

Resumen y conclusiones

8.1. Introducción

En este capítulo se van a resumir los principales aspectos tratados en la tesina, así como los resultados que se han derivado de este trabajo. Esta síntesis abarcará por lo tanto:

- Revisión del estado del conocimiento.
- Modelo desarrollado.
- Análisis de secciones en servicio y en rotura.

Por último se proponen una serie de investigaciones y mejorar para el programa desarrollado así como sus principales aplicaciones y perspectivas futuras.

8.2. Revisión del estado del conocimiento

En la primera parte de la tesina se desarrolla una serie de cuestiones:

- Revisión del conocimiento sobre el comportamiento instantáneo y diferido de los materiales.
- Revisión, a modo de recordatorio, de los principales métodos de cálculo de tensiones debido a las redistribuciones por fluencia bajo el principio de superposición.

8.2.1. Comportamiento reológico de los materiales

El estudio del comportamiento de los materiales comienza con una síntesis de los fenómenos reológicos del hormigón. Debido a que las deformaciones por fluencia y

retracción tienen un origen común, la distinción entre ellas se realiza mediante un convenio ya que ambas expresan la existencia de un único fenómeno: la deformación total que desarrolla el hormigón con el tiempo. Además se ha pasado revista a los diferentes factores que influyen en su desarrollo (siendo la transferencia de humedad el principal).

En esta parte, se ha descrito también el comportamiento instantáneo y diferido de otros materiales estructurales, así como las bases de cálculo para el fenómeno de la relajación en los aceros activos.

8.2.2. Principales métodos de cálculo tensión – deformación bajo el principio de superposición

La revisión de los métodos de cálculo para la evaluación de los efectos seccionales de las deformaciones reológicas se ha realizado desde un punto de vista común a todos ellos, la resolución de la integral de Volterra. Se concluye que todos los métodos presentados son originales en sus planteamientos al ser diferente la manera en que evalúan el valor de dicha integral, siendo por lo tanto unos métodos más precisos que otros cuando se aplican al estudio de determinadas secciones. Véase, por ejemplo, el método de las j 's, debido a Julio Martínez Calzón y que parece ser más exacto en el análisis de secciones mixtas evolutivas que el propio *Método del Coeficiente de Envejecimiento Ajustado a la Edad* que se emplea en este trabajo.

8.3. Modelo desarrollado

Se ha desarrollado un modelo general para el análisis instantáneo y diferido de secciones compuestas por cualquier tipo de material y cuya construcción pueda ser por fases. Dicho modelo plantea un tratamiento no lineal de la sección para cualquier momento de la vida de la misma. Las principales consideraciones a tenidas en cuenta en dicho modelo son:

- Modelo reológico no lineal de cálculo del hormigón considerando el fenómeno de fisuración del mismo. Este modelo se halla basado en las ideas del coeficiente de envejecimiento, realizando la evaluación de la historia de tensiones por incrementos tensionales.
- Fórmula para el cálculo simplificado del coeficiente de envejecimiento. Dicha expresión proporciona una precisión más que suficiente para los cálculos que deben realizarse siendo su evaluación inmediata:

$$\chi(t, t_0) = 0,90 + \left(\frac{\sqrt{t_0}}{1 + \sqrt{t_0}} - 0,90 \right) \frac{t - t_0}{t} \quad (8.1)$$

- Validez del modelo para hormigones de hasta 100 MPa, teniendo en cuenta las propuestas recogidas en [18] para la retracción, la fluencia y el comportamiento instantáneo de éstos.
- Tratamiento integral de chapas de acero estructural considerando los algunos de los fenómenos que en ellas puedan tener lugar: abolladura, plastificaciones y acero sin tracción.
- Obtención de las variables constitutivas de la sección en agotamiento atendiendo a un criterio de control de deformaciones. Para ello, se han consultado diversas fuentes, entre ellas códigos de aplicación nacional, con el fin de acotar la máxima deformación permitida de los materiales en rotura. Finalmente, para unificar criterios, se han adoptado los recogidos en la RPX-95.
- Empleo de las ecuaciones necesarias para el cálculo del cortante de agotamiento de la sección y sus componentes. Este no es un análisis independiente, pues existen interacciones, entre ellas el valor de la fuerza de pretensado en el instante de cálculo y los materiales que constituyen la sección en cada fase.
- En el cálculo del ancho de fisura se considera el valor total, tras redistribuciones y fenómenos reológicos de los materiales, de la deformación de la fibra baricéntrica de acero pasivo, si procede. Se ha visto, que en el modelo presentado en la EHE, dicho cálculo es inconsistente si se quiere emplear en un análisis seccional evolutivo; pues este solo considera una deformación de naturaleza instantánea. Por ello se ha hecho esta modificación, conservando el resto de la formulación y el valor de los parámetros que intervienen en ella.

8.4. Análisis de secciones en servicio y en rotura

Las consideraciones antes presentadas se han implementado en *AESS* (Análisis Evolutivo de Secciones Simétricas) mediante el cual se han podido realizar una serie de análisis. De ellos se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- Las deformaciones reológicas del acero y hormigón modifican la curvatura y la deformación de la sección en servicio. El efecto de las deformaciones sobre el momento último de la sección, no obstante, puede despreciarse siempre que se garantice la ductilidad de la misma.
- Las secciones compuestas construidas de manera no apeada presentan curvaturas superiores a las secciones no apeadas. Su momento último apenas varía siempre y cuando la sección preexistente no haya sido presolicitada en exceso durante la construcción (plastificaciones y roturas frágiles).

- Se ha visto que el método que proponen los códigos e instrucciones vigentes para la evaluación de la respuesta seccional en rotura no es sensible al efecto de la construcción por fases. No ocurre lo mismo en el análisis no lineal con diagramas Momento – Curvatura con el que se pueden captar fenómenos como aumento de ductilidad debido al no apeo o fallo prematuro de la sección parcial de acero por presolicitación excesiva.
- Las uniones de vigas mixtas a pilares realizadas con liberación de tracciones en el acero estructural resultan de una ductilidad muy superior al caso en que se recojan dichas tracciones. Este detalle es por lo tanto preferible al ser más sencillo de ejecutar y presentar un mejor comportamiento.
- Las secciones en doble acción mixta empleadas en las zonas de momentos negativos muestran un comportamiento superior al de secciones en simple acción mixta, transformando además el comportamiento de la sección, frágil en simple acción mixta, a un comportamiento con elevada ductilidad.

8.5. Aplicaciones para el programa

Con el modelo de análisis seccional desarrollado se pretende cubrir unos campos que, en la mayoría de los casos, se abordan de forma aproximada mediante el uso de formulaciones recogidas en forma de códigos y recomendaciones. Esta tarea acaba, en la mayoría de los casos en los que se trata con secciones complicadas, en un desaprovechamiento de los materiales y, consecuentemente, en unos costes innecesarios fruto de la falta de medios para su cálculo o simplemente, el desconocimiento de los fenómenos reales que se dan.

Alguna de las aplicaciones posibles que se le puede dar a *AESS* y, de este modo, tratar de cubrir el vacío existente son:

- Cálculo de las pérdidas de pretensado detalladamente en piezas pretensadas en taller, en una o dos fases, y/o postesadas en obra sea cual sea el tipo e historia evolutiva de la sección.
- Conocimiento del estado tenso – deformacional de los materiales en cada etapa de la vida de una sección, considerando los fenómenos más importantes que se dan en la misma (retracción, fluencia, envejecimiento del hormigón....).
- Análisis en rotura utilizando la sección que realmente existe, sin tener que hacer simplificaciones del lado de la seguridad, para conocer su capacidad última usando los modelos constitutivos y técnicas de cálculo adecuadas para cada tipo de sección.
- Verificación de la microfisuración por compresión y fisuración por tracción con las formulaciones adecuadas, en cualquier etapa y con las formulaciones apropiadas.

Todo ello con una interfaz gráfica y de entrada de datos fácil y rápida de utilizar. Así, se quiere evitar que los posibles usuarios eludan esta herramienta de cálculo y acaben optando por métodos manuales u otros programas más amigables pero que no cubren muchas de las necesidades que aquí se abordan.

8.6. Perspectivas para el programa

Con todas estas consideraciones, las perspectivas futuras para *AESS* son:

- Diseño cualquier tipo de sección de forma óptima aprovechando toda la capacidad de los materiales, conociendo mejor las pérdidas de pretensado y la sección resistente en cada momento. Con ello, se pretende provocar un ahorro en materiales y todo lo que ello comporta.
- Una herramienta de análisis de secciones para poderlas catalogar en forma de plantillas de autorización, como hacen las empresas de prefabricados para optimizar la producción y la expedición rápida de ofertas al mercado.
- Un programa de análisis paramétricos de secciones con fines docentes y/o de investigación que se pueden llevar a cabo en facultades o en los mismos departamentos de I+D de las empresas.

8.7. Propuestas de mejora

Uno de los objetivos de este trabajo ha sido implementar una serie de consideraciones con la finalidad de poder analizar un conjunto amplio de secciones con una precisión razonable, no obstante, hay muchos aspectos en los que se puede mejorar, algunos de ellos se citan a continuación:

- Implementación de un método de cálculo más general paso a paso para el análisis evolutivo de secciones.
- Adopción e implementación del método del coeficiente de las j 's ya que para algunas secciones mixtas éste parece ser más exacto que el método del coeficiente de envejecimiento.
- Revisión y adopción de un modelo de fluencia para altas tensiones en compresión y tracción del hormigón. El actualmente implementado es válido para hormigones de hasta 100 MPa y rangos de tensiones no superiores a $0,45f_{cm}$.
- Proponer nuevos modelos de retracción que tengan en cuenta los efectos diferenciales dentro de la misma sección.

- Modificar la ecuación constitutiva del acero estructural para tener en cuenta el efecto de las tensiones residuales.
- Modificar la ecuación constitutiva del acero pasivo para integral el efecto de la adherencia hormigón – acero una vez se da la fisuración.
- Revisar el algoritmo de cero de funciones que se utiliza para hallar el estado tenso – deformacional de la sección bajo una combinación de esfuerzos. El fin es acelerar la convergencia y poder plantearse un método paso a paso para el análisis evolutivo, el cual requiere de una mayor velocidad y eficiencia de dicho algoritmo.
- Consideración de los efectos de la temperatura sobre la respuesta tenso – deformacional de los materiales en el análisis diferido.
- Modificar el modelo implementado para el análisis en agotamiento frente a cortante para extenderlo a piezas con sección parcial metálica.