geometría se ha utilizado un procedimiento basado en la teoría de Voronoï/Delaunay. La inclusión de superficies de interfases que representan las principales direcciones potenciales de fisuración ha requerido un desarrollo especial, puesto que lógicamente el planteamiento resulta de mayor complejidad que en el caso 2D. Finalmente, se presentan ejemplos de las mallas generadas, ya disponibles para la simulación del comportamiento mecánico tridimensional del hormigón.

2. LEY CONSTITUTIVA DE JUNTA

La ley constitutiva 3D resulta una extensión de la formulación 2D propuesta originalmente en el modelo denominado "multicrack" [7], posteriormente modificada y mejorada en [8,3,4]. En un sistema de referencia ortogonal local, el comportamiento de las juntas está formulado en términos de la componente normal y dos tensiones tangenciales en el plano de la junta, $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_N, \sigma_{T1}, \sigma_{T2}]^t$ y los desplazamientos relativos correspondientes $\mathbf{u} = [u_N, u_{T1}, u_{T2}]^t$ (^{t} = transpuesta), tal como puede observarse en la figura 1. El modelo, basado en la teoría de la elasto-plasticidad, incorpora conceptos de la Mecánica de Fractura y los desplazamientos relativos pueden ser identificados con aperturas de fisura. La superficie de rotura $F = 0$ se define mediante una función hiperbólica de tres parámetros (la resistencia a tracción χ y los parámetros c y tanϕ de las asíntotas, 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 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 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 dilatancia, G_F^{IIa}.

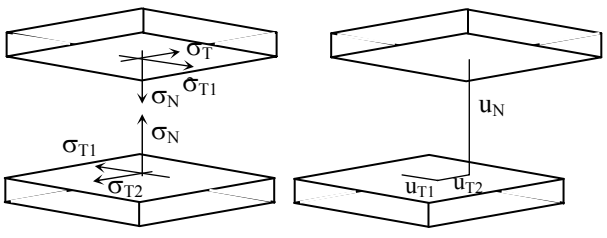


Fig.1. Definición de las tensiones y los desplazamientos relativos en las juntas.

Para tracción pura la superficie de rotura final viene dada por un hiperboloide con vértice en el origen. En el estado de situación final, la superficie de fractura queda definida por un cono que representa la fricción pura. El modelo es asociado sólo en tracción $F = Q$. En compresión se define una ley de dilatancia para que ésta disminuya progresivamente con el nivel de compresión y con la evolución de la degradación de la junta, $c \rightarrow 0$. En [8,3,4] se puede encontrar una descripción mas detallada de la versión en 2D.

3. MALLA MICROESTRUCTURAL

3.1 Generalidades

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 ha desarrollado un mallador en dos dimensiones que ha permitido generar mallas para el estudio microestructural de materiales heterogéneos, tales como el hormigón y el hueso trabecular. Dado que los resultados obtenidos, así como los estudios actualmente en marcha resultan satisfactorios, el objetivo ahora es extender el análisis a 3D, y por lo tanto generar las geometrías correspondientes.

El desarrollo de un mallador 3D para materiales micro estructurales presenta algunas dificultades adicionales al caso 2D. Incorporar la tercera dimensión aumenta la complejidad del proceso de generación y complica la verificación de los resultados obtenidos, tanto en la determinación de los poliedros de Voronoï/Delaunay, como en la generación de la malla final.

3.2 Método Utilizado

La generación de una malla de elementos finitos para la simulación del comportamiento de materiales heterogéneos desde un enfoque a nivel microestructural requiere resolver dos pasos fundamentales: la creación y adaptación de la geometría del material compuesto, y el proceso de mallado de esa geometría.

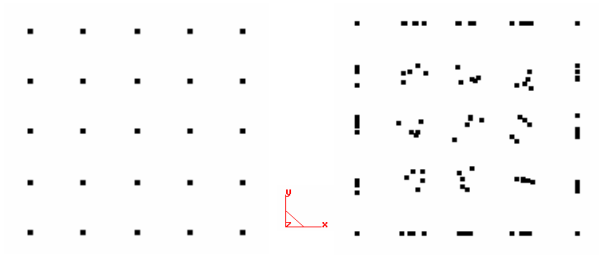
Para la generación de la geometría se ha utilizado un procedimiento basado en la teoría de Voronoï/Delaunay [9], a partir del cual se determina la posición y forma de los áridos rodeados por una matriz de mortero, así como la proporción entre estas dos fases. El proceso presenta una componente aleatoria, de modo que para cada ejecución del programa de generación, la geometría y por lo tanto también la malla final resultan distintas. Se requiere, además, una serie de subprocesos, que sirven para corregir ciertas anomalías que surgen debido al carácter aleatorio del propio procedimiento, y también debido a la definición de los contornos y la inclusión de los elementos junta. La corrección de estas irregularidades resulta necesaria a fines de garantizar una forma adecuada de los elementos finitos que finalmente componen la malla.

En segundo lugar, se procede a la generación de la malla de elementos finitos sobre la geometría construida. El procedimiento de mallado requiere la duplicación de nodos en el lugar donde se incluyen los

elementos junta. En los siguientes apartados se describe en mayor detalle el procedimiento seguido.

3.3 Definición de la geometría de la muestra

En primer lugar se genera una distribución regular de puntos en el espacio (Fig. 2a). La distribución inicial de puntos condiciona la forma del poliedro de Voronoï resultante [9-11]. La forma adoptada de puntos equiespaciados, si bien es la más sencilla, tiende a generar poliedros de Voronoï con algunos lados excesivamente cortos, motivo por el cual actualmente se está trabajando sobre otras formas de distribución diferentes.



(a) **(b)**

Fig.2. (a) Representación en un plano de la distribución inicial de puntos, (b) distribución de puntos perturbada.

La distribución inicial de puntos (Fig. 2a) se perturba aleatoriamente, de modo que cada punto puede desplazarse mediante una función random dentro de un espacio de distorsión definido previamente, sin llegar a ocupar el espacio de distorsión de los puntos vecinos (Fig. 2b). En el caso particular de los puntos del contorno, se puede controlar si el movimiento se restringe dentro del mismo contorno o se permite salir fuera de dicho plano. Como puede apreciarse, en el ejemplo mostrado en la figura 2b, los puntos correspondientes al borde tienen impedido el movimiento en la dirección normal al contorno. Después de la perturbación de puntos se genera una malla de tetraedros siguiendo el procedimiento de Delaunay, como puede observarse en la figura 3.

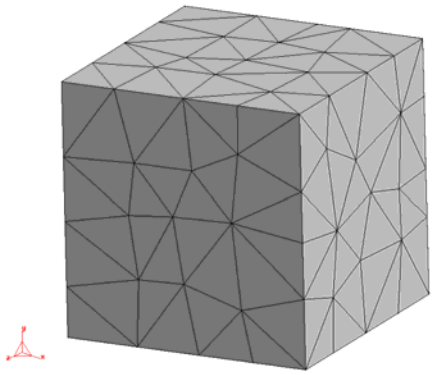


Fig.3. Malla de Delaunay obtenida a partir de la distribución perturbada de puntos de la figura 2b.

Posteriormente, uniendo entre sí los circuncentros de los tetraedros de Delaunay con caras comunes, se procede a la generación de los poliedros de Voronoï. El siguiente paso consiste en reducir el tamaño de los poliedros a fin de generar cada uno de los áridos y el espacio entre medio que será ocupado por la matriz de mortero. Para ello, se fija un coeficiente de reducción que establece la relación deseada del volumen de áridos con respecto al volumen total. Para dar mayor aleatoriedad a la configuración resultante se utiliza una función random que reduce uno a uno de forma distinta cada poliedro de Voronoï, si bien en media mantiene el valor del coeficiente de reducción dado. En la figura 4, se muestran los poliedros de Voronoï ya encogidos generados a partir de la malla de Delaunay.

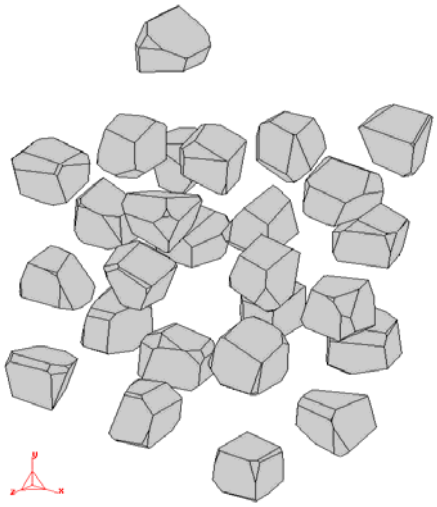


Fig.4. Poliedros de Voronoï resultantes para un ejemplo de 3x3x3 áridos.

Una vez generados y encogidos todos los poliedros se procede a rellenar el espacio comprendido entre ellos, que en nuestra representación corresponde a la matriz formada por el mortero y los áridos de menor tamaño. Para rellenar el espacio entre poliedros se utilizan las siguientes propiedades favorables, propias del proceso mismo de generación de los poliedros de Voronoï [11]:

a) Las caras enfrentadas entre dos poliedros distintos tienen el mismo número de lados y son paralelas entre sí, además definen un tronco de prisma con un número indeterminado de lados.
b) Las aristas de poliedros que antes de encoger eran la misma, definen un prisma recto de base triangular.
c) Los vértices de poliedros que antes de encoger eran el mismo, definen un tetraedro.

En la figura 5 puede apreciarse el resultado obtenido. Una vez establecida la geometría resulta necesario regularizar el contorno, de manera que quede definido por caras planas. Para ello se realiza un proceso de corte mediante superficies planas. Este procedimiento modifica la configuración de los poliedros más exteriores y cambia el número de vértices, aristas o caras. Si bien el procedimiento de corte proporciona una forma regular en los contornos, a su vez genera algunas irregularidades como son aristas extremadamente cortas, caras con ángulos muy

pequeños y huecos excesivamente planos, tal como puede apreciarse en la figura 6.

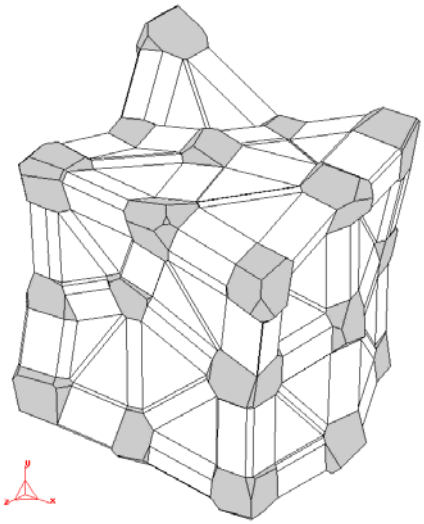


Fig.5. Relleno del espacio entre poliedros de Voronoï encogidos.

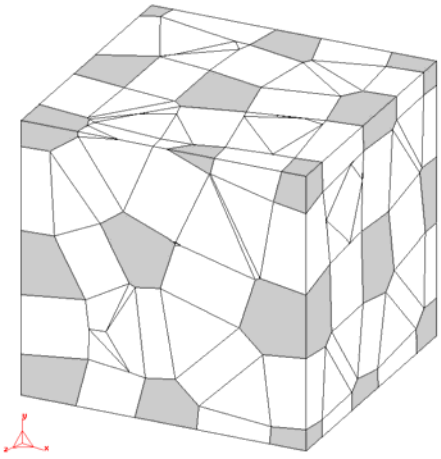


Fig.6. Geometría después del proceso de corte.

Estas anomalías geométricas se corregirán posteriormente junto a las producidas en el proceso de inclusión de superficies de fractura. Una vez establecidos los contornos planos, se procede a la inserción de las superficies de fractura. Como es conocido, en el hormigón convencional los planos de fractura se desarrollan preferentemente en los contactos árido-mortero (zona de menor resistencia del compuesto) y en el interior del mortero, siguiendo unas tendencias de fisuración más o menos directas que configuran un camino de mínima energía de fractura disipada. Para reflejar estas características se ha optado por incluir una serie de potenciales superficies de fractura dentro de toda la geometría, que se activarán o no durante un determinado proceso de carga en función del comportamiento de la ley constitutiva presentada en la sección 2. El generador desarrollado introduce dos familias de superficies de rotura. La primera de ellas, en todas las superficies de contacto que existen entre árido y mortero. La segunda familia de superficies de rotura queda definida por:

a) Los planos que se pueden formar a partir de las aristas paralelas existentes en las caras enfrentadas entre dos áridos distintos.
b) Los planos que se pueden formar a partir de las aristas de cada cara enfrentada con un vértice situado en el centro del espacio entre dos poliedros (véase la figura 7).

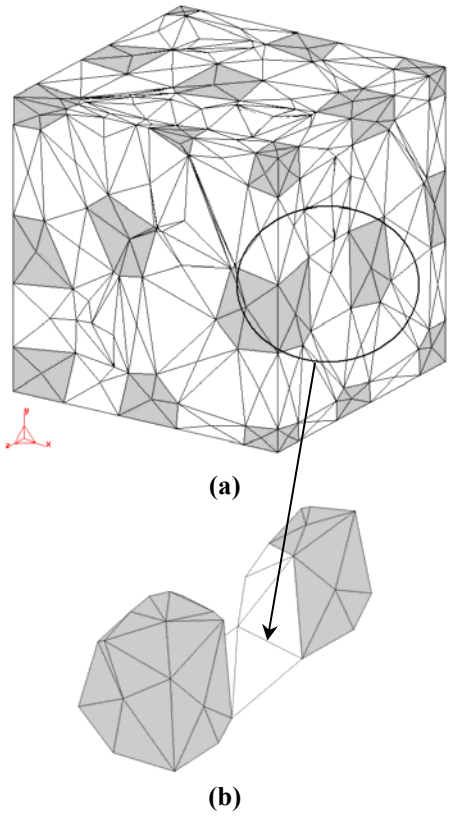


Fig.7. (a) Geometría después de la inclusión de las superficies de fractura, **(b)** detalle de la distribución de superficies de fractura en el espacio entre dos poliedros de Voronoï encogidos.

Durante los procesos de corte de contornos y la posterior inserción de superficies de fractura se modifica la geometría inicial, lo cual incide en el tamaño y la forma de algunas entidades geométricas. Como puede observarse en la figura 7a, aparecen aristas de tamaño muy reducido, superficies con ángulos extremadamente agudos y, aunque no se puede apreciar en la figura, también se generan volúmenes que tienden a ser aplanados. Estas anomalías, lógicamente, deben ser corregidas a fin de no condicionar una forma muy irregular de los elementos finitos de la discretización posterior [12]. Para ello se ha desarrollado un módulo de colapso de geometría. Durante este procedimiento de colapso es necesario cambiar de posición algunos puntos, lo cual en principio trae como consecuencia que ciertas caras tengan formas alabeadas que complicarían en extremo el posterior proceso de mallado. Para evitar esto se

dividen previamente todas las superficies en triángulos. Además, durante el proceso de colapso es posible que ciertos poliedros sufran una pérdida parcial de su volumen, lo que se denomina estrangulamiento de geometría. Para evitarlo se dividen todos los poliedros y todo el espacio entre poliedros en tetraedros.

Después de estos pasos previos se procede a colapsar la geometría. El proceso de colapso consta de tres subprocesos: colapso de línea, colapso de superficie y colapso de volumen. El colapso de línea, el más sencillo, siempre es destructivo y no genera entidades nuevas, lo cual lo hace un proceso más estable. Por su parte, los procesos de colapso de superficies y volúmenes requieren una adaptación de las entidades cercanas, basada principalmente en la subdivisión de líneas, superficies y volúmenes que están en contacto con la entidad a colapsar, y que posteriormente serán destruidas en su mayoría. Esto que puede parecer innecesario, se hace imprescindible a fin de tener un adecuado control sobre el proceso, de manera que se pueda seguir manteniendo una geometría basada únicamente en caras triangulares y volúmenes que sean tetraedros. En la figura 8 se puede apreciar la notable mejora de la geometría obtenida luego de aplicar el proceso de colapso a la geometría de la figura 7a.

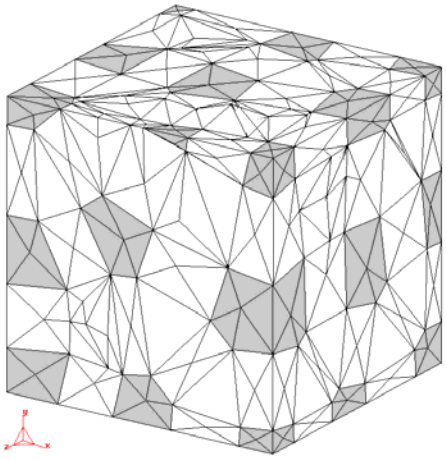


Fig.8. Geometría después del proceso de colapso.

Como se puede ver, se han resuelto los problemas en su gran mayoría. Lógicamente, el resultado final depende de la tolerancia permitida; en este caso se han eliminado todas las aristas con tamaños menores a un 20% de la longitud media, así como las caras y volúmenes que presentaban algún ángulo menor a 2º.

3.4 Generación de la malla de EF

Terminado el proceso de determinación y corrección de la geometría se procede a la generación de la malla. En este trabajo se ha desarrollado un mallador estructurado, lo cual presenta algunas ventajas y ciertas desventajas. Como ventajas se encuentra que permite obtener mallas de una manera más económica en cuanto a tiempo, además que, frente a otros métodos como puede ser el avance frontal, nos asegura siempre la convergencia del proceso. En su contra, el mallador estructurado no permite un control sobre el tamaño y la forma del elemento, ya que se basa en una partición de la geometría. Como se puede observar en la figura 9, los elementos son más pequeños allí donde la geometría tiene un tamaño más reducido.

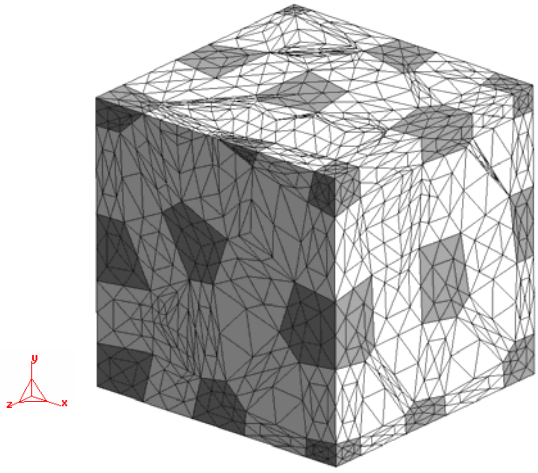


Fig.9. Malla de elementos finitos estructurada con 12878 nodos y 60552 elementos, sin elementos junta.

Una vez finalizada la malla de medio continuo, es necesario generar los elementos juntas que se disponen en las superficies de rotura. Este proceso consiste básicamente en una duplicación ordenada de los nodos que están ubicados en alguna de las superficies de rotura. De esta forma, los elementos de medio continuo que pertenecen a caras diferentes de una misma superficie de rotura no comparten los mismos nodos.
Este proceso, lógicamente, aumenta considerablemente el número de nodos mientras que permanece invariable el número de elementos de volumen. En el ejemplo que se presenta, el número de nodos se incrementa desde 12878 hasta 48229 luego de introducir los elementos junta, lo cual representa un aumento considerable. Finalmente, en las figuras 10 y 11 se muestran de manera diferenciada, la discretización correspondiente a los áridos y a la matriz de mortero, respectivamente.

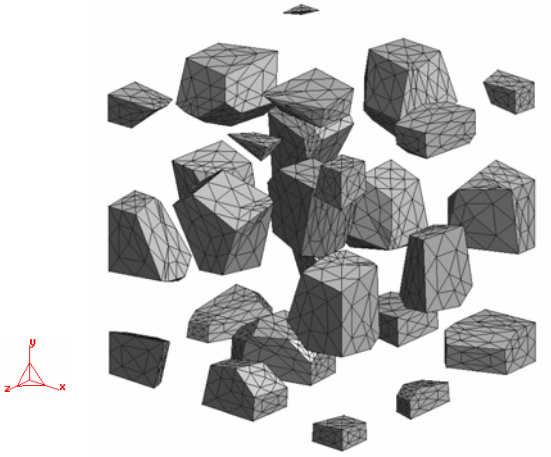


Fig.10. Malla de elementos finitos para los áridos en una probeta de 3x3x3 áridos (11772 elementos).

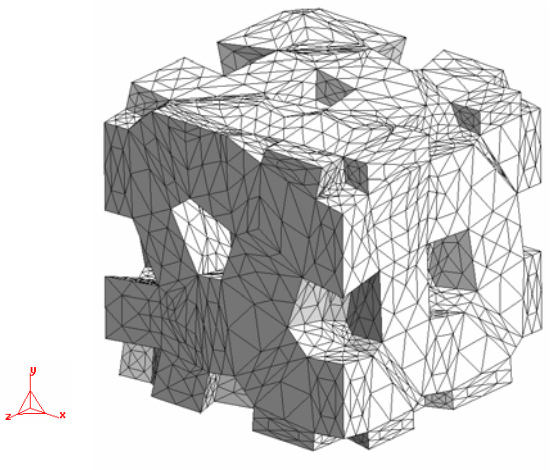


Fig.11. Malla de elementos finitos para la matriz en una probeta de 3x3x3 áridos (48780 elementos).

4. CONSIDERACIONES FINALES

En los últimos años se ha desarrollado e implementado en 2D, el análisis microestructural de los procesos de daño y fractura de probetas de hormigón con geometrías generadas mediante el procedimiento de Voronoï/Dalaunay y la utilización de elementos junta. Los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios, con esquemas de fisuración muy realistas bajo múltiples casos de carga instantánea y diferida. Sin embargo, estos resultados han estado limitados por su carácter bidimensional. El trabajo presentado en este artículo está orientado a extender el modelo 2D a tres dimensiones. En este contexto, la resolución del problema geométrico de la microestructura, la inserción de planos lo largo de los principales posibles mecanismos de fisuración, la discretización, y otras operaciones que en 2D resultaban relativamente sencillas, en 3D pasan a constituir un esfuerzo considerable, tanto en su concepción como en el desarrollo y la implementación. Como resultado de estos trabajos, se dispone ya de un módulo de generación de geometrías y mallas, incluidas las juntas, que funciona satisfactoriamente como se ha descrito en el artículo. Asimismo, la ley de juntas 2D ha sido generalizada a 3D. A partir de este punto, los esfuerzos se encaminan a reproducir los resultados de los diversos estados de carga sencillos ya resueltos en 2D como tracción o compresión uniaxial, etc. Una vez validado el modelo, se abre la puerta a estudiar otros casos no abordables con el modelo 2D, como son carga biaxial compresión-compresión, estados triaxiales, etc.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MCYT (Madrid) la ayuda recibida a través del proyecto de investigación MAT2000-1007. El primer autor quiere agradecer la beca FPU otorgada por el MECD (Madrid). El tercer autor agradece al MCYT la incorporación al sistema español de ciencia y tecnología mediante el "Programa Ramón y Cajal". Finalmente, se agradece a la ETSECCPB-UPC la bolsa de viaje concedida para asistir al XX Encuentro del Grupo Español de Fractura.

6. REFERENCIAS

[1] Hillerborg A., Modéer M. and Petersson, P.E., "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] López, C., Carol, I., Aguado, A., "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).

[3] López, C. M., "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).

[4] Carol, I., López C. M. y Roa, O., "Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements", Int. J. Numer. Meth. in Engrg. Vol 52, 193-215 (2001).

[5] Willam, K., Pramono, E., Sture, S. "Fundamental issues of smeared crack models". En S. Shah, and S. Swartz, (Eds.) Proc. SEM-RILEM Int. Conf. On Fracture of Concrete and Rock, SEM, Bethel, pp. 192-207 (1987).

[6] Nooru-Mohamed, M.B., "Mixed–Mode Fracture of Concrete: An experimental approach". PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, Holanda (1992).

[7] Carol, I. y Prat, P.C., "A statically constrained microplane for the smeared analysis of concrete cracking". En Bicanic and Mang, editors, Computer aided analysis and design of concrete structures, 919-930 (1990).

[8] Carol, I., Prat, P. C. y López, C. M., "A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis", J. of Engineering Mechanics, 123, No 8 (1997).

[9] Klein, Rolf "Concrete and abstract Voronoï diagrams", Berlin [etc.]: Springer-Verlag, cop. (1989).

[10] Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., "Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams", Chichester [etc.] : John Wiley & Sons (1992).

[11] Hernández, F., "Generación de mallas 3D a partir de diagramas de Voronoï", Tesina de especialidad, ETSECCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España (1998).

[12] Ribó, R., "Desarrollo de un sistema integrado para tratamiento de geometría, generación de malla y datos para análisis por el método de los elementos finitos", Tesis Doctoral. ETSECCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España (2000).