

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

La determinación de la situación tensodeformacional del hormigón estructural, sometido a las cargas de servicio, constituye un problema complejo en el que intervienen multitud de factores, entre los que cabe destacar el comportamiento conjunto de dos o más materiales con propiedades distintas, la adecuada modelización de la fisuración, la variación de propiedades resistentes con el tiempo y la influencia del comportamiento reológico de los materiales empleados.

La correcta evaluación de tensiones y deformaciones en la estructura sometida a las cargas de servicio es esencial para asegurar el cumplimiento de las condiciones que garanticen la funcionalidad y durabilidad de la misma. El estado tensodeformacional de las estructuras de hormigón varía de forma continua en el tiempo como consecuencia de fenómenos como la fluencia, la retracción y la relajación de los aceros activos. Asimismo la fisuración produce pérdidas de rigidez que afectan de manera considerable a las tensiones y deformaciones. Todo ello puede ocasionar redistribuciones de tensiones entre los materiales que constituyen las secciones y variaciones de esfuerzos cuando los elementos forman parte de estructuras hiperestáticas.

Los efectos de los fenómenos citados revisten especial importancia en el caso de estructuras construidas de forma evolutiva o por etapas. El estudio adecuado de las redistribuciones de esfuerzos o de tensiones puede llevar a valores finales significativamente distintos de los que se pueden obtener de un análisis simplificado sobre la configuración definitiva. La consideración de la influencia de la construcción evolutiva tiene especial relevancia en estructuras pretensadas de gran envergadura, las cuales suelen estar sujetas a una gran responsabilidad y complejidad constructiva. Sin embargo la mejora de las técnicas constructivas, la aplicación cada vez más general de los procesos de prefabricación y de las intervenciones en reparación conducen a situaciones en las que la consideración de este fenómeno es cada vez más importante. Así, en determinados casos, puede ser oportuno tener en cuenta la posible influencia del propio proceso constructivo en las cargas aplicadas sobre los miembros de la estructura, las operaciones de cimbrado y descimbrado o los cambios de características resistentes de la sección debidos a daños, corrosiones o refuerzos.

Debe incidirse, pues, en la importancia de la correcta modelización de los efectos mencionados anteriormente, tanto por su influencia en la seguridad durante la fase de construcción, como por su repercusión en el comportamiento estructural final.

En el ámbito del análisis en servicio de las estructuras de hormigón merece una especial mención el estudio de las deformaciones.

En los últimos años el progresivo incremento de la resistencia de los materiales empleados y la mejora de los procedimientos de cálculo frente a los estados límites últimos ha provocado una importante reducción de rigidez seccional, que acompañada del uso generalizado de estructuras basadas en el trabajo a flexión de sus elementos ha repercutido en un aumento importante de la deformabilidad. En estas condiciones, se ha producido un importante aumento de las patologías relacionadas con las deformaciones y un creciente interés en su estudio y control.

Los códigos de diseño elaborados por distintas instituciones recogen procedimientos de tipo simplificado habitualmente aptos para los casos más usuales, que suelen ir acompañados de limitaciones en los valores permitidos para las flechas totales o parciales. Sin embargo, el uso de métodos más generales puede ser necesario en el diseño cuando no se cumplan las condiciones que permiten el uso de tales procedimientos simplificados o para casos en los que se requiera más precisión.

De todo ello se deduce la importancia del desarrollo de modelos generales capaces de incluir la mayoría de los parámetros que influyen en el comportamiento de las estructuras de hormigón. Tales modelos serán de gran interés para los casos especiales mencionados anteriormente y para su uso en la investigación. En este sentido su utilización como herramientas para llevar a cabo estudios paramétricos o simulación de experimentos puede permitir el análisis de nuevas técnicas constructivas, la utilización de nuevos materiales o la combinación de ambos aspectos. Asimismo pueden ser útiles en la generación de bases de datos para calibrar nuevos métodos simplificados susceptibles de ser incluidos en los códigos de diseño.

1.2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS GENERALES

En el contexto de lo indicado en el apartado anterior, la presente tesis ha tenido por objeto el desarrollo de un modelo numérico para el análisis en servicio de estructuras de hormigón armado, pretensado o mixtas y su verificación experimental.

El modelo se ha basado en una extensión de la formulación matricial para el análisis de barras (Formulación Matricial Generalizada) aplicada a estructuras reticulares planas, contemplando los aspectos más relevantes del análisis de pórticos. Se ha contemplado la construcción evolutiva tanto a nivel seccional como estructural, la variación de las propiedades de los materiales con el tiempo y la aplicación de distintas historias de cargas. El análisis en el tiempo se ha realizado mediante un método general paso a paso.

Se ha prestado una especial atención a la modelización de la contribución del hormigón traccionado entre fisuras (*tension stiffening*). Para ello se ha adoptado una ley constitutiva modificada para el hormigón en tracción, efectuando un estudio para la determinación de los coeficientes que la definen, analizando su comportamiento instantáneo y diferido.

La generalidad de la propuesta permite la incorporación del comportamiento diferido de los materiales según distintas formulaciones y la inclusión futura de leyes constitutivas no lineales para aceros u hormigón en compresión.

El modelo desarrollado se ha implementado en sendos programas de cálculo (SECSER, ANSER) para secciones y para estructuras planas de barras, cuyo correcto funcionamiento se ha contrastado analítica y experimentalmente.

Para llegar al cumplimiento del objetivo propuesto ha sido necesario una revisión de la amplia bibliografía existente con la voluntad de efectuar aportaciones a la extensa investigación realizada que puedan ser de aplicación práctica en el campo del análisis no lineal y diferido de estructuras de hormigón. De esta manera se ha acotado el alcance del presente trabajo, planteándose los objetivos específicos que a continuación se exponen.

El primer lugar se ha pretendido desarrollar e implementar el algoritmo de análisis seccional no lineal, tomando como punto de partida modelos generales presentados previamente por otros investigadores e incorporando de manera específica la fisuración y el comportamiento diferido de los materiales. A continuación se ha planteado el análisis estructural incorporando el modelo seccional indicado e incluyendo las prestaciones de cálculo por etapas comentadas con anterioridad.

Otro objetivo específico ha sido el establecimiento de los parámetros que definen la ley constitutiva adoptada para tener en cuenta el efecto de *tension stiffening*. Se ha desarrollado una metodología general para su determinación y ajuste y se han propuesto ecuaciones simplificadas para el caso de secciones rectangulares.

Se pretendía que el modelo pudiera ser aplicado y contrastado. Lo primero ha podido ser puesto de manifiesto mediante ejemplos de utilización que permiten apreciar sus posibilidades. Lo segundo se ha llevado a cabo mediante su comparación con métodos analíticos y bases de datos experimentales.

Finalmente, y como objetivo no menos importante, se pretendía llevar a cabo una parte experimental propia, tanto para poner en marcha el laboratorio de estructuras de la Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona, como para disponer de datos adicionales que puedan ser útiles para la contrastación del trabajo realizado y para investigaciones futuras. En primer lugar se procedió a la instalación, montaje y puesta a punto de los equipos. A continuación se llevó a cabo la construcción e instrumentación del elemento a ensayar (viga continua de dos vanos). Por último se realizaron los ensayos en dos fases, consistiendo la primera en llegar hasta la carga de servicio y la segunda en reforzar la viga mediante chapas metálicas encoladas y llevarla hasta la rotura.

1.3. CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO

El planteamiento y explicación ordenada de los trabajos conducentes a la consecución de los objetivos propuestos se expone en el presente documento, el cual se ha estructurado en ocho capítulos y tres anejos. A continuación se describe de manera resumida su contenido.

En el Capítulo 2 se presenta una recopilación del estado del conocimiento, intentando realizar una síntesis de aquellos aspectos relacionados con modelos de análisis seccional y estructural, con especial incidencia en la situación de servicio, la consideración de los efectos diferidos y de la construcción evolutiva. Se incluye una revisión de diversas metodologías para tener en cuenta la contribución del hormigón traccionado entre fisuras. Se citan estudios y propuestas relacionados con el cálculo y control de las deformaciones y la influencia del proceso constructivo en la respuesta de la estructura. Asimismo, se incluyen diversos trabajos referentes a algunos campos en los que puede ser de aplicación un modelo como el presentado.

En el Capítulo 3 se exponen los aspectos principales del modelo de análisis desarrollado. En primer lugar se detalla la metodología empleada para el estudio del comportamiento de los materiales en el tiempo, el planteamiento de las ecuaciones seccionales y diversos aspectos relacionados con su implementación y resolución. A continuación se describe el algoritmo de análisis estructural, la incorporación de las ecuaciones seccionales siguiendo un esquema de Formulación Matricial Generalizada, y algunos detalles del procedimiento de resolución no lineal en el tiempo. En el capítulo se indican las diversas prestaciones incorporadas al programa de cálculo automático obtenido.

En el Capítulo 4 se detalla la metodología empleada para la consideración de la contribución del hormigón traccionado entre fisuras. Se señalan las características del modelo adoptado basado en la modificación de la ley constitutiva del hormigón en tracción y los parámetros que lo definen, así como diversos métodos que pueden ser tomados como referencia para el ajuste de la ley considerada. Se procede a un estudio paramétrico para secciones rectangulares y en T sometidas a flexión simple o acompañada de compresión y se determinan aquellas variables que tienen más incidencia sobre los parámetros que caracterizan el modelo considerado. Se plantea un algoritmo general para ajustar por mínimos cuadrados la ley de referencia y la adoptada y se analiza con detalle su respuesta para comportamiento instantáneo y diferido. Para secciones rectangulares, tomando en consideración algunas simplificaciones deducidas del estudio anterior se determina una expresión simplificada para hallar los parámetros de *tension stiffening*.

En el Capítulo 5 se procede a la contrastación del modelo presentado y de su correcta implementación en un programa de cálculo, utilizando resultados suficientemente acreditados procedentes de soluciones analíticas, de otros programas o de ensayos experimentales. En primer lugar se realiza la comprobación del comportamiento seccional usando distintos procedimientos de análisis instantáneo y

diferido, en secciones no fisuradas, totalmente fisuradas y con *tension stiffening*. A continuación se verifica la respuesta estructural a nivel de barra y se presentan ejemplos de la incidencia de los métodos de integración numérica empleados en la precisión de los resultados. Finalmente se contrastan los valores procedentes de la aplicación del modelo con los de una base de datos experimental (*Benchmark*) y con los obtenidos por otros procedimientos propuestos en diferentes manuales y códigos.

El Capítulo 6 se dedica a la exposición de los ensayos experimentales realizados en el marco de la presente tesis. Se describen las características de diseño del elemento a ensayar y se indican las condiciones mecánicas y geométricas del mismo. Se dan detalles del equipamiento utilizado en el laboratorio, de la construcción del elemento y de la instrumentación realizada. Sigue una explicación de la metodología utilizada durante los ensayos y una presentación comentada de los valores obtenidos para las distintas variables instrumentadas. Por último se lleva a cabo una simulación de los ensayos mediante el modelo numérico desarrollado y se comparan sus resultados con los experimentales.

En el Capítulo 7 se presentan ejemplos de aplicación del modelo con el objetivo básico de mostrar sus posibilidades. El primer ejemplo corresponde al análisis en el tiempo de un forjado constituido por una prelosa pretensada prefabricada y una capa superior de hormigón vertido en obra. En el segundo ejemplo se analiza un pórtico de hormigón armado, teniendo en cuenta la influencia del proceso constructivo, las operaciones de cimbrado y descimbrado y la construcción por etapas. Se pueden proporcionar resultados de la evolución del estado tensodeformacional en las secciones, de los esfuerzos o de los desplazamientos. Asimismo, la variación de distintos parámetros de entrada puede permitir la realización de estudios paramétricos y valorar la influencia de diversos factores.

En el Capítulo 8 se sintetizan las conclusiones del trabajo realizado y se indican diversas propuestas de cara a futuras investigaciones.

Finalmente, en los Anejos se incluyen las series de datos generados para el ajuste por regresión efectuado en el Capítulo 4, las expresiones adimensionales en sección rectangular deducidas para su elaboración y documentación fotográfica adicional de la fisuración de las vigas al final de cada uno de ellos.

