

**UNIDAD DIDÁCTICA IV**

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN**

**PRETENSADO**

**LECCIÓN 16**

**CONSIDERACIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE**

**ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN**

1. IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA
2. TIPOS DE ANÁLISIS
3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA E.L.U.
4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA E.L.S.
5. ASPECTOS ESPECÍFICOS DEL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN
6. ANÁLISIS EN EL TIEMPO
7. REGIONES B Y D

## 1. IDEALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

- **Modelos estructurales**
  - Unidimensionales: estructuras de barras (pórticos, emparrillados)
  - Bidimensionales: placas, láminas, lajas
  - Tridimensionales
- **Luz de cálculo:** distancia entre ejes de apoyo  $\leq$  luz libre + canto del elemento
- **Secciones transversales:**
  - **Sección bruta:** sección real sin descontar las armaduras
  - **Sección neta:** sección bruta descontando el hueco para el paso de las armaduras activas o sus anclajes, solidarizando (convirtiendo a un único material) las armaduras pasivas
  - **Sección homogeneizada:** sección neta solidarizando las armaduras activas adherentes y todos los hormigones existentes
  - **Sección fisurada:** zona comprimida de hormigón + armaduras solidarizadas
- **Ancho eficaz del ala en piezas lineales con sección en T**
  - Simplificadamente para comprobación seccional, las tensiones normales se distribuyen uniformes en un ancho reducido de las alas llamado ancho eficaz

## 2. TIPOS DE ANÁLISIS

- **Lineal**
  - Adecuado para **comprobar y dimensionar** en E.L.S. y E.L.U., cuando los efectos de 2º orden sean despreciables
  - Consideración del equilibrio de la **estructura sin deformar**
  - Comportamiento **elástico y lineal de los materiales** → No se considera la fisuración, empleándose la sección bruta en el cálculo de solicitaciones
  - Proporciona una **solución equilibrada**
  - Requiere cierta **ductilidad** de las secciones que permita los esfuerzos obtenidos
  - Existen programas comerciales muy completos

- **No lineal**
  - Sirve para **comprobar** en ELS y ELU, pero **NO para dimensionar** (es necesario conocer el armado previamente)
  - Consideración del equilibrio de la **estructura deformada**
  - **No linealidad del material** (fisuración del hormigón y plastificación del acero) y **no linealidad geométrica**
  - Proporciona una **solución equilibrada y compatible**
  - El **comportamiento dúctil** de la estructura está **incluido** en los modelos
  - Existen algunos programas muy potentes (ABAQUS, SAP, ...)
  
- **Lineal seguido de redistribución limitada**
  - Permite el dimensionamiento y comprobación **SÓLO para ELU**
  - Aplicable a estructuras **reticulares planas, forjados y placas unidirecc.**
  - Análisis lineal con **redistribución** posterior (incremento o disminución) de los esfuerzos
  - Proporciona una **solución equilibrada**
  - Requiere el comportamiento **dúctil** de las secciones que garantice las redistribuciones adoptadas
  - Algunos programas comerciales permiten redistribución
  - En **vigas y placas continuas**: 
$$r = 56 - 125 \frac{x}{d} \begin{cases} \neq 30\% \text{ aceros SD} \\ \neq 20\% \text{ aceros S} \end{cases}$$
    - $r$  = Porcentaje máximo de redistribución del momento de la sección crítica
    - Art. 21 → Cálculo simplificado  $x/d$  función de  $\omega$ ,  $\omega'$  (cuantía mec.  $A_s, A'_s$ )
    - Anejo 7 → Dimensionamiento de secciones para un  $x/d$  prefijado
  - En **forjados unidireccionales**: leyes envolventes de flectores donde se igualan, en valor absoluto, los momentos en los apoyos y en el vano
  
- **Plástico**
  - Sólo para **comprobación en E.L.U.**
  - **NO** se puede utilizar cuando existan **efectos de 2º orden**

- Comportamiento **plástico, elasto-plástico o rígido-plástico** de los materiales
- Se ha de cumplir, al menos, **uno de los teoremas básicos de la plasticidad**:
  - Límite inferior: la capacidad calculada, correspondiente a un sistema de esfuerzos equilibrado con las cargas aplicadas, es siempre menor o igual que la capacidad portante real
  - Límite superior: la capacidad calculada, correspondiente a un sistema de esfuerzos equilibrado al formarse el número suficiente de rótulas para que la estructura se convierta en un mecanismo, es siempre mayor o igual que la capacidad portante real
- Requiere el comportamiento **dúctil** de las secciones para garantizar la formación del mecanismo de colapso planteado en el cálculo

### **3. ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA E.L.U.**

- **Obtención de las acciones aplicadas**
- **Cálculo de esfuerzos**
  - Estructuras isostáticas → Equilibrio
  - Estructuras hiperestáticas → Análisis lineal o análisis lineal seguido de redistribución limitada
  - Estructuras esbeltas → Análisis no lineal
- **Esfuerzos de agotamiento**
  - Valores límite de tensiones o deformaciones → Modelos de comportamiento en rotura (comportamiento no lineal de los materiales: plastificación, fisuración, ...)
  - Los esfuerzos de agotamiento se comparan con los esfuerzos de cálculo

### **4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA E.L.S.**

- **Obtención de las acciones aplicadas**
- **Cálculo de esfuerzos**
  - Estructuras isostáticas → Equilibrio
  - Estructuras hiperestáticas → Análisis lineal
- **Cálculo de la respuesta en servicio**

- Cálculo de secciones (tensiones y deformaciones)
- Cálculo de abertura de fisuras
- Cálculo de flechas
- La respuesta en servicio (tensiones, deformaciones, abertura de fisuras, flechas) se compara con ciertos valores límite

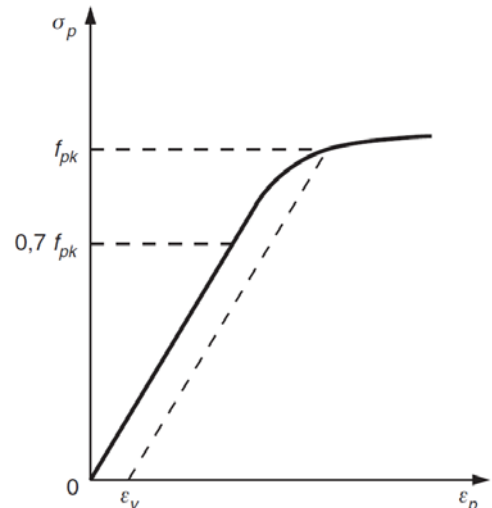
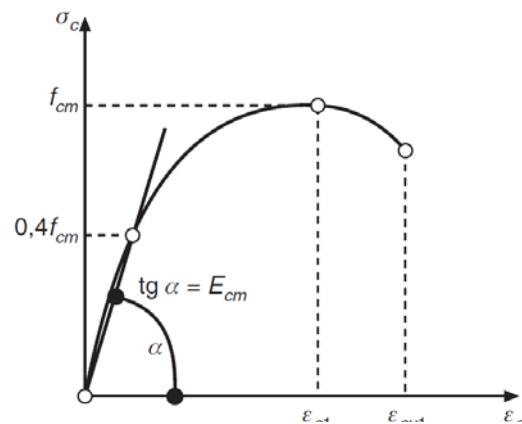
## **5. ASPECTOS ESPECÍFICOS DEL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN**

### **Pretensado**

- Sistema de fuerzas, de resultante nula, aplicado a la estructura:
  - Genera tensiones y deformaciones previas a la puesta en carga
  - Provoca situaciones de proyecto diferenciadas
  - Pérdidas de pretensado
  - Esfuerzos de pretensado
- Armadura predeformada en el momento de conectarse con el hormigón
  - Contribuye a la capacidad resistente

### **Comportamiento no lineal de los materiales**

- Hormigón
  - Respuesta no lineal en compresión
  - Fisuración en tracción
  - Deformaciones diferidas
    - Retracción
    - Fluencia
- Acero
  - Respuesta no lineal
  - Relajación de armaduras activas



### **Efectos de segundo orden**

- Dependen de las deformaciones

Fuente: EHE-08, 2011

- Los esfuerzos son dependientes del comportamiento del material
- Modelo muy complejo

### Deformaciones diferidas

- **Retracción:** sólo se produce en el hormigón
  - Estructura: se producen esfuerzos si están coartados los movimientos del hormigón
  - Sección armada: redistribución de tensiones internas: las armaduras se comprimen
  - Sección pretensada: pérdida de pretensado
- **Relajación:** sólo se produce en la armadura activa
  - Sección pretensada → pérdida de pretensado

### Fluencia

- Si  $E_c$  fuera constante, el diagrama de momentos flectores no depende de  $E_c$
- Pero  $E_c(t)$  disminuye con el tiempo:
  - Estructura isostática: produce mayores flechas
  - Estructura hiperestática: se producen variaciones de esfuerzos si:
    - se producen deformaciones impuestas (descensos de apoyo)
    - coexisten materiales de diferente comportamiento diferido
    - la construcción es evolutiva (avance por voladizos sucesivos, construcción vano a vano)
  - Sección armada: redistribución de tensiones internas
  - Sección pretensada: pérdida de pretensado

## 6. ANÁLISIS EN EL TIEMPO

- **Hipótesis generales**
  - Para cada tipo de hormigón se aplica un valor medio del coeficiente de fluencia y retracción para toda la masa.
  - Se aplica el principio de superposición de cargas.

- Se considera fluencia lineal (deformaciones de fluencia proporcionales a las tensiones aplicadas).
- Tensiones en el hormigón  $\leq 0,45f_{cj}$
- **Método general: Análisis paso a paso en el tiempo**

Ecuación constitutiva del hormigón en el tiempo ( $\tau$ ):

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{cs}(t) + \frac{\sigma_o}{E_c(t_o)} + \varphi(t, t_o) \cdot \frac{\sigma_o}{E_c(28)} + \int_{\sigma_o}^{\sigma(t)} \left[ \frac{1}{E_c(\tau)} + \frac{\varphi(t, \tau)}{E_c(28)} \right] \cdot d\sigma(\tau)$$

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{cs}(t) + \frac{\sigma_o}{E_c(t_o)} + \varphi(t, t_o) \cdot \frac{\sigma_o}{E_c(28)} + \sum_1^n \left[ \frac{1}{E_c(t_i)} + \frac{\varphi(t, t_i)}{E_c(28)} \right] \cdot \Delta\sigma(t_i)$$

- **Método simplificado del coeficiente de envejecimiento o del módulo ajustado a la edad**

- La deformación por la variación de la tensión del hormigón en el tiempo se aproxima como si la tensión, aplicada en un instante intermedio, fuera constante
- La fluencia debida a la variación de tensiones entre  $t_0$  y  $t$  se aproxima mediante el coeficiente de envejecimiento  $\chi$  entre  $t_0$  y  $t$  ( $\chi = 0,8$  para  $t_{\infty}$ )

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{cs}(t) + \frac{\sigma_o}{E_c(t_o)} + \varphi(t, t_o) \cdot \frac{\sigma_o}{E_c(28)} + \left[ \frac{1 + \chi(t, t_o) \cdot \varphi(t, t_o)}{E_c(28)} \right] \cdot (\sigma(t) - \sigma_o)$$

- Aplicación: Cálculo simplificado de  $S_{\infty}$  (esfuerzos a  $t_{\infty}$ ) en estructuras que sufren cambios en las condiciones de apoyo (construcción vano a vano, construcción por voladizos sucesivos, descensos de apoyos, etc.):

$$S_{\infty} = S_0 + (S_c - S_0) \frac{\varphi(\infty, t_0) - \varphi(t_c, t_0)}{1 + \chi\varphi(\infty, t_c)}$$

$S_0$  = esfuerzos al final del proceso constructivo (esfuerzos iniciales)

$S_c$  = esfuerzos si la estructura se construyese sobre cimbra (si entrase en carga de una sola vez)

$t_0$  = edad del hormigón al aplicar la carga

$t_c$  = edad del hormigón al producirse el cambio en las condiciones de apoyo

## **7. REGIONES B Y D**

- **Regiones B:** En ellas son válidas las hipótesis de Navier-Bernouilli o Kirchhoff.
- **Regiones D:** En ellas no son aplicables las hipótesis de Navier-Bernouilli o Kirchhoff.
- **Cálculo elástico y lineal**
  - Obtención del campo de tensiones mediante métodos numéricos (MEF)
  - Hipótesis de comportamiento elástico y lineal
  - No es necesario conocer el armado previamente
  - La armadura se coloca siguiendo las trayectorias de tracción
- **Método de las bielas y tirantes**
  - Sustitución de los campos de tensiones por trayectorias de compresión y de tracción, conformando una estructura interna articulada de barras (bielas y tirantes)
  - Hipótesis de comportamiento plástico de los materiales
  - El proyectista decide la posición de la armadura
- **Análisis no lineal**
  - Obtención del campo de tensiones mediante métodos numéricos (MEF)
  - Hipótesis de comportamiento fisurado y no lineal de los materiales
  - Es necesario conocer el armado de la región previamente