

Revisión del estado del conocimiento

2.1. Introducción y objetivos

En este capítulo se van a resumir las principales investigaciones realizadas sobre la caracterización de la respuesta de los materiales estructurales así como los diferentes métodos de cálculo para su evaluación. De este modo, se aprovechan estos apartados para describir cuáles son los modelos que se utilizarán en los posteriores análisis seccionales y en la implementación del programa.

Se describe el comportamiento instantáneo y diferido de los materiales, incluyendo las variables con mayor incidencia de los mismos, y se presentan diversas metodologías empleadas para su modelización.

La necesidad de sintetizar los conceptos, ateniéndonos al tipo de estudio que se quiere realizar en esta tesina, obliga a que no puedan desarrollarse con mayor extensión. Por esta razón se ha abierto un apéndice donde se expone ampliamente el *Método del Coeficiente de Envejecimiento*. Se ha considerado que su inclusión es inevitable ya que, dentro del análisis seccional evolutivo, es el que resuelve el problema de los fenómenos diferidos del hormigón simplificando enormemente la ecuación integral de Volterra; además, este es el método que se ha implementado en el programa.

2.2. Hormigón

2.2.1. Comportamiento instantáneo

El comportamiento en compresión de una probeta de hormigón sometida a un ensayo uniaxial viene reflejado por una curva de forma aproximadamente parabólica. Además de las características propias del material intervienen muchos otros factores como pueden ser las dimensiones de la probeta, la rapidez de aplicación de la carga, el posible confinamiento...

El rango habitual de tensiones a las que se ve sometido el hormigón (bajo cargas de tipo permanente) no suele exceder en compresión el 50% de su resistencia, donde

puede asumirse perfectamente un comportamiento lineal. Dentro de este rango de tensiones se define E_c como la relación tensión σ_c y deformación ε_c en cada punto de la curva anterior y se convierte por lo tanto en un parámetro sencillo de emplear y que relaciona la tensión aplicada con la deformación observada. Como se aprecia en la figura 2.1, la relación puede ser aproximadamente lineal al principio con un módulo de elasticidad E_{ci} pero deja de serlo poco después. La pérdida de proporcionalidad entre las tensiones y deformaciones que origina que E_c sea variable. En general se suele aceptar la linealidad en hormigones convencionales en compresiones para relaciones σ_c/f_{cm} inferiores a 0,40 (donde también además comienza a observarse una clara no linealidad en las deformaciones diferidas)¹.

El módulo de deformación es una magnitud difícil de estimar en el hormigón ya que depende de multitud de variables (desde la resistencia del hormigón o la cantidad de árido empleado hasta la propia velocidad de aplicación de la carga). Por lo tanto, es esperable que los modelos proporcionados por los distintos códigos presenten una aproximación del valor del mismo pero no una respuesta absoluta a la pregunta de cuánto se deforma una fibra de hormigón al aplicarle una carga.

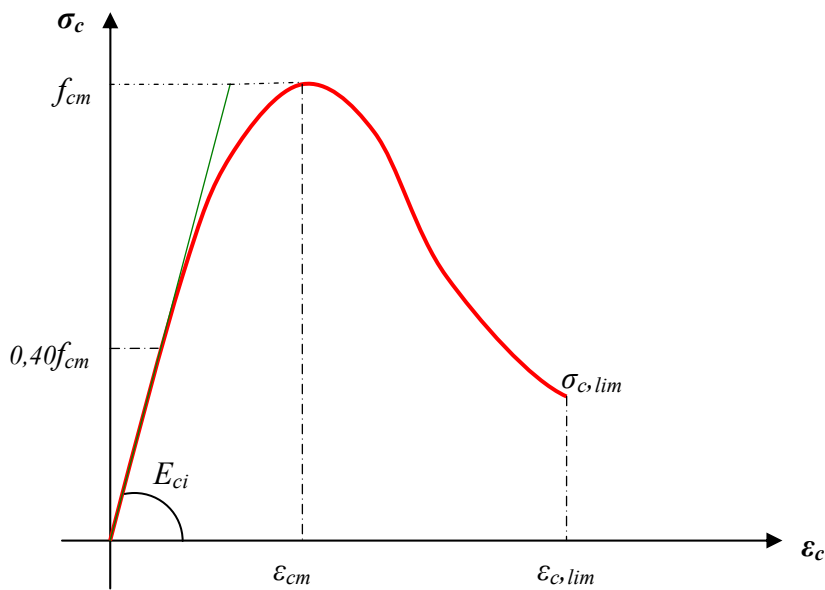


Figura 2.1. Diagrama tensión-deformación para compresión uniaxial

El comportamiento en tracción uniaxial de una probeta de hormigón presenta un comportamiento sensiblemente lineal hasta llegar a su resistencia media a tracción, a partir de la cual la tensión decrece rápidamente hasta anularse, con un crecimiento de la elongación media. Las deformaciones unitarias no son constantes a lo largo de la probeta, ya que la fisuración se produce en una zona determinada. En la figura 2.2 se indica el modelo adoptado por [5], en la que los parámetros w_I , w_c , que determinan la rama de *softening* son función de la energía de fractura por unidad de área G_F .

¹ Para hormigones de alta resistencia el módulo de deformación permanece aproximadamente constante hasta valores de tensión cercanos al 80% de su resistencia [18]

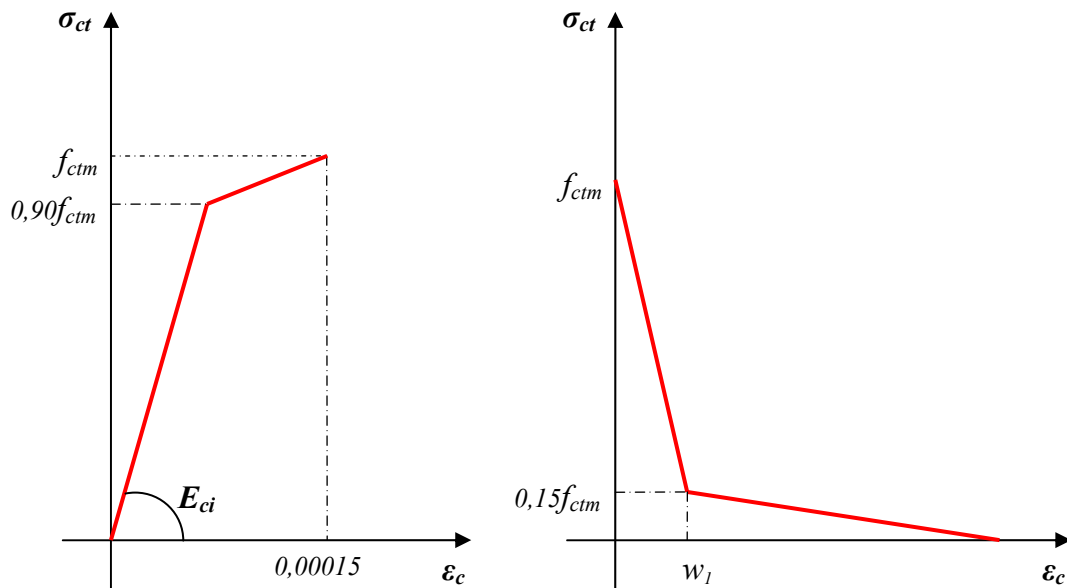


Figura 2.2. Diagrama de tensión-deformación para compresión uniaxial

2.2.2. Comportamiento diferido

El comportamiento a largo plazo del hormigón se ve influenciado básicamente por los fenómenos de la fluencia, la retracción, el envejecimiento y las variaciones de temperaturas. El tratamiento tradicional que se ha realizado de los fenómenos reológicos del hormigón ha consistido fundamentalmente en separar las deformaciones producidas por la fluencia de las producidas por la retracción. Este tratamiento es correcto siempre que se tenga claro que en realidad ambas deformaciones diferidas no son independientes sino que es una forma de representar un mismo fenómeno, la deformación del hormigón en el tiempo. El interés de separar la deformación por fluencia de la de retracción surge de la idea de divorciar las deformaciones diferidas de procesos donde interviene el nivel de tensiones existente en una fibra de las que sufriría en caso de no estar sometida a tensión alguna.

En este trabajo, al igual que otros similares [10], [11] y [12] las deformaciones diferidas se han englobado dentro del concepto de deformaciones no mecánicas ε_{nm} , considerando como deformaciones mecánicas ε_m las producidas de forma instantánea por una tensión originada por unas cargas aplicadas.

Luego se puede escribir:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_m(t) + \varepsilon_{nm}(t) \tag{2.1}$$

$$\varepsilon_{nm}(t) = \varepsilon_\varphi(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_T(t) \tag{2.2}$$

Donde $\varepsilon_{\phi}(t)$ es la deformación por fluencia, $\varepsilon_{cs}(t)$ es la debida a la retracción, $\varepsilon_T(t)$ corresponde a la deformación del hormigón originada por los efectos térmicos, pero para este trabajo no se va a considerar.

Definiciones

En este punto se va a definir qué se entiende por deformaciones de fluencia y retracción para poder ser aplicadas posteriormente a lo largo del estudio.

- *Deformación de retracción.* Es la deformación que desarrolla en el tiempo una pieza de unas características dadas y en un medio ambiente dado cuando no se encuentra sometida a carga exterior.
- *Deformación de fluencia.* Es la diferencia entre la deformación total que sufre una pieza de unas características dadas y en un medio ambiente dado en el tiempo cuando se encuentra sometida a una carga exterior y la deformación de retracción.

La superposición de deformaciones indicada en las ecuaciones anteriores queda reflejada en la figura 2.3, a la que cabría añadir la deformación de origen térmico.

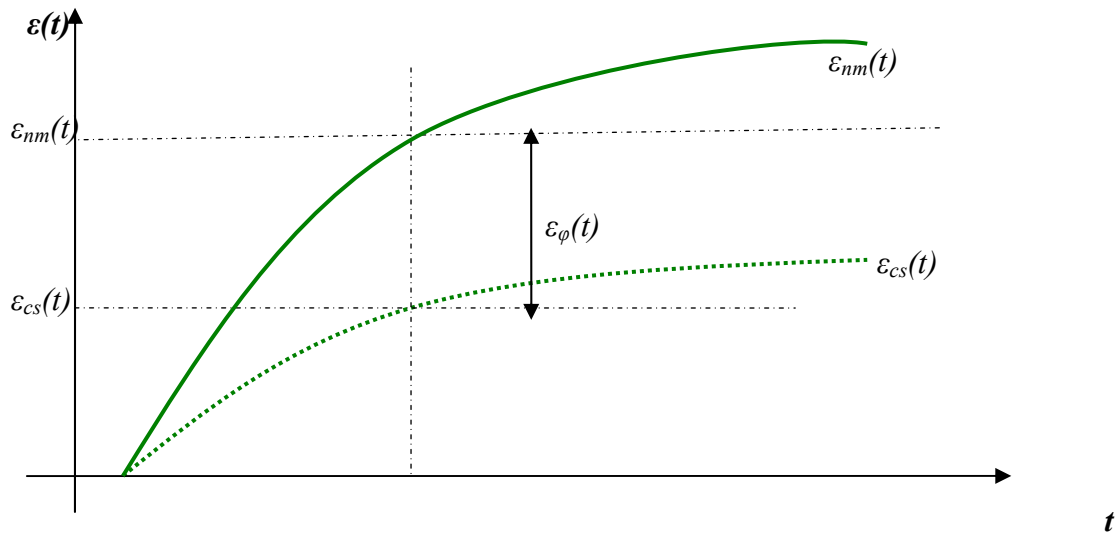


Figura 2.3. Evolución de las deformaciones no mecánicas de la sección

No obstante, a pesar de ser una definición general y siempre aplicable presenta algunos problemas conceptuales.

Por ejemplo, las tensiones de tracción debidas a la retracción pueden ser tales que en algún momento de la vida de la pieza excedan su capacidad resistente y por lo tanto provoquen fisuras en el contorno midiéndose unas ciertas deformaciones de retracción. Ahora bien, si dicha pieza se hubiera cargado con un cierto nivel de

tensiones de compresión de forma que no llegara a fisurar en la superficie, en este caso las deformaciones de retracción que se producirían no podrían ser iguales a las anteriores al no encontrarse fisurada la pieza. Por lo tanto, no parece ser muy congruente tomar la deformación de fluencia como la diferencia entre la deformación total en la pieza cargada no fisurada y la de retracción de la pieza fisurada ya que en realidad la retracción actúa sobre una pieza sin fisurar. Para estados elevados de carga sucede un fenómeno que también invalida en cierta forma la definición convencional de fluencia y retracción. La retracción se mide sobre una probeta de referencia sin carga, mientras que la deformación total que ocurre sobre la probeta cargada tiene lugar en un estado de gran microfisuración interna, condiciones sobre las cuales parece lógico que las deformaciones de retracción se vean afectadas.

A pesar de estas inconsistencias, se acepta la validez de las definiciones anteriores ya que el posible exceso o defecto de la retracción adoptada respecto de la real se ve absorbida por un incremento o decremento en la fluencia observada (de forma que la suma de las dos sea igual a la deformación total).

2.2.2.1. Retracción

Fenómeno físico

La retracción es la deformación que desarrolla una piezas de unas características dadas y en un medio ambiente determinado cuando no se ve sometida a carga exterior.

En general, la retracción es una deformación que reduce el volumen inicial de la pieza² debido a una serie de fenómenos físico – químicos que ocurren tanto a tempranas edades como a lo largo del tiempo. El modelo de la microestructura del hormigón sirve para explicar la retracción de secado, debida a la pérdida de agua que se produce en la pieza, pero existen otros posibles fenómenos causantes de la deformación de retracción. Es difícil dar una clasificación donde expongan todos los mecanismos que propician una disminución de volumen de la pasta de cemento sin la aplicación de tensiones, pero los principales son los siguientes:

Retracción plástica

Se produce antes de finalizar el fraguado del hormigón, dentro de su proceso de hidratación, cuando aún se encuentra en estado plástico. Dicha contracción puede evaluarse en el entorno del 1 % _respecto del volumen absoluto del cemento seco. Los principales factores que influyen en ella son:

1. Dosificación y tipo de cemento. Según se acaba de exponer, a mayor cantidad de cemento mayor será también la retracción plástica que experimentará el hormigón.
2. Desecación superficial. El viento, al desecar la superficie del hormigón acelera el proceso.

² En hormigones sumergidos puede presentarse un aumento del volumen del mismo con el tiempo debido a la ganancia de agua, entonces dicha deformación se denomina “entumecimiento”.

La retracción plástica produce una fisuración aleatoria denominada de “afogado” o “piel de cocodrilo” debido a su aspecto y caracterizada por la presencia de fisuras muy próximas entre sí y de poca profundidad.

Esta fisuración es debida a la existencia a la existencia de un estado tensional; la superficie comienza a resistir unas ciertas tensiones debidas a la retracción hasta que se ve superada su capacidad resistente a tracción, produciéndose una fisura que disipa las tensiones en esa dirección al liberar la deformación impuesta mediante la abertura de la fisura (en vez de con la deformación del hormigón). Sin embargo, las tensiones seguirán aumentando en otra dirección hasta que falle de nuevo, así pues, el ángulo entre fisuras suele estar comprendido entre 90° y 120°.

Para minimizar e incluso evitar la retracción plástica es necesario realizar un curado de la pieza tal que mantenga siempre húmedas las superficies del hormigón, impidiendo por lo tanto la desecación que acelera el proceso de contracción.

Retracción autógena

La retracción autógena se encuentra a medio camino entre la retracción plástica y la de secado, en cierta manera puede afirmarse que es una continuación de la retracción plástica debido a que se ve originada por las mismas causas (hidratación de la pasta de cemento) sin embargo se produce sobre el hormigón no en consistencia plástica sino endurecido. A diferencia de la retracción de secado, cuyo motor es el intercambio y diferencia de humedad con el medio, la retracción autógena se desarrolla aunque la humedad del ambiente sea igual al de la pasta, continuando el proceso de hidratación con el agua incorporada en su fraguado.

En cualquier caso, los valores de la retracción autógena suelen ser pequeños y normalmente se engloban dentro de las deformaciones producidas por la retracción de secado.

Retracción por carbonatación

La retracción por carbonatación no es tan importante como la de secado pero la incrementa. Se produce al combinarse el CO_2 del aire con el $Ca(OH)_2$ produciendo $Ca(CO_3)$, con lo que se carbonata la pasta de cemento:



La carbonatación es un fenómeno que comienza en la superficie y va progresando hacia dentro de la pieza. Sus efectos son:

1. Disminuye el volumen.

2. Aumento de la resistencia a compresión.
3. Disminuye la alcalinidad del medio y su permeabilidad.

La carbonatación alcanza su máximo valor para humedades relativas entorno al 50 – 60 % y todavía es más potente su efecto si existen oscilaciones de humedad.

El efecto sobre la alcalinidad del hormigón es posiblemente el más destacado de la carbonatación (más que el de la retracción por carbonatación asociada) al tener una incidencia directa en la corrosión de las armaduras y por eso se toman medidas para limitarla.

El fenómeno que provoca la carbonatación del hormigón es la desaparición de la autopasivación de las armaduras al reducirse el elevado pH del medio debido a la disminución de su contenido en $Ca(OH)_2$. La retracción por carbonatación del hormigón suele despreciarse al afectar normalmente a una capa muy superficial del mismo (menor de 1 *mm*).

Retracción de secado

Responde a este nombre aquella cuyo origen se encuentra en la microestructura de la pasta de cemento e intercambio de humedad con el medio. Los primeros modelos sobre la retracción de secado, Pickett (1946) por ejemplo, proponían que el cambio de volumen en el hormigón era proporcional a su pérdida de agua. Estos modelos son excesivamente groseros³ y se han refinado incluyendo otra serie de efectos (como la presión de ruptura) hasta cuantificar de manera más o menos acertada el valor de la misma en diferentes códigos y normativas, pero muestra cómo ya entonces se intuía el proceso fundamental detrás del fenómeno.

La retracción de secado es la componente fundamental de la retracción desarrollándose sobre el hormigón endurecido. El valor de la misma depende de una gran cantidad de parámetros. Los principales son los siguientes:

1. Humedad relativa.
2. Duración del curado, madurez del elemento.
3. Forma del elemento (espesor equivalente).
4. Relación agua/cemento⁴ y resistencia del hormigón.
5. Temperatura ambiente.
6. Tipo de árido y relación árido – cemento.
7. Otros.

³ Ya que no incluyen el efecto del tamaño de los poros, la difusión de la humedad de la pasta y otras variables significativas de este fenómeno.

⁴ En realidad, la relación agua/cemento es una medida indirecta de la resistencia del hormigón.

La influencia de los diferentes parámetros es compleja de estudiar debido que algunos factores son antagónicos de otros y a que no todos tienen la misma importancia. En general puede resumirse en la tabla 2.1 la influencia de los mismos.

Variable	Efecto sobre la fluencia al aumentar la variable
Humedad	Disminuye
Madurez	Disminuye
Espesor	Disminuye
Agua/cemento	Aumenta
Resistencia f_c	Disminuye
Temperatura	Aumenta
Árido/cemento	Disminuye

Tabla 2.1. Influencia de los factores en la retracción

Sobre los efectos de las distintas variables cabe destacar que el grado de humedad y por lo tanto de los intercambios de agua entre la pieza y el ambiente son el motor de la retracción.

El resto de las variables, salvo la relación árido/cemento, pueden ser entendidas como factores que favorecen o dificultan dicho intercambio, aumentando o disminuyendo respectivamente la retracción de la pieza. El factor tal vez menos relevante de los citados anteriormente es la temperatura.

De una manera simplificada puede entenderse que la relación agua/cemento influye en la retracción debido a que los áridos no presentan deformaciones de retracción y por lo tanto un mayor porcentaje de los mismos llevará consigo una menor retracción del conjunto. Además de los factores anteriormente comentados existen otros como por ejemplo el contenido de aire, como de Abrahms... recogidos por diferentes códigos aunque con una influencia mucho menor en el valor de la retracción que los anteriores.

Existen diversos modelos para la determinación de la deformación debida a la retracción como los de [5], [6] y [7]. Respecto de los modelos anteriores, parece interesante destacar que las variables: temperatura; relación agua/cemento y relación árido/cemento no están explícitamente en ninguna formulación a pesar se que las dos últimas tienen una cierta importancia en el fenómeno de la retracción.

2.2.2.2. Fluencia

Fenómeno físico

La deformación por fluencia es la diferencia entre la deformación total que sufre una pieza de unas características dadas en un medio ambiente determinado a lo largo del tiempo cuando se encuentra sometida a una carga exterior y la deformación de retracción. Existen distintas clasificaciones sobre los fenómenos producidos por la fluencia. Dos de los más interesantes:

1. La primera de las clasificaciones podría decirse que es “por sus efectos”.
 - Fluencia Primaria. Es la parte de la deformación diferida que se puede recuperar tras un proceso de descarga.
 - Fluencia secundaria. Corresponde a la parte no recuperable de la deformación diferida.
 - Fluencia terciaria. Según el nivel de tensiones puede desarrollarse además una deformación adicional.
2. La segunda clasificación “por sus causas”:
 - Fluencia Básica: La que se produce en una probeta sellada sin intercambio de humedad con el exterior.
 - Fluencia de secado: Se define como la diferencia entre la fluencia total y la básica.

Esta última clasificación es la más utilizada y difundida y es la que también será empleada en este estudio, pero la primera también tiene un cierto interés al introducir el concepto de una deformación adicional con estados elevados de carga (fenómeno conocido como fluencia no lineal a altas tensiones).

Fluencia básica

Existen diferentes explicaciones sobre los mecanismos que pueden ser causa de la fluencia básica. En definitiva, el motor que produce estas deformaciones de fluencia se encuentra en los fenómenos de reestructuración interna de la microestructura de la pasta de cemento, procesos que finalizan en configuraciones de menor volumen. Alguno de estos fenómenos entre hojas de C-S-H, disoluciones y precipitaciones de cristales.

Fluencia de secado

Tiene un origen que todavía no está completamente determinado. Existen propuestas que aclaran parcialmente la existencia del fenómeno aunque sin explicarlo de forma completa. Dos de las propuestas sobre el origen de la fluencia podrían ser las siguientes:

- La primera está basada en la paradoja apuntada por Wittmann y fundamentada sobre la diferencia en el valor de la retracción entre probetas fisuradas y no fisuradas (según el nivel de tensiones de compresión), capaz de explicar en parte la existencia de las deformaciones de la fluencia de secado.
- La segunda tiene en cuenta el posible efecto del bombeo del agua al aplicar una tensión acelerando el secado del elemento.

En cierta forma (y debido a que la retracción se puede medir igual que la fluencia básica) la fluencia se secado se puede obtener como diferencia entre la deformación total y la suma del resto de deformaciones diferidas. Por lo tanto, al estar definida de esta manera, permite ajustar el valor de la deformación total y por eso debe englobar todos los fenómenos restantes que tienen lugar.

Factores que influyen en el valor de la fluencia

El tratamiento de los diferentes factores que influyen en la fluencia puede realizarse analizando por separado la fluencia básica y la de secado o bien ambas conjuntamente. Este segundo planteamiento es el que se va a efectuar en este estudio ya que en realidad ambas presentan el mismo fenómeno con la salvedad que una de ellas (fluencia básica) una de las variables (humedad relativa) se mantiene constante durante todo el proceso (lo que hace a su vez que otras variables no afecten, como por ejemplo el espesor de la pieza). Sin embargo, eso no garantiza que la fluencia de secado sólo se vea afectada por la humedad relativa, el resto de variables también tienen su influencia en ella. Es decir, se va a presentar las variables que intervienen en el fenómeno de la fluencia y el efecto de las mismas.

Una de las clasificaciones completa de los diferentes factores que influyen en la fluencia podría ser:

1. Humedad relativa, espesor de la pieza.
2. Relación (tensión aplicada)/(resistencia del hormigón).
3. Áridos: Tipo de áridos y relación árido/cemento.
4. Cemento: Composición, finura de molida y aditivos.
5. Tiempo de aplicación de la carga.
6. Temperatura.
7. Curado.
8. Revibración.
9. Otros.

Nuevamente, se va a resumir en la tabla 2.2 el efecto de los principales factores en las deformaciones de fluencia.

Variable	Efecto sobre la fluencia al aumentar la variable
Humedad	Disminuye
Espesor	Disminuye
Relación σ/f_c	Aumenta
Tipo de árido	Variable según árido
Agua/cemento	Aumenta
Temperatura	Aumenta
Curado	Disminuye
Revibración	Disminuye

Tabla 2.2. Variables que influyen sobre las deformaciones de fluencia

2.2.2.3. Métodos de cálculo

Para tensiones inferiores a $0,40f_{cm}$, estado de servicio, se acepta una función lineal entre tensiones y deformaciones diferidas debidas a la fluencia. Ejemplos de modelos lineales pueden encontrarse en [5], [6] y [7] entre otros. Cuando se supera este valor no resulta aceptable esta hipótesis de linealidad y debe acudir a modelos que tengan en cuenta el nivel de tensión y que resultarán más o menos complejos en función de las variables incluidas. De entre estos destaca por su sencillez y, a la vez, concordancia con los resultados experimentales el presentado por [8]. Este modelo proporciona un coeficiente de amplificación para el coeficiente de fluencia lineal η dependiente de la tensión aplicada en la fibra y de su resistencia en el momento de aplicación de la carga.

Aceptando un comportamiento lineal, la deformación total teniendo en cuenta la fluencia puede expresarse según:

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0)C(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_c(t_0)} \right] \quad (2.3)$$

Donde $\sigma_c(t_0)$ es la tensión inicial aplicada, $C(t, t_0)$ la función de fluencia y $\varphi(t, t_0)$ el coeficiente de fluencia. En el caso de los modelos de MC-90 y el EC-2, el coeficiente de fluencia viene referido a la deformación a los 28 días, de manera que:

$$C(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi_{28}(t, t_0)}{E_{c,28}(t_0)} \quad (2.4)$$

Fluencia del hormigón a tensiones variables

Como consecuencia de la linealidad entre deformaciones y tensiones que se deriva de la ecuación 2.3, en el caso de tensiones variables suele aplicarse el principio de superposición de Boltzman. La deformación vendrá dada por:

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} [1 + \varphi(t, t_0)] + \int_{t_0}^t \frac{1 + \varphi(t, \tau)}{E_c(\tau)} \frac{d\sigma_c(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.5)$$

El principio de superposición muestra un buen comportamiento para las siguientes situaciones:

- Tensiones dentro del rango $\sigma \leq 0,4f_c$
- ε no decreciente (no así necesariamente σ)
- Pieza sin un secado intenso
- No existan variaciones fuertes de σ

Cuando estas hipótesis no se verifican, el principio de superposición comienza a alejarse del comportamiento real siendo necesario acudir a modelos y leyes constitutivas de comportamiento no lineal. Normalmente, los casos que deben resolverse en los problemas de ingeniería civil suelen cumplir las hipótesis anteriores, por lo que el principio de superposición suele aceptarse en la mayoría de los análisis.

Métodos de cálculo

La resolución de la 2.5 implica el conocimiento de la variación de la tensión con el tiempo, lo cual no suele ser la situación habitual en las secciones de hormigón estructural.

Dicha ecuación puede resolverse de forma numérica discretizando el tiempo total en una serie de intervalos suficientemente pequeños en los que se pueda considerar la tensión constante, dando lugar a los procedimientos “paso a paso”. De esta forma se obtiene una ecuación del tipo:

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} [1 + \varphi(t, t_0)] + \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_c(t_i) \frac{1 + \varphi(t, t_i)}{E_c(t_i)} \quad (2.6)$$

Esta metodología es la más general, aunque su uso está enfocado al empleo de computadores y problemas que requieran una cierta precisión ya que la carga de cálculos y tiempo son considerables. El principal inconveniente de este método deriva de la necesidad de conocer la historia de tensiones en cada intervalo de tiempo y para cada fibra lo cual, en determinados casos, puede provocar problemas de capacidad de almacenamiento de datos.

Existen métodos basados en la formulación de la fluencia mediante series de *Dirichlet* de m términos:

$$\rho(t, t - \tau) = \sum_{i=1}^m a_i(\tau) [1 - e^{-\lambda_i(t-\tau)}] \quad (2.7)$$

donde $a_i(\tau)$ son los parámetros de envejecimiento que dependen de la edad del hormigón en el instante de carga y λ_i son coeficientes que gobiernan la forma de la función decreciente. La metodología permite obtener unas relaciones recurrentes, que evitan el almacenamiento de la historia tensional, siendo solamente necesario conocer la tensión y un parámetro interno correspondiente al intervalo de cálculo anterior.

Los procedimientos *paso a paso* obligan a la discretización del tiempo en una serie de intervalos. La mayor eficacia numérica se obtiene usando períodos en los que la deformación diferida sea similar, lo cual conduce a intervalos de longitud creciente, ya que la función de fluencia crece rápidamente en los instantes cercanos a los de la aplicación de la carga y va disminuyendo con el tiempo. Los incrementos de tensión pueden aplicarse al principio del intervalo o en un punto medio del mismo, como se hace en esta tesina. Aunque habitualmente la precisión aumenta al disminuir la duración de las etapas de cálculo, parece que la inclusión en el centro del intervalo proporciona resultados más ajustados frente a diversas tipologías de variación tensional.

Existen otros procedimientos simplificados que permiten resolver la 2.5, en los que se supone una cierta variación de la tensión en el tiempo, evitando la discretización en pequeños períodos de tiempo. El *Método del Módulo Efectivo*, se basa en la utilización de un módulo de deformación reducido, considerando que la tensión del hormigón permanece constante. El *Método de la Tensión Media* supone una variación lineal de la tensión en el intervalo considerado, tomando para el cálculo la tensión media. El *Método del Módulo Efectivo Ajustado a la Edad* se basa en la utilización de un módulo de deformación reducido, afectando el coeficiente de fluencia por un parámetro $\chi(t, t_0)$, coeficiente de envejecimiento, y supone la adopción de una determinada ley de variación gradual de la tensión con el tiempo, siendo usual adoptar la de la relajación del hormigón sometido a deformación constante.

Principales métodos de cálculo bajo el principio de superposición

Como ya se ha expuesto, existen una gran cantidad de métodos para el cálculo de los efectos que producen las deformaciones diferidas en el hormigón. Entre los mismos, los más empleados actualmente así como los principales métodos clásicos son los siguientes:

1. Métodos paso a paso.
2. Método de Dischinger.
3. Método de Dischinger mejorado.
4. Método del módulo efectivo.
5. Método del coeficiente de envejecimiento.
6. Método de las j 's.

La descripción detallada de los métodos bajo el principio de superposición no es objeto de este trabajo, salvo la descripción del Método del Coeficiente de Envejecimiento cuya presentación se realiza en el apéndice A de este mismo informe.

2.2.2.4. Deformaciones de origen térmico

Las deformaciones uniaxiales debidas a los incrementos de temperatura en cualquiera de los materiales que componen la sección pueden expresarse por:

$$\varepsilon_T = \alpha \Delta T \quad (2.8)$$

donde ΔT es la variación de temperatura en el período de tiempo considerado y α el coeficiente de dilatación lineal del material. El perfil de temperatura en la sección puede influir en las tensiones y deformaciones que se originen.

2.3. Acero pasivo y estructural

Respecto al acero pasivo y estructural⁵, al trabajar ambos bajo cargas de servicio a unas tensiones relativamente bajas, puede suponerse que las deformaciones que experimentan no provocarán que abandonen el rango de comportamiento elástico lineal y que la fluencia y la relajación que en los mismos se produce sean despreciables. Por tanto su ecuación constitutiva en el régimen lineal puede expresarse como sigue para cualquier instante:

$$\forall t \Rightarrow \sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad (2.9)$$

De esta forma, puede suponerse además que cualquier incremento de tensión posterior también proporcionará un incremento de deformación según la respuesta lineal:

$$\Delta \sigma_s = E_s \Delta \varepsilon_s \rightarrow \Delta \varepsilon_s = \frac{\Delta \sigma_s}{E_s} \quad (2.10)$$

Fuera de la zona lineal, el acero entra en régimen plástico. Para el cálculo suele emplearse, simplificada, un diagrama elástico- perfectamente plástico lo que suele ser razonable y simplifica la caracterización del mismo (no considerando los fenómenos de endurecimiento por deformación, efecto Bauschinger,...).

⁵ De aquí en adelante se distinguirá entre acero pasivo y estructural, siendo el primero el que se utiliza en forma de barras para reforzar el hormigón y el segundo el que se utiliza en forma de perfiles o chapas para ser soldadas.

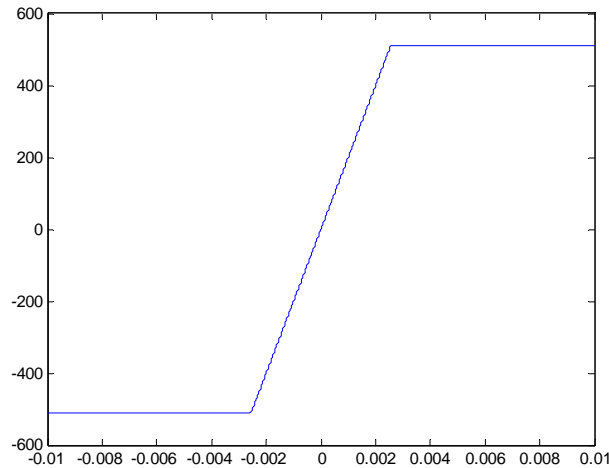


Figura 2.4. Diagrama tensión-deformación del acero

2.4. Acero activo

El acero activo presenta un comportamiento más complejo de modelizar que el del acero pasivo o estructural. Su caracterización bajo carga instantánea suele realizarse mediante diagramas de tipo Ramberg – Osgood o bien del tipo trilineal. En cuanto a su comportamiento diferido, al estar solicitado en servicio a una tensión elevada, si experimenta un fenómeno de fluencia, lo que originará un proceso de relajación a longitud variable.

Por tanto, se tiene a t_o y para un incremento de deformación ε_p en la fibra de pretensado, una tensión total correspondiente a ese incremento más la de tesado inicial:

$$\sigma_p = E_p (\varepsilon_p + \varepsilon_{p,0}) \rightarrow \varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} - \varepsilon_{p,0} \quad (2.11)$$

Sin embargo, esa tensión inicial sufre un proceso de relajación en el tiempo, por lo que para un tiempo $t > t_o$ debe considerarse:

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\Delta \sigma_p - \Delta \sigma_{pr}}{E_p} \quad (2.12)$$

Comprando esta ecuación con la de los aceros pasivos y estructurales, se observa la existencia de un término $\Delta \sigma_{pr}$ el cual representa la tensión relajada. En realidad ese término representa un incremento de tensión sin aumento de la carga.

El estudio del término proveniente de la relajación puede hacerse de diferentes formas. Si la longitud del elemento donde se ancla es constante a lo largo del tiempo, el problema que se presenta es de relajación intrínseca y puede expresarse como:

$$\varepsilon_0 = cte \rightarrow \dot{\varepsilon} = 0 \quad (2.13)$$

$$\dot{\varepsilon}_{pl} + \dot{\varepsilon}_{el} = 0 \quad (2.14)$$

Sin embargo, el problema de la relajación en los aceros de pretensar es ligeramente más complejo debido a que el proceso no es de relajación intrínseca, es decir, la longitud del elemento sobre el que se encuentra anclado el pretensado varía con el tiempo. Por lo tanto, para aproximarse al mismo deben realizarse otro tipo de planteamientos.

2.4.1. Comportamiento diferido. Métodos de cálculo

La evaluación de la relajación a longitud variable en el acero de pretensar puede efectuarse según diferentes métodos de cálculo. A continuación se presentan dos cuyos resultados han sido además sancionados en numerosas ocasiones por la práctica.

2.4.1.1. Método del coeficiente de relajación

Una de las maneras más extendidas de abordar el cálculo de la relajación variable de un acero de pretensar es a través del coeficiente de relajación χ_r . Este planteamiento traslada el problema real, en definitiva, a uno de relajación intrínseca donde se utiliza una tensión inicial reducida. El valor a partir del cual debe considerarse la importancia del fenómeno de la relajación intrínseca es una relación σ_{p0}/f_{ptk} superior a 0,40.

$$\Delta\sigma_{pr} = \begin{cases} -\eta_t \sigma_{p0} (\lambda - 0,40)^2 \rightarrow \lambda \geq 0,40 \\ 0 \rightarrow \lambda < 0,40 \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\text{Donde: } \lambda = \frac{\sigma_{p0}}{f_{ptk}} \quad (2.14)$$

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:

$$\chi_r = \int_{\xi=1}^{\xi=1} (1 - \Omega\xi) \left(\frac{\lambda(1 - \Omega\xi) - 0,40}{\lambda - 0,40} \right)^2 d\xi \quad (2.15)$$

$$\text{Donde: } \Omega = -\frac{\Delta\sigma_{ps}(t) - \Delta\sigma_{pr}(t)}{\Delta\sigma_{p0}} \quad (2.16)$$

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 χ_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 χ_r .

Sin embargo, tomando un valor de χ_r comprendido entre [0,70-0,80] se obtiene una aproximación correcta en la mayoría de los casos y no suele ser necesario realizar sucesivas iteraciones.

2.4.1.2. Método del tiempo ficticio

Se puede abordar el mismo problema de la relajación a longitud variable tratando las pérdidas por relajación a partir de los datos obtenidos de relajación intrínseca pero sin utilizar la tensión reducida. Para ello, se parte de una curva de relajación a mayor tensión y se va pasando a curvas de menor tensión a lo largo del tiempo empleando en este proceso un tiempo ficticio tal que la relajación para un tiempo de la primera curva sea igual que la obtenida para la suma de ese tiempo más el ficticio en la segunda. Este método a pesar de estar menos extendido que el primero, proporciona resultados correctos para el cálculo de la relajación a longitud variable.

2.5. Conclusiones

En este capítulo se ha revisado el fenómeno de las deformaciones instantáneas y diferidas de los materiales de manera que puedan conocerse las variables implicadas en los mismos y el grado de precisión esperable en su respuesta. También se ha presentado posibilidades para la modelización de dichos fenómenos.

Primeramente se ha hecho un breve repaso de los principales fenómenos reológicos que se dan en el hormigón haciendo una exposición separada de las deformaciones por retracción y las de fluencia. Una separación que se hace por mero convenio, pues en definitiva tienen el origen común en microestructura de la pasta de cemento.

Se han presentado los factores que influyen en dichas deformaciones de retracción y de fluencia mostrando la importancia relativa de cada uno de ellos y el grado de implicación en estas deformaciones. Del mismo modo, se ha citado los principales códigos que recogen formulaciones, más o menos acertadas, para abordar el cálculo de estas deformaciones reológicas.

También se ha pasado revista a los principales métodos de cálculo bajo el principio de superposición para abordar el problema de las deformaciones diferidas atensionales del hormigón.

Por último, se ha repasado el comportamiento instantáneo y diferido de los demás materiales que pueden formar parte de la sección: acero estructural, activo y pasivo.

Se puede percibir en todo esto que la resolución del problema de las deformaciones diferidas en los materiales y el trabajo conjunto de los mismos está rodeado de numerosas variables, muchas veces imposible de controlar y cuantificar. Esto afectará a los resultados obtenidos, no obstante, con el potencial de cálculo del que se dispone en la actualidad y la constante investigación hace que cada vez se pueda controlar más esta imprecisión y cubrir las lagunas que existen.

En este trabajo se quiere, dentro de los objetivos ya planteados, contribuir en esta tarea y facilitar poco a poco el desarrollo de modelos de cálculo y software para abordar estos problemas.