

1. Introducción

1.1. Presentación

La presente tesina se ha realizado en el Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) bajo la dirección y tutoría de los Profesores **Ignacio Carol Vilarasau** y **Carlos María López Garello**. Estos estudios forman parte de un proyecto de investigación científica y desarrollo tecnológico más amplio, en el cual se pretende ampliar la aplicabilidad del modelo mesomecánico existente, al estudio de fenómenos más complejos debidos a la presencia de otras acciones simultáneas (gradientes de temperatura, contenido de agua en los poros, concentración de sustancias, tales como sulfatos) y las interacciones correspondientes que inducen acoplamientos termo-higro-mecánico-químicos (*THMC*). Hasta el momento, este modelo ha sido aplicado en el análisis de probetas de hormigón y hueso trabecular bajo acciones mecánicas cuasiestáticas, instantáneas o duraderas. En el presente trabajo se pretende profundizar los conocimientos y extender la aplicabilidad del modelo propuesto al estudio tanto del comportamiento mecánico como de fenómenos diferidos en el hormigón, específicamente del fenómeno de retracción por secado en el hormigón (*drying shrinkage*).

Este trabajo se enmarca dentro de la mecánica de materiales, más específicamente dentro de la modelación avanzada del comportamiento de materiales cuasi-frágiles. Se analiza el material a un nivel de observación microscópico de primer nivel (mesoescala), en el que el material no se trata como un continuo homogéneo, sino que se tiene en cuenta la naturaleza heterogénea propia del material. Estos modelos idealizados, que reflejan propiedades más intrínsecas del material (en este caso el hormigón), tienen como misión contribuir a entender el comportamiento macroscópico del material a partir de conceptos fundamentales que se cumplen en la meso-escala. Además, y con el fin de lograr un comportamiento más realista, se introduce en el análisis la teoría de la mecánica de fractura no lineal. La característica principal de la mecánica de fractura, que la distingue de la elasticidad, la plasticidad y la viscoplasticidad, es que la propagación de las fisuras es caracterizada no solo en función de las tensiones y deformaciones sino que también considera un criterio energético para tal fin.

En su libro “*Concrete, Estrutura, Propriedades e Materiais*”, Metha y Monteiro (1994), dos reconocidos investigadores brasileños que residen en EEUU, señalan:

“Hoy, la proporción de hormigón utilizado es muy diferente de lo que era 30 años atrás. Se estima que el actual consumo mundial de hormigón es del orden de 5500 millones de toneladas por año”.

A pesar de ser por lejos el material más utilizado mundialmente, y si bien se han hecho enormes avances en la tecnología del hormigón desde que Isaac Johnson fabricara el primer ‘prototipo’ de cemento como se lo entiende hoy, el estudio de este material es un tema que todavía interesa en el mundo científico. Los aspectos más sobresalientes son la química del hormigón (sobre todo en lo que respecta a la durabilidad de estructuras), los procesos diferidos, como la fluencia con secado, y la búsqueda de hormigones cada vez más resistentes, así como también el desarrollo de modelos computacionales cada vez más potentes y realistas, que puedan tener en cuenta los acoplamientos entre las acciones de diferente naturaleza (químicas, ambientales, mecánicas, etc.).

Uno de los aspectos más significativos actualmente de la durabilidad de estructuras de hormigón es el de la fluencia y la retracción por secado. Estos fenómenos tienen gran importancia, cuanto menos económica, en el diseño de estructuras de hormigón

modernas, como los puentes con grandes vanos, recipientes para reactores nucleares, cáscaras, estructuras *off-shore*, estructuras subterráneas, etc. Si bien la seguridad frente a una posible falla de la estructura no es afectada por estos fenómenos (con la excepción del pandeo por fluencia), sí lo son su durabilidad, su fiabilidad a largo plazo y su comportamiento en servicio (*serviceability*). A menudo la principal razón por la cual las estructuras no completan su vida útil proyectada es un diseño inadecuado en cuanto a fluencia y retracción por secado (Bazant, 1988). La causa directa del daño es típicamente la microfisuración, que puede derivar en fisuras mayores. El conocimiento de la humedad relativa interna de las estructuras es también de gran importancia, ya que muchos de los factores que afectan la durabilidad de una estructura necesitan condiciones de humedad relativa específicas para desarrollarse (reacción álcali-sílice, ciclos de congelación y deshielo, carbonatación, corrosión de armaduras, etc.) (Andrade *et al.*, 1999; Andrade *et al.*, 2002).

Por estos motivos, la fluencia, tanto básica como por secado, y la retracción por secado han sido el motor de innumerables trabajos de investigación y ha dado lugar a centenares de publicaciones. El auge científico tuvo lugar a principios de la década de 1980, cuando urgía comprender y acotar la incidencia de estos fenómenos en el diseño de reactores nucleares (*nuclear reactor vessels and containments*). La mayor parte de la financiación obtenida para estos estudios se dio hasta 1985. Hoy en día, podemos decir que el tema no está agotado y hay todavía varios grupos científicos de primer nivel mundial que siguen dándole gran importancia a estos temas, tanto es así que se ha creado y está actualmente en funcionamiento una nueva asociación internacional IA – CONCREEP, desde el año 2001, del cual este grupo forma parte activa.

Tradicionalmente, y en cuanto a modelación se refiere, los estudios en este campo se han realizado de un modo fenomenológico, en el cual el hormigón se considera como un material homogéneo. Un planteamiento más completo y potente puede conseguirse con modelos meso-estructurales, en los cuales la estructura interna del material se representa explícitamente. Este tipo de modelos ha proliferado en los últimos años de la mano del sustancial avance en la capacidad de cálculo. En este trabajo se pretende hacer un aporte en este campo mediante la simulación de estos fenómenos con un modelo desarrollado en el seno del grupo, en el cual se representan explícitamente los principales componentes del hormigón (áridos de mayor tamaño, una matriz que los rodea simulando al mortero y agregados de menor tamaño, y la interfase que existe entre árido y mortero), que es un material heterogéneo por naturaleza. Este tipo de modelos, que se encuadran dentro de los modelos idealizados que reflejan la naturaleza heterogénea del material, han sido desarrollados para ayudar a entender el comportamiento macroscópico del material a través del comportamiento de sus componentes individuales (esto es lo que se intenta conseguir en un análisis multi-escala).

1.2. Motivación y Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el de profundizar y realizar un aporte en el campo de los fenómenos diferidos tales como la retracción por secado en el hormigón, por medio de la modelación en 2D del material desde un punto de vista mesoestructural, considerando tanto los efectos mecánicos como los mecanismos de difusión del contenido de humedad en el seno del mismo. De esta manera, se intentará reproducir el complejo comportamiento macroscópico del hormigón en cuanto a curvas de tensión-deformación, deformación-tiempo, pérdida de peso-deformación, tendencias de fisuración, y otros fenómenos presentes en la meso-escala. El interés principal, inicialmente, es evaluar cualitativamente la influencia de las macro y microfisuras, que

se desarrollan en el hormigón como consecuencia de las cargas de origen mecánico o por gradientes de humedad relativa, en las propiedades mecánicas y difusivas del hormigón.

1.3. Metodología

Para realizar el análisis higo-mecánico (HM) de probetas de hormigón a un nivel de observación mesoscópico se utiliza un modelo desarrollado en el seno del grupo de investigación liderado por **Ignacio Carol**, en el que se representan explícitamente los diferentes componentes de la estructura interna del material. De esta manera, se generan mallas en las que se representan los áridos de mayor tamaño (aproximadamente el tercio mayor) rodeados de una matriz, representativa tanto del mortero como de los áridos de menor tamaño, y las interfases existentes entre los áridos y la matriz, que tiene un espesor despreciable. La creación de la geometría de las mallas utilizadas en las simulaciones está basada en el procedimiento aleatorio basado en la teoría de Voronoï/Delaunay. Luego, se discretiza esta geometría de forma estructurada con elementos continuos triangulares para posteriormente analizar la malla resultante por el MEF. También se insertan *a priori* elementos junta de espesor nulo entre elementos triangulares de árido y matriz (interfase árido-mortero) y dentro de la misma matriz en direcciones predeterminadas, con el fin de capturar las principales tendencias de fisuración potenciales. Al medio continuo (elementos triangulares de matriz y árido), se le asigna un comportamiento elástico o viscoelástico lineal, dependiendo del caso. La totalidad de la no linealidad del sistema se concentra en los elementos junta, cuya ley constitutiva no lineal está basada en la plasticidad y la mecánica de fractura, con reblandecimiento por trabajo disipado en procesos de fractura, formulada en términos de tensiones y desplazamientos relativos entre sus caras (Carol *et al.*, 1997).

Tanto el análisis mecánico como el análisis de difusión de humedad se realizan sobre la misma malla de elementos finitos. El acoplamiento entre los dos códigos, en principio independientes, se materializa, como se detallará más adelante, mediante un procedimiento *staggered*. La discretización del tiempo se realiza por el método de las diferencias finitas.

1.4. Organización del Contenido

En este apartado se describe brevemente el contenido de cada capítulo, y por tanto se establece a grandes rasgos la estrategia seguida dentro de la línea general de trabajo que hemos establecido.

En el *capítulo 1* se ha realizado una breve presentación del trabajo, así como también se han establecido los objetivos y motivaciones de esta tesina. Por último, se ha descrito la metodología seguida durante su realización.

En el *capítulo 2* se comentan los diferentes niveles de observación para el análisis del hormigón, haciendo especial énfasis en los modelos meso-estructurales existentes en la bibliografía. Luego se realiza una somera descripción de la generación de las mallas y de los modelos mecánicos y de difusión de humedad utilizados en este trabajo, y de las posibles estrategias de acoplamiento entre ambos.

En el *capítulo 3* se intenta sintetizar el estado del arte y dar una visión global sobre los problemas de la retracción por secado y la fluencia, tanto básica como por secado, en el hormigón, y se hace referencia al controvertido efecto *Pickett*. También se resumen algunos modelos propuestos en la bibliografía para la modelación de estos fenómenos.

En el *capítulo 4* se detallan los trabajos realizados en lo referente al programa de generación de mallas de elementos finitos a nivel meso-estructural utilizadas en los cálculos mecánicos y acoplados sobre probetas de hormigón.

El *capítulo 5* recopila los trabajos realizados y resultados obtenidos del análisis numérico puramente mecánico, es decir sin tener en cuenta aspectos relativos al acoplamiento de los efectos de difusión de humedad. Se incluye un estudio del efecto de la altura de las probetas de hormigón en la rama de reblandecimiento y aspectos de las leyes constitutivas de junta utilizadas.

En el *capítulo 6*, que representa el núcleo de esta tesina, se presentan los resultados obtenidos y los análisis realizados del problema acoplado y desacoplado de la retracción por secado del hormigón. Se incluyen análisis previos del efecto de una única fisura en el proceso de secado, la verificación del comportamiento acoplado, y el estudio de una y múltiples inclusiones en la fisuración de la matriz. Luego se presentan resultados de la simulación de ensayos experimentales y del efecto de los áridos en la fisuración por retracción. Por último, se presentan los resultados de un análisis preliminar del hormigón sometido a secado y a una carga de compresión uniaxial simultánea.

En el *capítulo 7* se exponen las conclusiones derivadas de esta tesina y se plantean brevemente las líneas posibles de investigación generadas como consecuencia de este trabajo.

El *capítulo 8* contiene las referencias bibliográficas utilizadas para la realización de todo lo concerniente a esta tesina, y finalmente, en el *capítulo 9*, se incluyen a modo de anexo, detalles de la ley de junta con envejecimiento.