

## Modelo para el análisis de secciones

### 3.1. Introducción

En este capítulo se exponen las bases de cálculo que se han implementado en el programa para reproducir el comportamiento instantáneo y diferido de una sección sometida a una historia de cargas en el tiempo y compuesta por uno o varios materiales estructurales tipo hormigón, acero pasivo, acero estructural y acero activo. Las mismas pueden clasificarse así:

1. *Secciones simples*. Este conjunto engloba todas aquellas secciones que están compuestas por un solo hormigón, de cualquier resistencia, y reforzadas con armado pasivo y/o activo. Pilares, viguetas pretensadas, placas alveolares...entrarían a formar parte de este conjunto.
2. *Secciones metálicas*. Entiéndase por secciones metálicas aquellas cuyo único material utilizado es el acero estructural, ya sea en forma de perfil laminado en caliente (HEB, IPE...) o perfiles soldados.
3. *Secciones compuestas*. Es la extensión del subconjunto formado por todas las secciones simples a un conjunto de piezas que han sido confeccionadas por más de una sección parcial de hormigón. Véase por ejemplo losas alveolares pretensadas con losa de hormigón “in situ”, vigas artesas pretensadas y postesadas completadas en obra con una losa superior....
4. *Secciones mixtas*. Análogamente a las secciones compuestas, las secciones mixtas consisten en una sección parcial metálica y una o más secciones parciales de hormigón. El conjunto o cada sección parcial de hormigón puede haber sido presolicitada en taller mediante un pretensado u otro sistema.

El modelo considera la evolución de la sección en el tiempo (construcción por fases) y las redistribuciones provocadas por las deformaciones atensionales diferidas (fluencia, retracción y relajación) de los materiales.

Luego, el abanico de secciones y casuísticas que se pueden analizar es amplísimo, dando una capacidad de cálculo y de estudios paramétricos importantes al programa.

## 3.2. Hormigón

### 3.2.1. Comportamiento instantáneo

El hormigón presenta un comportamiento complejo tanto instantáneo como diferido. Para caracterizar su respuesta a tiempo cero, se ha optado por emplear en compresión un diagrama tipo Thorenfeldt, Tomaszewicz y Jensen<sup>1</sup>:

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{n \left( \frac{\varepsilon_{cf}}{\varepsilon_c} \right)}{n-1 + \left( \frac{\varepsilon_{cf}}{\varepsilon_c} \right)^{nk}} \quad (3.1)$$

Donde el parámetro  $n = 0.8 + \frac{f_{cm} (MPa)}{17}$ ; siendo además  $\varepsilon'_c = \frac{f_{cm}}{E_{cm}} \cdot \frac{n}{n-1}$  y

$$k = 0.67 + \frac{f_{cm}}{62} \geq 1.0.$$

El uso de este diagrama se ve justificado por el hecho de que el mismo reproduce de forma fiel el comportamiento en compresión de hormigones no confinados<sup>2</sup> con  $f_{ck}$  comprendidas entre los 25-100 MPa.

En tracción se acepta una ley lineal hasta la tensión fisuración  $f_{ctm}$  de la fibra, luego, para la misma deformación de fisuración  $\varepsilon_{cr}$  la tensión se reduce al 50% y progresa decreciendo linealmente hasta una deformación de  $4\varepsilon_{cr}$ .

En las figuras 3.1 y 3.2 se presentan dos leyes constitutivas para hormigones de 40 MPa y 90 Mpa respectivamente de resistencia característica con el fin de ilustrar que el modelo representa correctamente la rama de descarga una vez se ha superado la tensión máxima. La rama es mucho más abrupta para el hormigón de 90 MPa, una explicación más detallada de este fenómeno puede encontrarse por ejemplo en [13].

Esta ley constitutiva de hormigón presenta también unos excelentes resultados en rotura si se compara con los diagramas clásicos (parábola-rectángulo, bloque uniforme,...) existiendo unas diferencias completamente asumibles con los anteriores<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Esta es la ecuación utilizada para la confección del diagrama Momento-Curvatura. No obstante, para hacer el análisis evolutivo puede elegirse también una ecuación constitutiva lineal o la que propone el borrador del EC-2 para hormigones de alta resistencia.

<sup>2</sup> Monografía M-8 *Recomendaciones para el proyecto de estructuras de hormigón de alta resistencia*. Apartado 2.1.2.

<sup>3</sup> Las diferencias en rotura entre los distintos modelos no llegan al 5% en momento y al 10% en axiles. Sin embargo, estos modelos no proporcionan un valor realista del módulo de rigidez tangente por lo que no pueden emplearse en servicio.

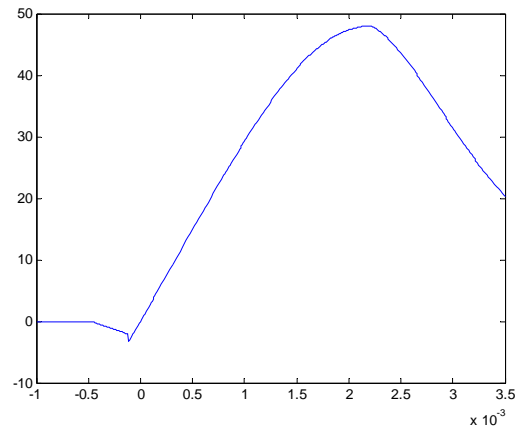


Figura 3.1. Relación  $\sigma$ - $\varepsilon$  para hormigón de 40 MPa

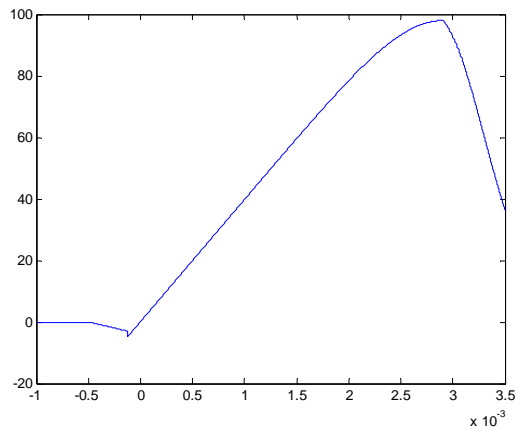


Figura 3.2. Relación  $\sigma$ - $\varepsilon$  para hormigón de 90 MPa

### 3.2.2. Comportamiento diferido

Una vez caracterizado el comportamiento instantáneo de una fibra de hormigón mediante su diagrama  $\sigma_c$ - $\varepsilon_c$ , debe analizarse la respuesta diferida del mismo. El modelo utilizado en esta tesina coincide con el presentado en [8], donde se considera que la fibra, al estar dentro de la sección sufrirá una serie de redistribuciones en el tiempo que ocasionarán que su deformación aumente y, al perder rigidez comparativamente con el resto de materiales de la sección, se descargue. Véase figura 3.3.

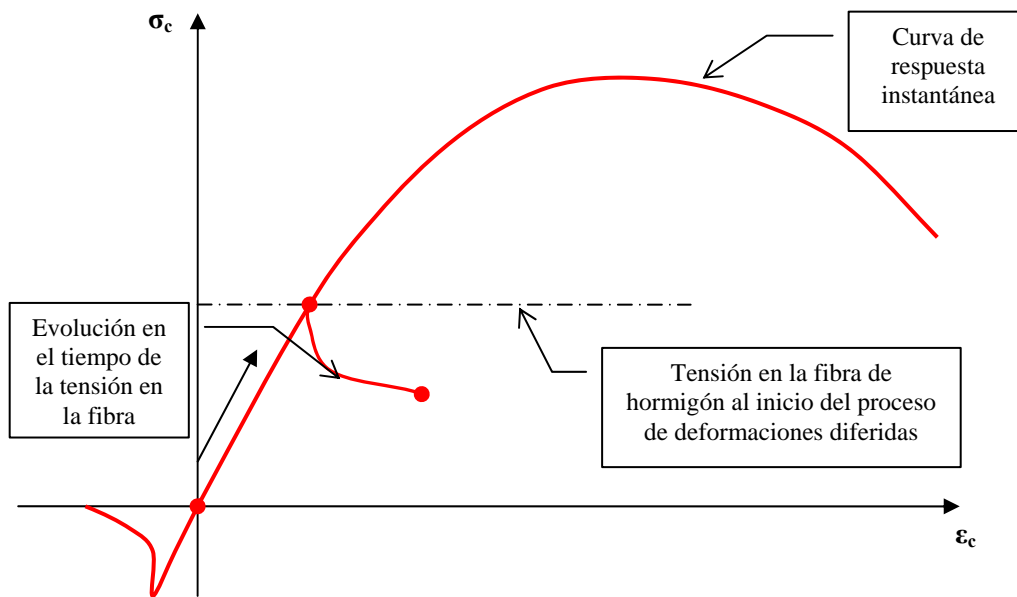


Figura 3.3. Evolución de la tensión en el tiempo

Una vez alcanzado el nuevo punto de equilibrio en la fibra, si se procede a una recarga (figura 3.4), el comportamiento se asume elástico (con el módulo de deformación que se tenga en ese momento) hasta alcanzar el nivel máximo anterior; continuándose entonces la carga por la rama instantánea que ese momento presente el hormigón.

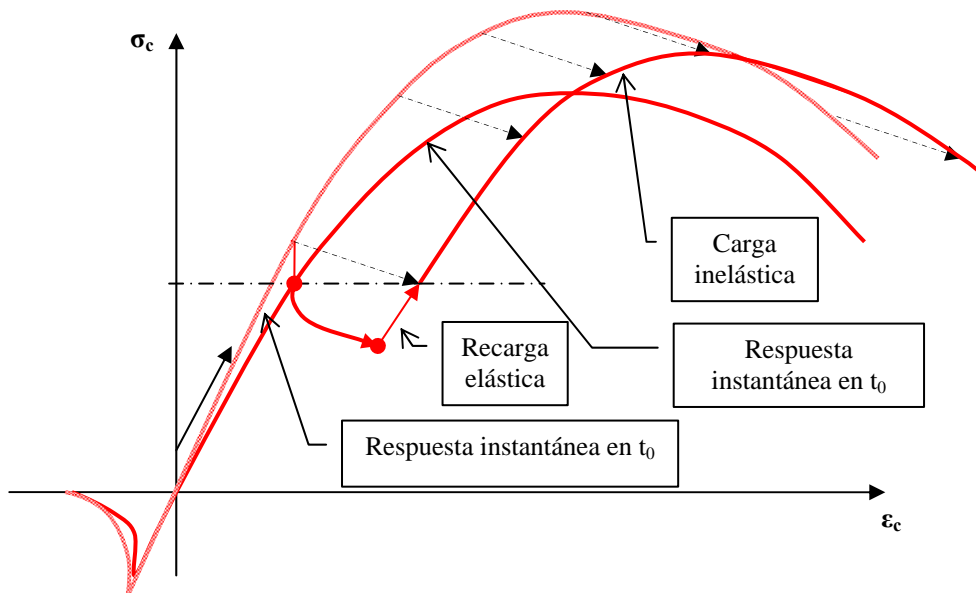


Figura 3.4. Proceso de descarga y recarga

Esta evolución de la carga-recarga de la fibra de hormigón en el tiempo puede aplicarse con toda generalidad (y tantas veces como se desee) a la fibra. Este modelo, en

el caso de que no existieran redistribuciones tensionales de ningún tipo, coincidiría con la ley de rotura a tiempo infinito empleada habitualmente y que consiste en suponer una curva tensión - deformación a tiempo  $t$  proporcional a la instantánea según el coeficiente de fluencia.

Otra propiedad importante de este modelo de comportamiento de la fibra de hormigón es que si se ha producido un proceso de carga en una edad temprana del hormigón,  $t_0$ , cuando posteriormente se produzca la recarga en  $t$  (tras un proceso de deformaciones diferidas) la tensión máxima que es capaz de proporcionar la fibra es inferior a la que se tendría si dicha fibra se pusiera en carga exclusivamente a tiempo  $t$  (aunque sea superior a la esperable si se pusiera en carga solo en  $t_0$ ). La explicación de este fenómeno reside en que se ha agotado parte de la capacidad resistente en el primer proceso de carga.

El cálculo de las redistribuciones en el tiempo (la integración de la ecuación de Volterra) puede efectuarse según distintos métodos. El más directo, una integración paso a paso en el tiempo, es posiblemente el más general pero exige un esfuerzo considerable de cálculo, y, como se comentó en el capítulo 2, sólo está justificado en casos especiales. Por ello, para este trabajo se ha considerado oportuno utilizar el *Método del Coeficiente de Envejecimiento* una explicación detallada de este se halla en el apéndice A de este mismo informe.

### 3.2.3. Método del Coeficiente $\chi$ a nivel de fibra

La aplicación de este método a la curva de comportamiento del hormigón puede representarse mediante tres etapas distintas. Se parte de una situación inicial de equilibrio y se halla otro estado final de equilibrio diferido aplicando las relaciones clásicas de equilibrio de tensiones y planeidad de deformaciones tal como sigue:

1. La primera fase corresponde a dejar deformar libremente la fibra de hormigón según:

$$\Delta \varepsilon_c^*(t, t_s) = \varepsilon_c(t_0) \rho(t, t_0) + \varepsilon_{cs}(t, t_s) \quad (3.2)$$

- $\varepsilon_c(t_0)$ : Es la deformación mecánica en la fibra de estudio.
- $\rho(t, t_0)$ : La fluencia correspondiente a la deformación  $\varepsilon_c(t_0)$ .
- $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ : Retracción total desde  $t_s$  hasta el instante actual de evaluación  $t$ .

2. La segunda, representa el bloqueo del incremento de deformación anterior cuando la fibra se encuentra aún desvinculada (no se cumple la hipótesis de Navier) considerando el módulo de rigidez ajustado a la edad 3.3:

$$E_{ef} = \frac{E_c(t)}{1 + \chi(t, t_0) \rho(t, t_0)} \quad (3.3)$$

- $\chi(t, t_0)$ : Coeficiente de Envejecimiento

- Finalmente, el tercer estado, es el originado por la unión de las diferentes fibras: se vuelve a imponer las condiciones de equilibrio y compatibilidad reaplicando la fuerza de bloqueo en toda la sección. Se considera nuevamente el módulo de rigidez ajustado a la edad en cada fibra de hormigón. La ecuación constitutiva del hormigón en esta etapa se modifica de la siguiente forma para hallar las tensiones en el estado diferido:

$$\sigma_c = \sigma_c(\varepsilon_c + \chi(t, t_0)\rho(t, t_0)\varepsilon_c(t_0) - \Delta\varepsilon_c^*(t, t_s)) \quad (3.4)$$

$\sigma_c$ : Es la tensión en cada fibra. La ecuación constitutiva puede ser la que se presenta en 3.1, por ejemplo, o puede ser lineal. El programa ofrece distintas posibilidades.

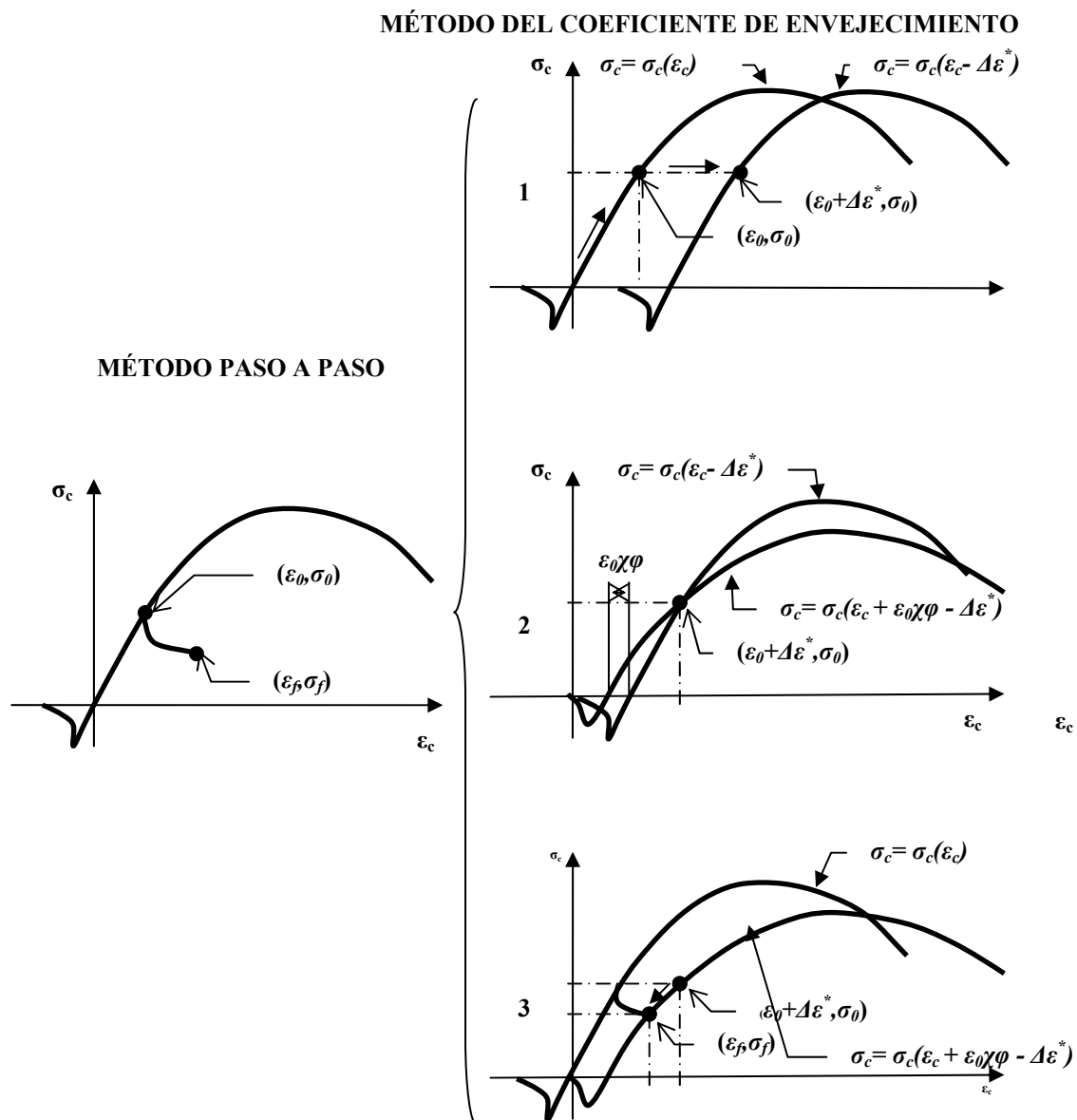


Figura 3.5. Etapas de cálculo según el Método del Coeficiente de Envejecimiento

La correcta aplicación de este método requiere de una cierta precisión en el valor del coeficiente  $\chi$ . A pesar de que el método del coeficiente de envejecimiento no es especialmente sensible a su valor a tiempo infinito, pudiendo adoptar 0,80 con excelentes resultados, para la obtención de la respuesta en tiempos intermedios sí tiene cierta importancia. La mayoría de las fórmulas aproximadas del coeficiente de envejecimiento se refieren al valor al tiempo infinito. Existen algunas, como la desarrollada por [15], que permite ajustar el valor para edades tempranas. Sin embargo esta fórmula presenta una cierta complejidad en su evaluación y no proporciona resultados correctos fuera de su rango de utilización.

Se propone para este estudio una expresión simplificada que presenta un ajuste razonable para cualquier tiempo de puesta en carga y evaluación. La expresión ajusta el valor a tiempo infinito ayudándose de las fórmulas propuestas por otros autores, y adopta como valor para tiempos pequeños un  $\chi = 0,90$  lo cual es bastante correcto para cualquier hormigón a edades tempranas. Finalmente, para la transición entre ambos valores se propone una ley lineal con el tiempo [8] que ha demostrado ser un ajuste correcto.

La fórmula propuesta es por lo tanto inmediata de evaluar, con valores acotados en los extremos y una transición razonable. La expresión resulta:

$$\chi(t, t_0) = \chi_0 + (\chi_\infty - \chi_0) \frac{t - t_0}{t} \rightarrow \begin{cases} \chi_0 \approx 0,90 \\ \chi_\infty \approx \frac{\sqrt{t_0}}{1 + \sqrt{t_0}} \end{cases}$$

$$\chi(t, t_0) = 0.9 + \left( \frac{\sqrt{t_0}}{1 + \sqrt{t_0}} \right) \frac{t - t_0}{t} \quad (3.5)$$

### 3.3. Acero activo

El acero de pretensar es un material que al igual que el hormigón posee un marcado carácter reológico. Además, a tiempo cero, la curva de comportamiento presenta también un marcado carácter no lineal. Existen diferentes propuestas para la modelización de dicha curva. De entre ellas, se ha preferido utilizar la formulación de Ramberg – Osgood modificada debido a la sencillez analítica de su expresión y no ser una función definida por intervalos, lo que siempre facilita su programación y no ralentiza la ejecución del programa con los bucles. Dicha curva adopta la siguiente expresión:

$$\sigma_p = E_p \varepsilon_{pf} \left( A + \frac{1 - A}{[1 + (B \varepsilon_{pf})^c]^{\frac{1}{c}}} \right) \leq f_{pu} \quad (3.6)$$

Donde se adoptan los valores de  $A$ ,  $B$  y  $C$  según sea el tipo de acero<sup>4</sup>. En la definición del acero de pretensar debe establecerse además cual es la tensión inicial de tesado.

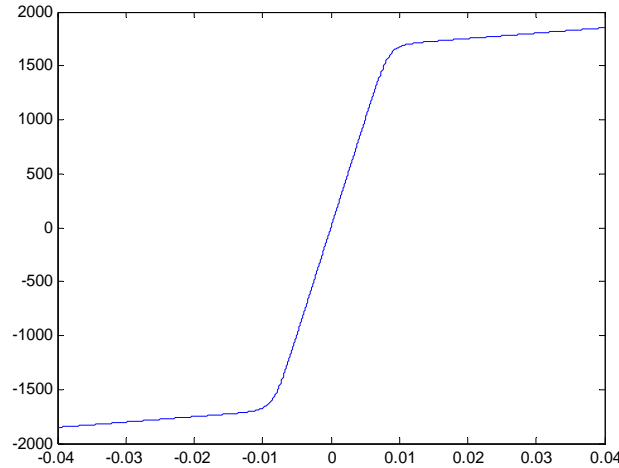


Figura 3.6. Ecuación constitutiva del acero de pretensar.

En cuanto al comportamiento diferido, dicho proceso puede asimilarse al estudiado para el hormigón y por lo tanto permite ser estudiado mediante la aplicación del método de envejecimiento.

$$\Delta\sigma_{pr} = \begin{cases} -\eta_t \sigma_{p0} (\lambda - 0,40)^2 \rightarrow \lambda \geq 0,40 \\ 0 \rightarrow \lambda < 0,40 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\text{Donde: } \lambda = \frac{\sigma_{po}}{f_{ptk}} \quad (3.8)$$

Donde  $\Delta\sigma_{pr}$  es la pérdida de tensión debido a un proceso de relajación intrínseca. La reducción debido a la variación de longitud del elemento del soporte se realiza sobre este valor siendo:

$$\chi_r = \int_{\xi=1}^{\xi=1} (1 - \Omega\xi) \left( \frac{\lambda(1 - \Omega\xi) - 0,40}{\lambda - 0,40} \right)^2 d\xi \quad (3.9)$$

$$\text{Donde: } \Omega = - \frac{\Delta\sigma_{ps}(t) - \Delta\sigma_{pr}(t)}{\Delta\sigma_{p0}} \quad (3.10)$$

<sup>4</sup> Para aceros de baja relajación los valores que utiliza el programa son  $A = 0,025$ ;  $B = 118,0$  y  $C = 10,0$ .



Adoptándose como pérdida  $\Delta\sigma_{pr}(t)^* = \Delta\sigma_{pr}(t)\chi_r$  y siendo  $\Delta\sigma_{ps}$  la variación de la tensión en el acero de pretensar debido a los fenómenos reológicos. Por lo tanto el proceso correcto para determinar  $\chi_r$  debe ser iterativo, lo que hace incómodo tener que evaluar la integral repetidas veces y se puede acudir a expresiones simplificadas para evaluar tanto  $\Delta\sigma_{pr}$  como  $\chi_r$ .

$$\eta(t) = 10^{K_1 + K_2 \log_{10}(t)} \quad (3.11)$$

La fórmula de relajación 3.7 es claramente no lineal y de tipo viscoplástico. Es correcta en procesos de relajación intrínseca (a longitud constante), sin embargo, a longitud variable (la que realmente se produce por el acortamiento del hormigón sobre el que se pretensa debido a los fenómenos de fluencia y retracción) las pérdidas pueden estimarse empleando el método del coeficiente de envejecimiento como:

$$\Delta\sigma_{pr}^*(t) = \chi_r \Delta\sigma_{pr}(t) \quad (3.12)$$

Existen expresiones simplificadas que permiten evaluar el valor de  $\chi_r$  a partir de la tensión inicial del acero y de su tensión final y que puede ajustarse mediante tanteos. Para este trabajo se ha decidido acotar el valor del coeficiente  $\chi_r$ , que se obtiene de resolver la ecuación integral por iteraciones sucesivas, a los valores comprendidos entre [0.8 – 0.9] sancionados por la practica y que proporcionan resultados excelentes para la precisión que se quiere lograr.

### 3.4. Acero pasivo

El acero pasivo está embebido en el hormigón e interactúa con el en el proceso evolutivo de modo que hay compatibilidad entre las deformaciones del acero y el hormigón que le rodea ya que se considera que la adherencia es perfecta y no se producen deslizamientos relativos; esto será cierto siempre que la barras que se coloquen en la sección dispongan de estos mecanismos para garantizar dicho comportamiento (barras corrugadas).

Para el caso del acero pasivo basta con considerar su comportamiento instantáneo ya que no sufre fenómenos diferidos intrínsecos, sino que se limita deformarse junto con el hormigón y asimilar las tensiones que migran del hormigón fruto de los fenómenos diferidos que se dan en éste y las redistribuciones tensionales que hay a nivel seccional.

Se considera un diagrama idéntico en compresión y en tracción y se ha optado por emplear un modelo elástico – perfectamente plástico sin considerar el posible endurecimiento por deformación análogo al que se presenta en la figura 3.7 para el acero estructural.

### 3.5. Acero estructural

El modelo del acero estructural tiene en cuenta en el análisis de secciones el posible desarrollo de inestabilidad por abolladura del panel comprimido así como otras consideraciones que es interesante comentar. La ley que se acepta para una fibra de acero estructural responde a un diagrama de tipo elastoplástico según muestra de figura 3.7.

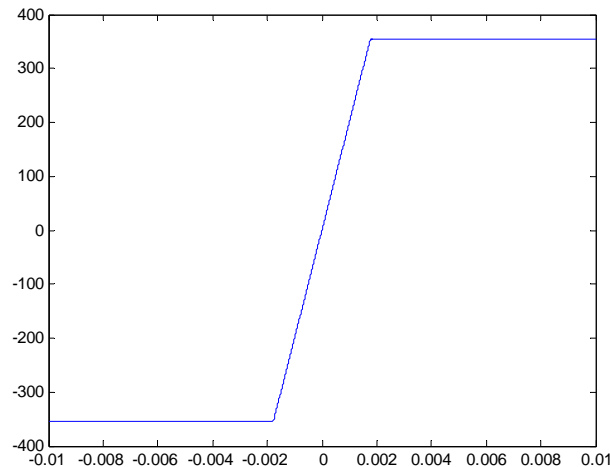


Figura 3.7. Ecuación constitutiva del acero estructural

Esta ley, en la que se supone una descarga y recarga elástica hasta la deformación máxima anterior puede ser modificada para incluir la presencia de dos fenómenos<sup>5</sup>:

- El primero consiste en tener en cuenta las condiciones de la sección frente a la abolladura y las plastificaciones locales. Las dimensiones de las chapas y el tipo de acero pueden ser causa de inestabilidades y efectos de segundo orden bajo algunas combinaciones de esfuerzos y tensiones a las que se ven sometidas por lo que se debe llevar un control de las deformaciones para poder controlar este fenómeno.
- El segundo permite que el acero estructural no recoja tracciones. Esta suposición, que puede sorprender a primera vista, es de gran utilidad principalmente en uniones de piezas mixtas a pilares. En las mismas, en ocasiones, se establecen condiciones de unión (soldaduras, chapas,...) de manera que el acero estructural no transmita tracciones a la unión y éstas sean recogidas con armadura pasiva.

---

<sup>5</sup> Podría incluirse la presencia de las tensiones residuales producto de la laminación y soldadura en las chapas, pero se ha obviado en este trabajo pero no por ello dejan de ser importantes ya que pueden alcanzar valores pico locales de 300 MPa por lo que poseen una gran influencia en las plastificaciones tempranas del acero.

La introducción de estas consideraciones puede realizarse discretizando la chapa de acero por filamentos paralelos entre sí y controlando por lo tanto la deformación en cada uno de ellos.

### 3.6. Aplicación al análisis de secciones

Los modelos de comportamiento de los materiales presentados en este anterior capítulo pueden aplicarse ahora al estudio de una sección que pueda estar compuesta por ellos, que su construcción pueda realizarse por fases y además interactúen en el tiempo.

Para el estudio de los anteriores comportamientos de los materiales a nivel de sección se ha implementado en un programa denominado **AESS** un conjunto de subrutinas con las que se pretende analizar una amplia gamma de secciones.

#### 3.6.1. Consideraciones generales

Las secciones que se pretende analizar con el software desarrollado cumplen las siguientes hipótesis:

- Las secciones inicialmente planas antes de ser sometidas a una acción, continúan siendo planas después de la aplicación de una carga o de una deformación impuesta.
- No se tiene en cuenta las deformaciones por tensiones tangenciales.
- Se admite adherencia perfecta entre los materiales que constituyen la sección. Ello es aplicable a distintas tipologías de armaduras (después de la inyección en el caso de postensados adherentes) y a secciones construidas evolutivamente, ya sea añadiendo hormigones u otros materiales.
- Se considera que los esfuerzos se aplican en un plano de simetría de la sección, originándose una situación de flexocompresión recta.

El algoritmo que calcula el estado tenso-deformacional de la sección para un par de esfuerzos externos consiste en un esquema iterativo con control de fuerzas basado en los algoritmos clásicos de búsqueda de ceros de funciones. En el mismo se imponen las hipótesis básicas de:

##### 3.6.1.1. Equilibrio

El Equilibrio seccional debe plantearse de forma continua bajo el símbolo integral de la siguiente forma:

$$N = \int_{A_c} \sigma_c dA_c + \int_{A_e} \sigma_e dA_e + \int_{A_p} \sigma_p dA_p + \int_{A_a} \sigma_a dA_a \quad (3.13)$$

$$M = \int_{A_c} \sigma_c y_c dA_c + \int_{A_e} \sigma_e y_e dA_e + \int_{A_p} \sigma_p y_p dA_p + \int_{A_a} \sigma_a y_a dA_a \quad (3.14)$$

Para este trabajo se ha considerado suficiente aproximar dicha integral a un sumatorio discreto con el que se obtienen las siguientes expresiones que relacionan el nivel tensional interno de la pieza con los esfuerzos aplicados:

$$N \approx \sum_{i=1}^{nbandas} \sigma_{c,i} A_{c,i} + \sum_{i=1}^{ncapaspret} \sigma_{pret,i} A_{pret,i} + \sum_{i=1}^{ncapaspost} \sigma_{post,i} A_{post,i} + \sum_{i=1}^{ncapaspas} \sigma_{pas,i} A_{pas,i} \quad (3.15)$$

$$M \approx \sum_{i=1}^{nbandas} y_{c,i} \sigma_{c,i} A_{c,i} + \sum_{i=1}^{ncapaspret} y_{pret,i} \sigma_{pret,i} A_{pret,i} + \sum_{i=1}^{ncapaspost} y_{post,i} \sigma_{post,i} A_{post,i} + \sum_{i=1}^{ncapaspas} y_{pas,i} \sigma_{pas,i} A_{pas,i} \quad (3.16)$$

### 3.6.1.2. Compatibilidad

La *Compatibilidad*, que se logra imponiendo adherencia perfecta entre los aceros de la sección y el hormigón que les rodea y la hipótesis de Navier<sup>6</sup> que se expresa analíticamente como:

$$\varepsilon(y) = \varepsilon_{c,inf} - \frac{\varepsilon_{c,inf} - \varepsilon_{c,sup}}{h} \cdot y \quad (3.17)$$

### 3.6.2. Convenio de signos. Idealización de la sección

Las secciones pueden estar formadas por diversos materiales y deben tener un eje de simetría contenido en el plano de carga.

Cada sección tipo se descompone en una serie de trapecios, los cuales se discretizan en capas paralelas entre sí y perpendiculares al eje de simetría. Las capas están compuestas exclusivamente de un solo material, aunque se pueden superponer diversas capas para representar distintos materiales situados en la misma ordenada. Existe la posibilidad de modelizar armaduras y refuerzos externos como capas sin grosor situadas en una coordenada correspondiente a su baricentro. La sección se analiza tomando como eje de referencia la fibra inferior de la sección, independizándose así el análisis de la posible variación del baricentro con el tiempo. Todo ello permite

<sup>6</sup> Los puntos de la sección contenidos en un mismo plano bajo la acción de un esfuerzo externo o deformación impuesta estarán contenidos en el mismo plano.

simular la construcción de secciones por fases y de estructuras mixtas de acero y hormigón. Se pueden incorporar más de un hormigón u otros materiales.

En la figura 3.8, 3.9 y 3.10 se muestran ejemplos de discretización de secciones constituidas por diversos materiales.

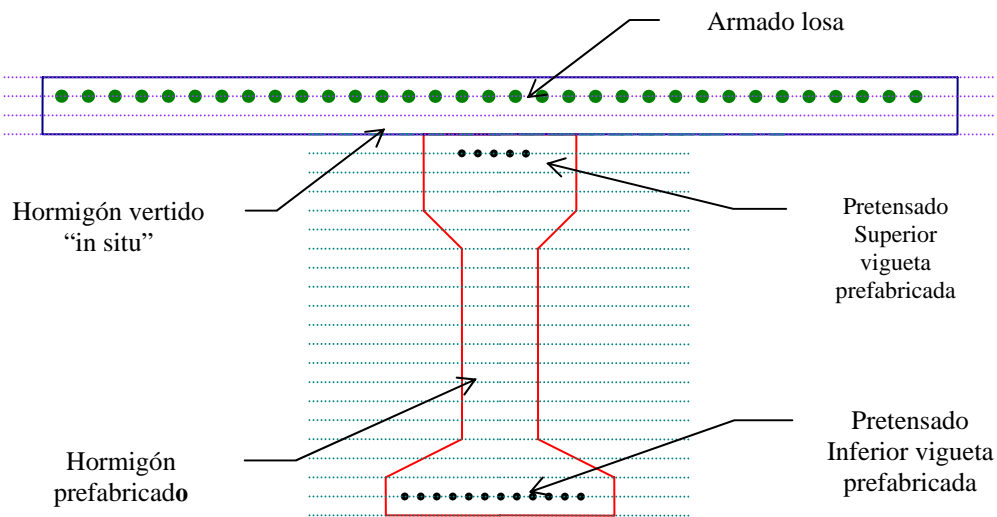


Figura 3.8. Ejemplo de discretización de una sección compuesta por dos hormigones

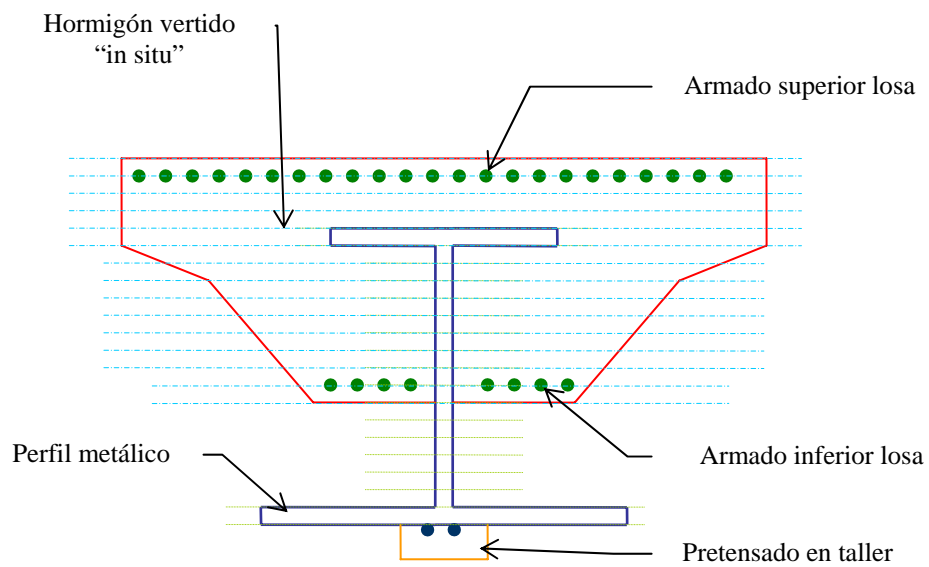


Figura 3.9. Ejemplo de discretización de una sección mixta hormigón – acero pretensada

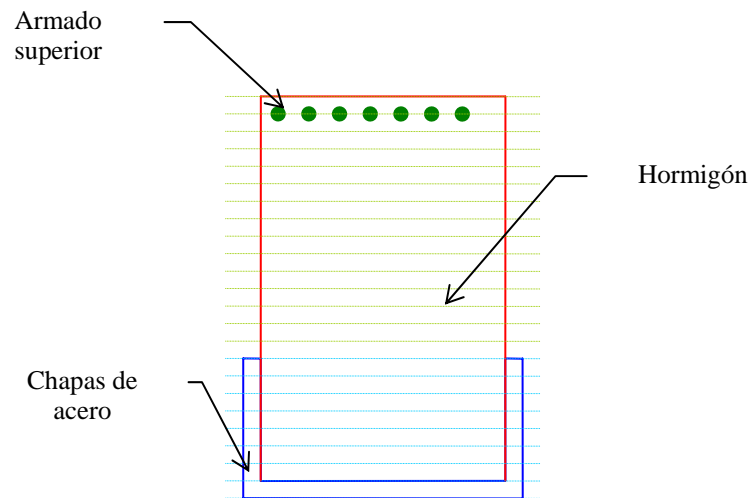


Figura 3.10. Ejemplo de discretización de una sección de hormigón semiembibida en chapas metálicas soldadas

El convenio de signos empleado para la idealización de la sección es el siguiente:

- Los flectores que comprimen la fibra superior de la sección son los positivos.
- Los axiles que comprimen la sección son los positivos.
- Las deformaciones que provocan tensiones de tracción (negativas) son positivas y viceversa.

### 3.6.3. Discretización del tiempo

La discretización del tiempo se ha llevado a cabo definiendo una serie de etapas las cuales representan instantes en las que se aplica alguna acción externa o simplemente hay un cambio en las condiciones de vinculación y condiciones de contorno.

Entre las distintas etapas se calculan los efectos los fenómenos diferidos de los materiales causan a la sección empleando el *Método del Coeficiente de Envejecimiento*, de este modo se obtiene las nuevas distribuciones tensionales y de deformaciones en la sección al final de cada etapa y al inicio de la siguiente.

El modelo de análisis de secciones que se emplea distingue las siguientes etapas:

1. *Transferencia* del pretensado o aplicación del peso propio.
2. *Hormigonado* de la losa.
3. *Fraguado* de la losa.
4. *Tesado* de los cables de *postesado* e *inyección* de las vainas.
5. Aparición de las *cargas muertas*.

6. *Descimbrado* de la estructura.
7. Aparición de las *sobrecargas a corto y largo plazo*.

Todos estos tiempos característicos pueden combinarse de distintas maneras según sea el tipo de estructura, por ejemplo, en una sección compuesta el postesado podría realizarse en fábrica pocos días después de transferir el pretensado, en cambio, para una sección mixta el postesado podría efectuarse tras la colocación de las cargas muertas.

### 3.6.4. Tratamiento de las interfaces

A continuación se desarrollan una serie de consideraciones que se han realizado para el tratamiento de las diferentes interfaces que pueden presentarse en la sección.

#### 3.6.4.1. Deslizamientos relativos

Debido a la adopción de la hipótesis de Navier no pueden aparecer deslizamientos relativos entre los diferentes materiales. Esta hipótesis es muy razonable y su bondad ha sido contrastada en multitud de experiencias, sin embargo, su validez puede resentirse en dos interfaces. La primera de ellas es la que se localiza entre una platabanda de acero estructural y una losa de hormigón mientras que la segunda se encuentra en la zona fisurada de hormigón con armaduras.

#### 3.6.4.2. Interfaz acero estructural – losa de hormigón

La conexión entre la losa de hormigón y el acero estructural se realiza mediante una serie de pernos conectadores separados por una distancia finita. Este hecho provoca que puedan existir deslizamientos relativos anulando la hipótesis anterior.

El fenómeno ha sido estudiado por diversos investigadores, entre ellos J. Martínez Calzón llegándose a la conclusión mediante diferentes análisis y estudios paramétricos que el deslizamiento en la interfaz es despreciable en el comportamiento de la sección. Por lo tanto, el deslizamiento relativo en la conexión no se tendrá en cuenta en los análisis.

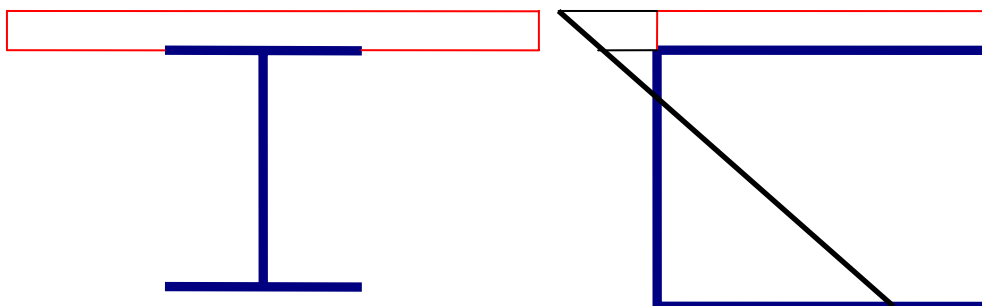


Figura 3.11. Plano de deformaciones según la hipótesis de Navier

### 3.6.4.3. Fisuración del hormigón

La aparición de fisuración en el hormigón activa una serie de mecanismos resistentes que son el softening del hormigón, el trabajo del acero y la interfaz entre ambos materiales. Todo ello provoca que aparezcan una serie de deslizamientos relativos en el sistema. Este fenómeno no se va a tener en cuenta en el análisis evolutivo de secciones que aquí se plantea, no obstante si que se considera oportuno incluir la contribución a la resistencia a tracción del hormigón traccionado entre fisuras modificando la ecuación constitutiva del hormigón tal como se ha comentado en el segundo capítulo.

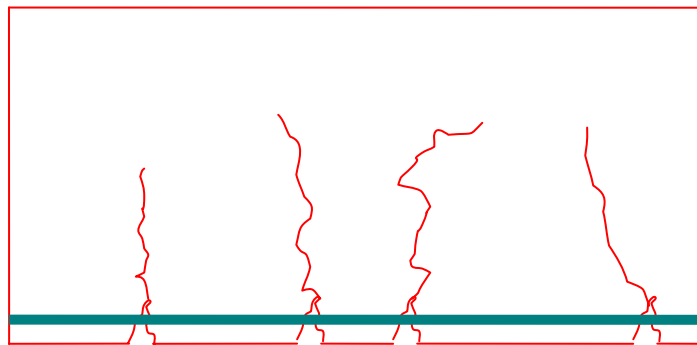


Figura 3.12. Hormigón en tracción fisurado