

4. Generación de mallas: trabajos realizados

Uno de los aspectos importantes en los que se ha invertido considerable esfuerzo ha sido en la puesta a punto y la inclusión de mejoras sustanciales en el programa de generación de las mallas de elementos finitos (EF) que luego se utilizan en las simulaciones meso-estructurales (MALLADOR2D). Una descripción detallada del proceso de generación de mallas ya fue realizada en el *capítulo 2*. En este apartado se comentan los principales aspectos en los que se ha trabajado y las mejoras que se han conseguido.

La obtención de las mallas consiste, como ya dijimos, en un procedimiento estocástico basado en la triangulación de *Delaunay* y la posterior poligonización de *Voronoi*, cuyos centros geométricos se distribuyen de manera aleatoria (obtenida mediante una perturbación *Monte Carlo* a partir de un arreglo regular de puntos). Cada uno de estos polígonos contendrá una pieza de árido generada mediante una contracción aleatoria del tamaño del polígono. La generación de mallas por este procedimiento comenzó, dentro del grupo de investigación, con los primeros trabajos de Carlos López (López, 1999). El programa para generar mallas en 2D fue impulsado con el trabajo de Olga Roa, quien utilizó el método para generar mallas de hueso trabecular (Roa, 2004), de características similares, sólo que en este caso los áridos son reemplazados por huecos.

En este trabajo se han abordado los siguientes aspectos del mallador 2D, para la obtención de probetas de hormigón a nivel mesoestructural:

(a) puesta en marcha del programa que inicialmente funcionaba para la generación de mallas de hueso trabecular (Roa, 2004);

(b) obtención de un mayor control sobre la geometría final (distribución, fracción volumétrica y forma de los áridos discretizados), y generación de información post-procesada de la misma (distribución de tamaños, tamaño promedio);

(c) incorporación de marco externo a los polígonos de *Voronoi*, posibilitando la obtención de mallas con bordes que no cortan áridos (ver capítulo 2), y de marco interno con elementos junta;

(d) automatización del proceso de refinamiento de mallas en los bordes (fundamental para el estudio del proceso de secado, mejorando la convergencia de los cálculos de difusión en las primeras edades);

(e) obtención sistemática de mallas con juntas distribuidas también dentro de los áridos, con el fin de simular por ejemplo hormigones de alta resistencia (donde típicamente las fisuras atraviesan los áridos), y obtención de mallas ‘gemelas’ sin juntas (a fines comparativos);

(f) incorporación de la opción de creación de múltiples entallas dentro del programa, con la consecuente importante extensión de la aplicabilidad del modelo a casos más complejos.

A continuación se realiza una somera descripción de los trabajos realizados en cada uno de estos puntos.

(a) Se ha concretado un reordenamiento integral del programa, en el que se han separado las opciones de generación que brinda (mallas de hueso, hormigón o rocksanding) al inicio del programa, y se ha puesto en funcionamiento para el caso particular de mallas de hormigón. Se han corregido diversos algoritmos (p.e. el algoritmo de eliminación de lados pequeños de polígonos consiguiendo así mejores topologías de los mismos antes de encoger) y se ha mejorado la interfase gráfica,

generando archivos gráficos (para el pre/pos procesador GiD) durante todos los pasos del proceso de generación, permitiendo una más rápida detección de anomalías y/o detalles propios del proceso aleatorio.

(b) Con el fin de simular ensayos experimentales realizados por el grupo de van Mier (Bisschop y van Mier, 2002), en los que se ha simulado el secado de piezas de un material cementíceo con inclusiones de vidrio esféricas de igual tamaño, se han introducido cambios importantes (fundamentalmente en la subrutina que realiza la contracción de los polígonos) que permiten tener más control sobre la distribución y forma de los áridos. De esta manera, es posible ahora generar mallas donde se controla simultáneamente el número total de áridos, el contenido de áridos medido como porcentaje en volumen (o área) del total de la muestra, y el tamaño máximo de los áridos, tanto utilizando áridos regulares como áridos redondeados (es decir, polígonos inscritos en una circunferencia).

Para esto se han introducido restricciones en los coeficientes de retracción de los polígonos de Voronoi según se trate del caso de áridos redondeados o no, o si se desea controlar el contenido en volumen de áridos o el tamaño máximo de los mismos. Cabe mencionar que la única manera de controlar el contenido de áridos y su tamaño máximo simultáneamente es por el método de prueba y error, ya que las restricciones que se introducen no pueden solaparse. Este procedimiento, si bien parece limitado, es un método efectivo que requiere muy pocas iteraciones, siendo hasta el momento la única solución que ha permitido obtener mallas con un tamaño máximo deseado y con un error de alrededor del 1% en el contenido de áridos deseado. En la figura 4.1 pueden apreciarse 4 posibilidades diferentes de geometrías para lograr una malla con 28% de áridos. Se han utilizado las opciones de redondeo de áridos, elección del tamaño máximo y elección de la fracción volumétrica de áridos. Puede observarse la variedad de posibilidades que brinda el generador de forma controlada.

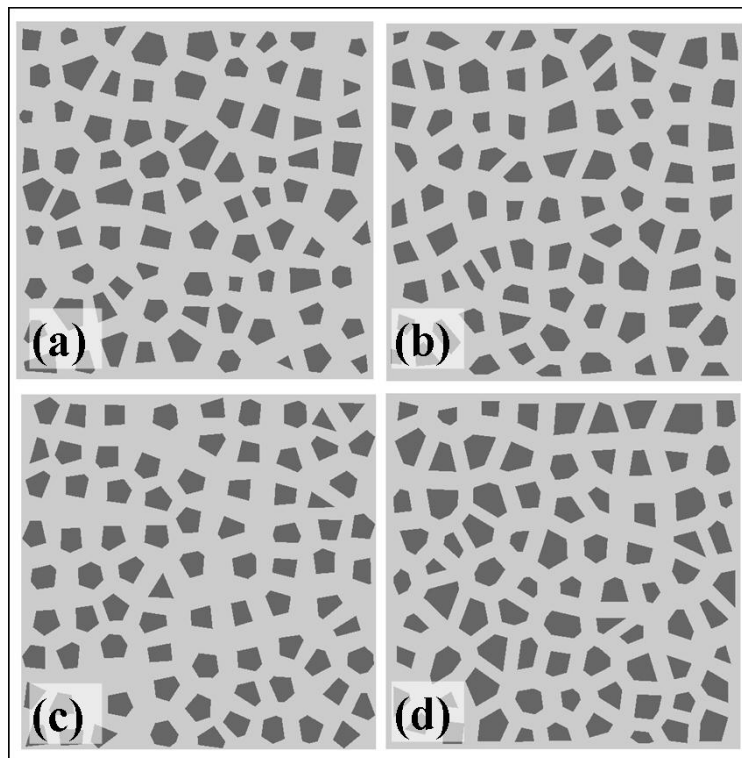


Figura 4.1. Geometrías con 28% de áridos (en relación al área total de la malla). (a) áridos redondeados (28,0%); (b) áridos no redondeados (28,0%); (c) áridos redondeados

con tamaño máximo de 12mm (27,53%); (d) áridos no redondeados con tamaño máximo de 20mm (28,9%).

Adicionalmente, se ha introducido una nueva prestación que consiste en la creación de un fichero con los datos de la geometría, como son el porcentaje final de áridos, la distribución de tamaños de áridos y datos básicos como el tamaño promedio o el mínimo y el máximo. Esto resulta de utilidad para caracterizar las mallas obtenidas y estimar mejor el rango de tamaños y la fracción de áridos que debemos representar en la malla. En la figura 4.2 se presentan, a modo de ejemplo, las curvas (junto con las respectivas geometrías), de la distribución de tamaños para dos mallas ($15 \times 15 \text{cm}^2$ y $45 \times 15 \text{cm}^2$) con 27,6% de áridos y tamaño máximo de 24mm, es decir manteniendo constante los parámetros en ambos casos. Puede apreciarse que las curvas obtenidas difieren poco, lo cual es una característica deseable, ya que lo que se busca con la aleatoriedad del proceso es una distribución espacial aleatoria y no una distribución de tamaños de diferente rango. Estas curvas se construyen a partir de los datos de la geometría obtenida.

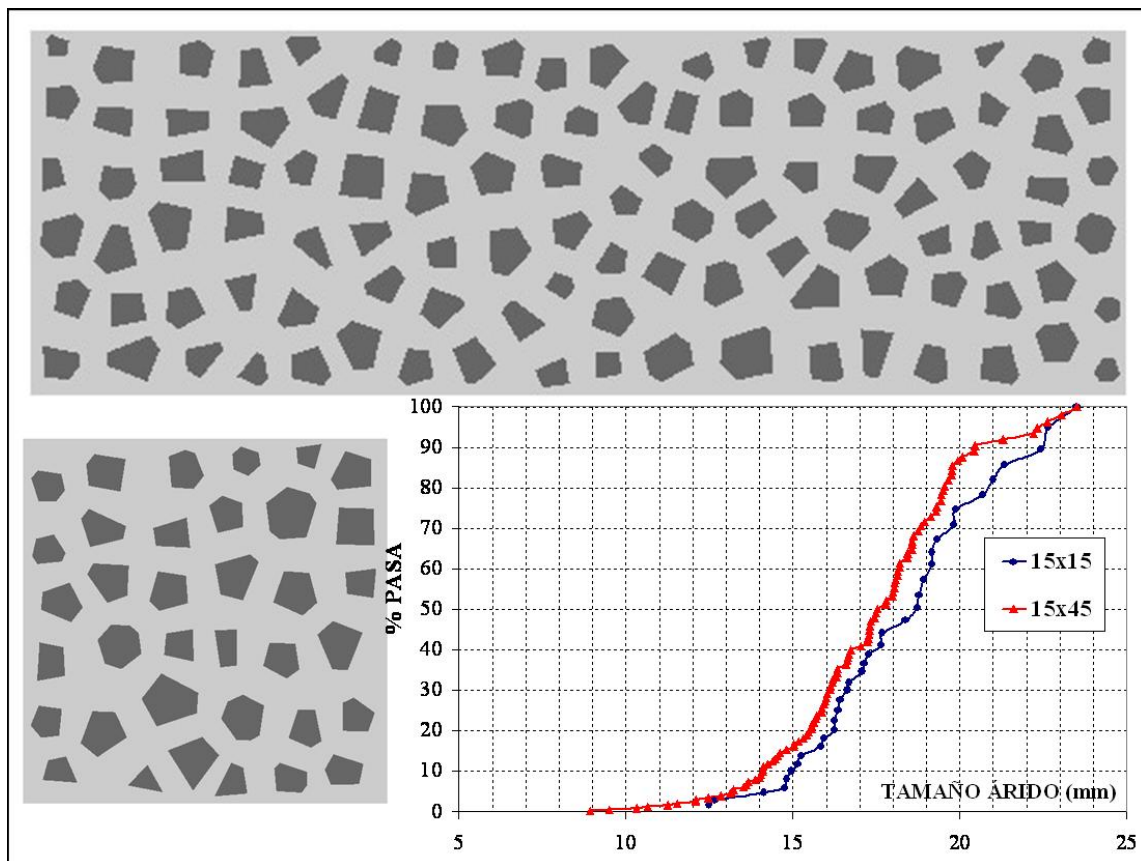


Figura 4.2. Geometrías con 27,6% de áridos ($45 \times 15 \text{cm}^2$ arriba y $15 \times 15 \text{cm}^2$ a la izquierda) y curvas de distribución de tamaños para ambos casos (los parámetros de entrada para el mallador se mantuvieron constantes en las dos mallas).

(c) Para simular el secado de probetas de hormigón, es importante que los bordes de las mallas utilizadas para tal fin posean un ‘recubrimiento’ de mortero y no que los áridos se corten como si fuera un testigo. Esta ‘piel’ (del inglés *skin*) de mortero puede tener propiedades difusivas diferentes al mortero y/u hormigón del núcleo de la probeta, debido a una generalmente mayor porosidad. El efecto que produce este recubrimiento suele denominarse efecto pared o *wall effect* (Kreijger, 1984), y ha sido considerado por

otros autores en simulaciones a nivel mesoestructural (de Schutter y Taerwe, 1993; Roelfstra *et al.*, 1985; Zheng, Li y Zhao, 2003).

Para considerar este recubrimiento de mortero en el mallador, se introdujo un nuevo tipo de macroelemento (tipo 3) en el proceso de generación, permitiendo la colocación de un marco externo a los polígonos de Voronoï, luego realizando una corrección de los mismos (ver capítulo 2 y figura 4.3). De esta manera se logra que el marco no corte a los áridos y se forme una capa de mortero cuyo espesor puede ser más o menos controlado. Con la introducción de este marco externo, aumenta la casuística del problema y resulta más complicado conseguir la geometría final que será discretizada con EF. En la figura 4.3 se comparan dos mallas con y sin recubrimiento. Para este caso, la geometría sin recubrimiento resulta de cortar como probeta testigo a la anterior.

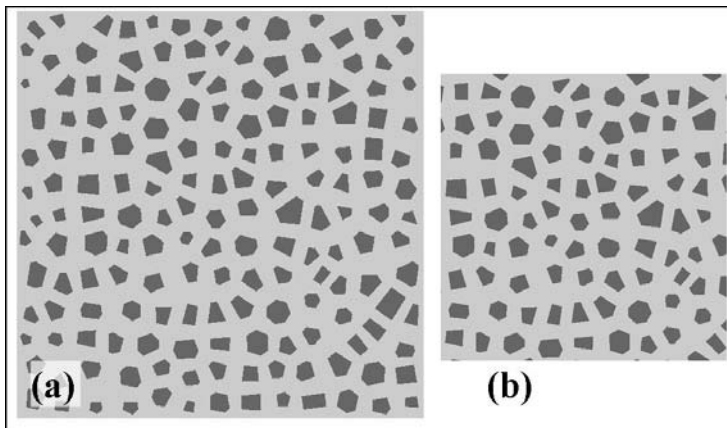


Figura 4.3. Malla de $22 \times 22 \text{cm}^2$ con recubrimiento de mortero (a), y la misma malla cortada como testigo de $16 \times 16 \text{cm}^2$ (b).

(d) También con la finalidad de simular el secado de probetas, se ha automatizado el refinamiento de las caras a las que se someterá a secado. En los lados a refinar, se utiliza tanto una discretización especial de los macroelementos de borde como la posterior adición, dentro del mismo programa, de rectas de refinamiento cuya cantidad y distancia entre sí son introducidas como dato de entrada (ver figura 4.4). Esto permite una sensible mejora en la convergencia del cálculo no lineal de difusión de humedad y en la calidad de los resultados, sobre todo en los primeros pasos de tiempo.

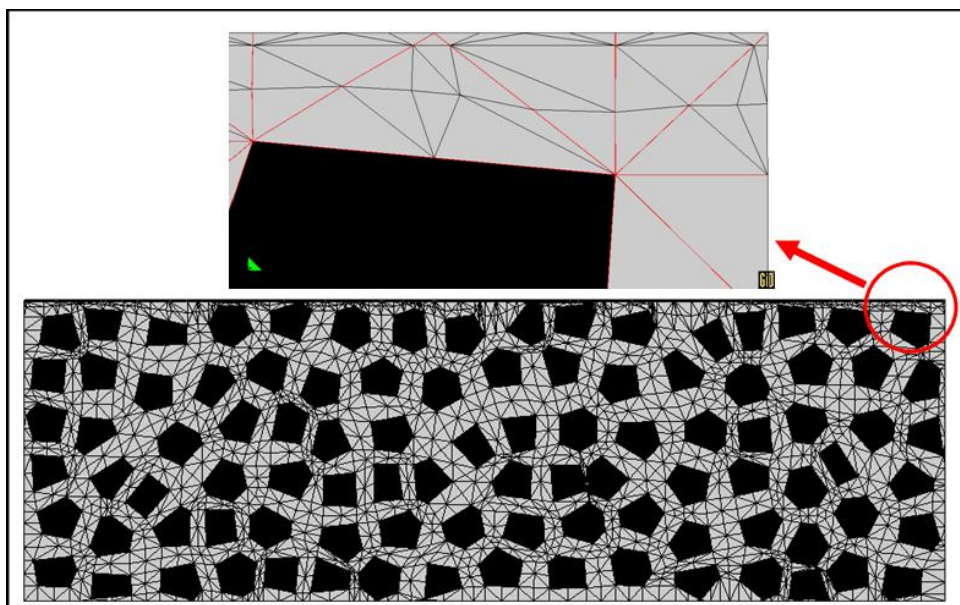


Figura 4.4. Detalle del refinamiento de malla con áridos redondeados (fracción volumétrica de 30%) y de igual tamaño, en el lado donde se someterá a secado.

(e) Si bien algunas simulaciones de hormigón de alta resistencia, que precisan de juntas dentro de los áridos para simular la fractura de los mismos, fueron realizadas dentro del grupo (López, 1999), quedaba pendiente automatizar el proceso. Se han considerado ahora todos los posibles tipos de áridos, con cualquier número de lados, y se ubican las juntas dentro de los áridos considerando como criterio que la fractura progresará por rectas que unen vértices de áridos (ver figura 2.9). Se pueden obtener mallas con una misma geometría y en las que sólo difiera el hecho de que una cuenta con juntas en áridos, interfases y matriz, otra con juntas en las interfases y en la matriz, y otra sin ningún elemento junta, con el fin de realizar comparaciones con la misma geometría.

(f) Por último, se incluyó en el programa la posibilidad de realizar múltiples entallas a las mallas generadas, con el fin de poder conseguir geometrías más complicadas, extendiendo de esta manera la aplicabilidad del modelo. Para esto se utilizó fundamentalmente el algoritmo ya existente de adición de líneas rectas en la malla final y el de corte de mallas como probeta testigo, eliminando los elementos que recaen en el área determinada por la entalla. En la figura 4.5 se aprecian 2 ejemplos de mallas obtenidas en las que se han realizado entallas o cortes de distinto tipo.

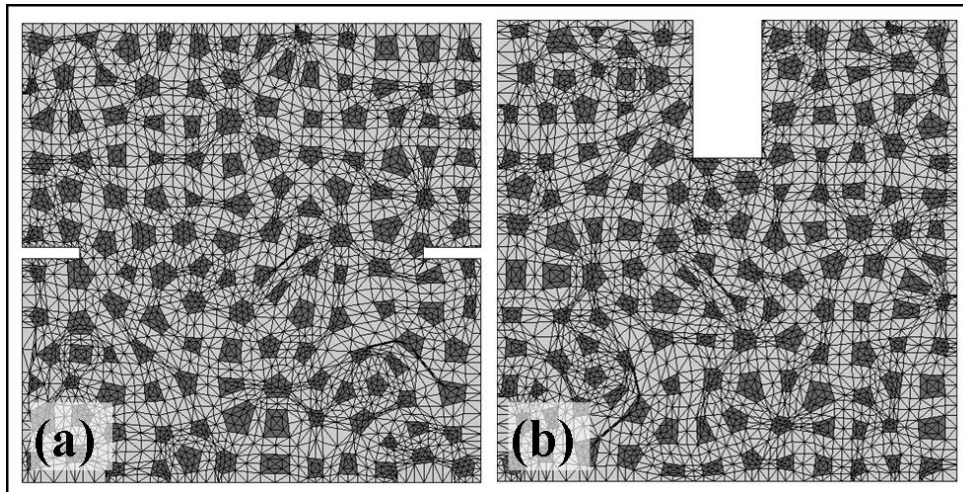


Figura 4.5. (a) Malla de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ con entallas de $25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ a izquierda y derecha, para ser utilizadas en la simulación de los ensayos de Nooru-Mohamed; (b) malla de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ con entalla superior de $60 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ (tipo *wedge-splitting test*).