

## Capítulo 8

# CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

### 8.1. CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En primer lugar se expone un resumen del trabajo realizado resaltando sus aspectos fundamentales y las principales conclusiones que se derivan del mismo.

Finalmente se presenta un resumen de los trabajos concretos a partir de los que se puede profundizar en las perspectivas abiertas.

### 8.2. RESUMEN Y CONCLUSIONES

#### Modelización del comportamiento estructural

Se ha desarrollado un modelo numérico del comportamiento en servicio de estructuras reticulares planas de hormigón (armado o pretensado), aplicable asimismo a estructuras mixtas y de acero, basado en una extensión de la formulación matricial para barras (Formulación Matricial Generalizada - FMG). El análisis en el tiempo se realiza mediante un método general paso a paso, introduciendo los incrementos de tensión en el instante medio de cada intervalo de cálculo.

Las leyes constitutivas empleadas para los materiales son lineales para el acero en tracción y compresión y para el hormigón en compresión. El efecto de *tension-stiffening* se tiene en cuenta mediante un modelo distribuido que consiste en una modificación de la ley constitutiva del hormigón en tracción, permitiendo una reducción progresiva de la rigidez a medida que aumenta el grado de fisuración, siendo posible de esta forma simular de manera sencilla los procesos de inversión de cargas. La relajación de los aceros activos sometidos a deformación variable se modeliza mediante el procedimiento de tensiones equivalentes.

El análisis seccional se realiza tomando como referencia una fibra cualquiera de la sección. Se ha prestado especial atención a la modelización conjunta de los efectos diferidos y del *tension stiffening*.

La ley constitutiva equivalente adoptada para el hormigón en tracción queda determinada mediante dos coeficientes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , multiplicativos de la resistencia a tracción  $f_{ct}$  y de la deformación correspondiente  $\varepsilon_{ct}$  (figura 3.1). Aunque dichos parámetros pueden ser calibrados ajustándolos mediante series de ensayos experimentales, en este trabajo se presenta una metodología para ajustarlos al modelo de comportamiento en flexión (simple o compuesta) propuesto en el Manual de Fisuración y Deformaciones del CEB. Se determinan las relaciones Momento-Curvatura según el modelo del CEB y a partir de la ley constitutiva considerada y por mínimos cuadrados se ajustan ambas curvas obteniéndose así los valores óptimos de los coeficientes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ . Se ha realizado un estudio paramétrico (hormigones entre 25 y 35 MPa) para analizar la influencia de diversas variables seccionales tanto en el comportamiento instantáneo como diferido. Asimismo se ha llevado a cabo un estudio particularizado para secciones rectangulares, que ha llevado a la obtención de una expresión simplificada para la determinación de los parámetros que definen el modelo.

El modelo de análisis estructural desarrollado incorpora como una parte del mismo el modelo de análisis seccional. El empleo de la FMG hace innecesaria la discretización de las barras en elementos de menor dimensión y el empleo de funciones de forma para aproximar la ley de desplazamientos. De esta forma se reducen los grados de libertad del problema y por tanto se obtienen sistemas con un número menor de ecuaciones. Como contrapartida, deben efectuarse integraciones a lo largo de las barras a partir de unas secciones de control (puntos de integración), para lo cual es necesario adoptar reglas numéricas adecuadas.

Se han incorporado los aspectos más relevantes del análisis de pórticos, como la introducción y supresión de coacciones en los nudos, las no linealidades geométricas (análisis en segundo orden) y las de contacto. En los aspectos concernientes al proceso constructivo se tiene en cuenta la construcción evolutiva (a nivel seccional y estructural), la incorporación de refuerzos, la historia de cargas, los procesos de cimbrado y descimbrado, la variación de las propiedades de los materiales con el tiempo o el empleo conjunto de distintos materiales.

La generalidad del modelo permite la inclusión del comportamiento diferido de los materiales según distintas formulaciones permitiendo una fácil actualización del mismo (por defecto se han adoptado las del MC-90), y la inclusión futura de leyes constitutivas no lineales.

Los modelos de análisis seccional y estructural se han implementado en los programas del cálculo SECSEY y ANSER, respectivamente, escritos en código FORTRAN y aptos para su uso en ordenadores personales.

### **Ensayos experimentales**

En el transcurso del presente trabajo se han construido, puesto en marcha, instalado y ajustado los equipos del laboratorio de estructuras de la Escola Politècnica

Superior de la Universitat de Girona (EPGS) para realizar ensayos sobre vigas. Ello permite líneas de investigación estructural que requirieran apoyo experimental.

Se ha ensayado una viga continua de dos vanos de hormigón armado sometida a cargas puntuales iguales en el centro de cada tramo. Se han realizado dos ensayos, el primero hasta condiciones de servicio y el segundo con carga hasta la rotura (pasando por la de servicio) sobre la viga reforzada con chapas metálicas pegadas con resinas. Las propiedades del hormigón se han caracterizado mediante probetas.

La instrumentación instalada y el equipamiento disponible han hecho posible la obtención de datos sobre la carga aplicada, las flechas en distintas secciones de la viga, las deformaciones unitarias en las armaduras longitudinales traccionadas, las deformaciones unitarias en el hormigón, las reacciones en los apoyos y las curvaturas a lo largo de la viga. En cada escalón de carga se ha procedido a la observación y señalización de la fisuración producida.

Se ha realizado un análisis detallado de los resultados obtenidos en los ensayos y se han contrastado los valores provenientes de la instrumentación electrónica con medidas de extensometría mecánica, lo cual ha permitido verificar la fiabilidad de los mismos. La disponibilidad de abundante información sobre distintas variables ha permitido la correcta interpretación de la evolución tenso-deformacional de los ensayos.

## **Aplicaciones**

Con objeto de mostrar las posibilidades del modelo se han desarrollado dos ejemplos de aplicación en los que se considera la construcción por etapas y la influencia del proceso constructivo.

El primer ejemplo ha consistido en el análisis numérico en el tiempo de un forjado constituido por una prelosa pretensada prefabricada y una capa superior de hormigón vertido en obra. Se ha tenido en cuenta el proceso constructivo, la aplicación de cargas a distintas edades, y la incorporación de las partes seccionales en el tiempo. Se han obtenido gráficas de la evolución temporal de las flechas y de las deformaciones y tensiones en el acero y en los hormigones. Se ha analizado la influencia de la presencia de dos materiales con propiedades distintas y de la retracción y la fluencia en la evolución de las curvaturas. Asimismo se ha mostrado la posibilidad de analizar con detalle el efecto global sobre la sección de la fluencia y retracción en cada una de las partes que la componen.

El ejemplo ha permitido mostrar la capacidad del modelo para analizar secciones construidas por fases en las que intervengan diversos materiales con propiedades reológicas distintas. Se ha demostrado la utilidad para analizar la influencia de varios factores en el comportamiento estructural y la posibilidad de realizar comparaciones y estudios paramétricos.

En el segundo ejemplo se ha analizado un pórtico de hormigón armado, en el que se ha considerado la historia de cargas aplicada, el proceso constructivo y las

operaciones de cimbrado y descimbrado. En el desarrollo del ejemplo se han realizado comparaciones con los resultados que se obtendrían de un cálculo lineal ordinario y de los esfuerzos que se producen como consecuencia de los procesos de cimbrado y descimbrado con los que se obtienen de métodos simplificados desarrollados por otros autores. Se ha confirmado la importancia que adquieren los esfuerzos en fase de construcción y se han observado diferencias con el método usado para la comparación, lo cual pone de manifiesto el interés de la profundización en este tipo de estudios.

El ejemplo ha mostrado la aptitud del modelo para el análisis de estructuras con un número relativamente elevado de nudos y barras, con procesos constructivos complejos y cuyos ritmos y características puedan ser variados. Se ha indicado la capacidad de realizar comparaciones con otros procedimientos y verificar el campo de aplicabilidad de algunas metodologías existentes. La utilización sistemática del modelo puede ser útil para el establecimiento de nuevos métodos simplificados o la mejora de los actuales.

## Conclusiones

En los siguientes puntos se exponen de manera resumida las principales conclusiones que pueden extraerse del trabajo realizado:

- El modelo de análisis seccional se ha mostrado adecuado para comportamiento en servicio y para secciones que combinen distintos materiales.
- El modelo estructural desarrollado, basado en la FMG, reproduce adecuadamente el comportamiento de elementos de hormigón teniendo en cuenta la fisuración. Los posibles errores debidos al método de integración numérica escogido se reducen con la inclusión del efecto de *tension stiffening*, que suaviza las discontinuidades de las curvaturas a lo largo de las barras.
- Los programas implementados se han mostrado capaces de analizar situaciones con incorporación o supresión paulatina de barras y elementos de refuerzo, historias diversas de cargas y descargas o procesos de cimbrado y descimbrado. Su utilización con un ordenador personal ha proporcionado unos tiempos de ejecución muy razonables, cubriéndose de manera correcta las necesidades de memoria, incluso para estructuras de un número relativamente elevado de barras y nudos.
- El estudio realizado ha puesto de manifiesto que el parámetro  $\alpha_1$ , multiplicativo de  $f_{ct}$  en la ley constitutiva adoptada para el hormigón en tracción, puede tomar un valor fijo de 0.40 para flexión simple. En el caso de flexión acompañada de compresión se ha establecido una expresión adimensional para  $\alpha_1$  (ecuación 4.11) que contempla la reducción del efecto de *tension stiffening* que ello ocasiona.
- Se ha propuesto una metodología general incorporable a un programa de cálculo para ajustar el parámetro  $\alpha_2$  una vez determinado  $\alpha_1$  (de manera independiente).

- En el estudio paramétrico realizado para analizar la influencia de las diversas variables seccionales en el valor de  $\alpha_2$  se ha comprobado que la influencia de la resistencia a la tracción del hormigón y de la cuantía de la armadura comprimida es escasa.
- Se ha contrastado el comportamiento diferido del modelo seccional desarrollado. Los coeficientes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  ajustados para comportamiento instantáneo proporcionan resultados satisfactorios para los efectos diferidos.
- El estudio de sensibilidad llevado a cabo pone de manifiesto que una vez fijado  $\alpha_1$ , se permite un cierto margen de variación de  $\alpha_2$  en torno del valor ajustado sin cometer grandes errores. Sin embargo la no consideración del *tension-stiffening* ( $\alpha_2 = 1$ ) conduce a desviaciones de consideración.
- Se ha efectuado un estudio específico para secciones rectangulares sometidas a flexión simple llegando al establecimiento de una expresión analítica para determinar el valor de  $\alpha_2$  en función de  $n\rho$  y  $d/h$  ( $n$  es el coeficiente de homogeneización,  $\rho$  es la cuantía mecánica de la armadura traccionada,  $d$  es el canto útil y  $h$  es el canto total -figura 4.6, ecuación 4.42-). La utilización de dicha expresión facilita en gran medida la aplicación del método a los casos más usuales de estructuras de edificación.
- El modelo ha reproducido de manera adecuada los resultados obtenidos por procedimientos analíticos, de otros modelos y los de ensayos de referencia (*Benchmarks*).
- Los resultados obtenidos con el modelo han presentado, en general, un alto grado de concordancia con los experimentos hasta carga de servicio realizados en el marco de la presente tesis. Como era de esperar un modelo con fisuración distribuida reproduce mejor aquellas variables en las que influye el comportamiento medio, como las flechas, frente a otros parámetros más dependientes del comportamiento local como son las deformaciones unitarias seccionales.

### 8.3. TRABAJOS FUTUROS

El trabajo realizado ha permitido identificar algunos temas que podrían ser una continuación y ampliación de la tarea llevada a cabo y que se exponen a continuación:

- Utilización sistemática del modelo para la realización de estudios paramétricos. Por ejemplo, en el caso de edificios, para determinar la influencia del proceso constructivo, de las tipologías de forjados y de las características de los materiales en la transmisión de cargas entre plantas. La instrumentación de estructuras de edificación y la realización de ensayos de laboratorio sería muy conveniente para contrastar los resultados obtenidos.

- Obtención de criterios de diseño para edificios de gran altura teniendo en cuenta la influencia de la construcción evolutiva.
- Estudio sistemático de secciones compuestas por elementos pretensados prefabricados y construidas por fases (por ejemplo, tipo prelosa) para su uso en edificación, con el objetivo de establecer criterios simplificados de diseño.
- La inclusión de la flexibilidad de los conectores en el modelo permitiría su aplicación más general a estructuras mixtas.