



# CAPÍTULO XI

## CÁLCULOS RELATIVOS A LOS ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO

### Artículo 49.º Estado Límite de Fisuración

#### 49.1 Consideraciones generales

Para las comprobaciones relativas al Estado Límite de Fisuración, los efectos de las acciones están constituidos por tensiones en las secciones ( $\sigma$ ) o las aberturas de fisura ( $w$ ) que aquéllas ocasionan, en su caso.

En general, tanto  $\sigma$  como  $w$  se deducen a partir de las acciones de cálculo y las combinaciones indicadas en el Capítulo III para los Estados Límite de Servicio.

Las solicitaciones se obtendrán a partir de las acciones, según lo expuesto en el Capítulo V. Las tensiones, aberturas de fisuras u otros criterios de comprobación se evaluarán según las prescripciones que se indican en los apartados siguientes.

#### 49.2. Fisuración por solicitaciones normales

##### 49.2.1. Aparición de fisuras por compresión

En todas las situaciones persistentes y en las situaciones transitorias bajo la combinación más desfavorable de acciones correspondiente a la fase en estudio, las tensiones de compresión en el hormigón deben cumplir:

$$\sigma_c \leq 0,60 f_{ck,j}$$

donde:

$\sigma_c$  Tensión de compresión del hormigón en la situación de comprobación.

$f_{ck,j}$  Valor supuesto en el proyecto para la resistencia característica a  $j$  días (edad del hormigón en la fase considerada).

##### 49.2.2. Estado Límite de Descompresión

Los cálculos relativos al Estado Límite de Descompresión consisten en la comprobación de que, bajo la combinación de acciones correspondiente a la fase en estudio, no se alcanza la descompresión del hormigón en ninguna fibra de la sección.

##### 49.2.3. Fisuración por tracción. Criterios de comprobación

La comprobación general del Estado Límite de Fisuración por tracción consiste en satisfacer la siguiente inequación:

$$w_k \leq w_{max}$$

donde:

- $w_k$  Abertura característica de fisura.  
 $w_{m\acute{a}x}$  Abertura máxima de fisura definida en la tabla 5.1.1.2.

Esta comprobación sólo debe realizarse cuando la tensión en la fibra más traccionada supere la resistencia media a flexotracción  $f_{ctm,fl}$  de acuerdo con 39.1.

#### 49.2.4 Método general de cálculo de la abertura de fisura

La abertura característica de fisura se calculará mediante la siguiente expresión:

$$w_k = \beta s_m \varepsilon_{sm}$$

donde:

- $\beta$  Coeficiente que relaciona la abertura media de fisura con el valor característico y vale 1,3 para fisuración producida por acciones indirectas solamente y 1,7 para el resto de los casos.

- $s_m$  Separación media de fisuras, expresada en mm.

$$s_m = 2c + 0,2s + 0,4k_1 \frac{\phi A_{e,eficaz}}{A_s}$$

- $\varepsilon_{sm}$  Alargamiento medio de las armaduras, teniendo en cuenta la colaboración del hormigón entre fisuras.

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[ 1 - k_2 \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \geq 0,4 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

- $c$  Recubrimiento de las armaduras traccionadas.

- $s$  Distancia entre barras longitudinales. Si  $s > 15\phi$  se tomará  $s = 15\phi$ .  
 En el caso de vigas armadas con  $n$  barras, se tomará  $s = b/n$  siendo  $b$  el ancho de la viga.

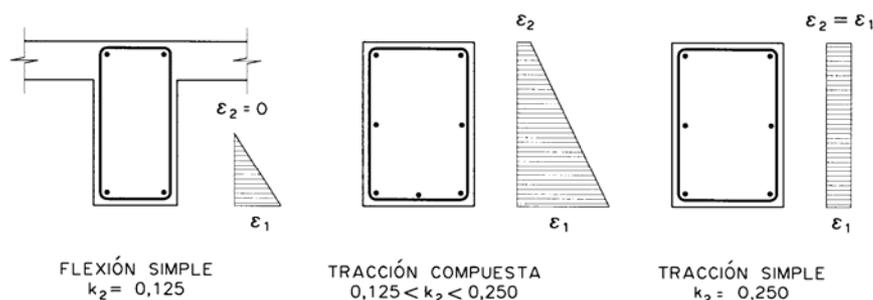
- $k_1$  Coeficiente que representa la influencia del diagrama de tracciones en la sección, de valor

$$k_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{8 \varepsilon_1}$$

donde  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  son las deformaciones máxima y mínima calculadas en sección fisurada, en los límites de la zona traccionada (figura 49.2.4.a).

Figura 49.2.4.a

- $\varnothing$  Diámetro de la barra traccionada más gruesa o diámetro equivalente en el caso de grupo de barras.
- $A_{c, eficaz}$  Área de hormigón de la zona de recubrimiento, definida en la figura 49.2.4.b, en donde las barras a tracción influyen de forma efectiva en la abertura de las fisuras.
- $A_s$  Sección total de las armaduras situadas en el área  $A_{c, eficaz}$ .
- $\sigma_s$  Tensión de servicio de la armadura pasiva en la hipótesis de sección fisurada.



- $E_s$  Módulo de deformación longitudinal del acero.
- $k_2$  Coeficiente de valor 1,0 para los casos de carga instantánea no repetida y 0,5 para los restantes.
- $\sigma_{sr}$  Tensión de la armadura en la sección fisurada en el instante en que se fisura el hormigón, lo cual se supone que ocurre cuando la tensión de tracción en la fibra más traccionada de hormigón alcanza el valor  $f_{ctm,fl}$  (apartado 39.1).

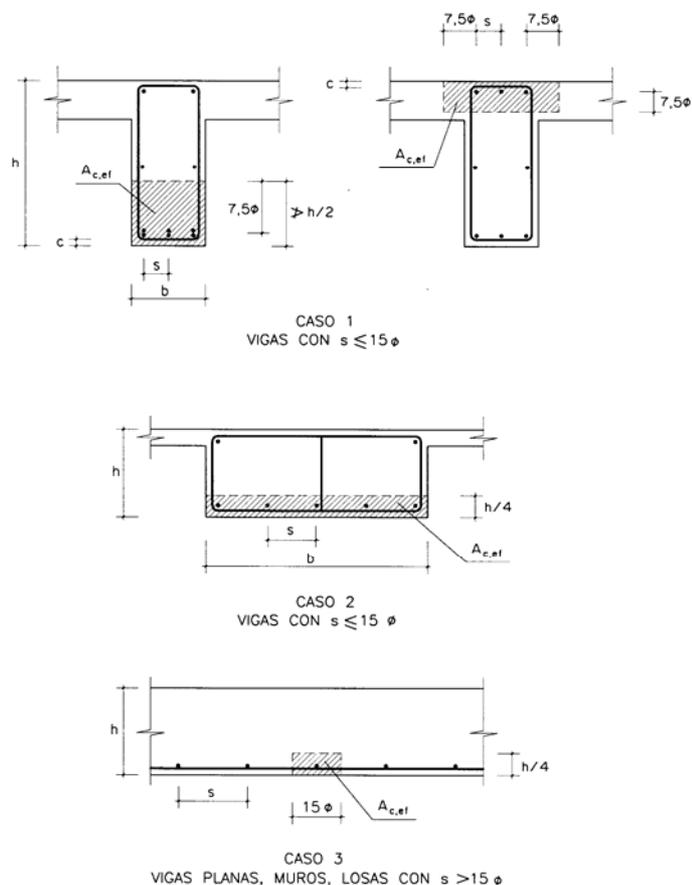


Figura 49.2.4.b

Para el caso de piezas hormigonadas contra el terreno, podrá adoptarse para el cálculo del ancho de fisura, el recubrimiento nominal correspondiente a la clase de exposición, de acuerdo con la tabla 37.2.4.1.a, b, y c.

### 49.3. Limitación de la fisuración por esfuerzo cortante

En general, si se cumplen las indicaciones del Artículo 44º Estado Límite Último frente a Cortante, el control de la fisuración en servicio está asegurado sin comprobaciones adicionales.

### 49.4. Limitación de la fisuración por torsión

En general, si se cumplen las indicaciones del Artículo 45º. Estado Límite de Agotamiento por torsión en elementos lineales, el control de la fisuración en servicio está asegurado sin comprobaciones adicionales.



## **Artículo 50.º Estado Límite de Deformación**

### **50.1. Consideraciones generales**

El Estado Límite de Deformación se satisface si los movimientos (flechas o giros) en la estructura o elemento estructural son menores que unos valores límites máximos.

La comprobación del Estado Límite de Deformación tendrá que realizarse en los casos en que las deformaciones puedan ocasionar la puesta fuera de servicio de la estructura o elemento estructural por razones funcionales, estéticas u otras.

El estudio de las deformaciones debe realizarse para las condiciones de servicio que correspondan, en función del problema a tratar, de acuerdo con los criterios de combinaciones expuestos en 13.3.

La deformación total producida en un elemento de hormigón es suma de diferentes deformaciones parciales que se producen a lo largo del tiempo por efecto de las cargas que se introducen, de la fluencia y retracción del hormigón y de la relajación de las armaduras activas.

Las flechas deberán mantenerse dentro de los límites establecidos por la reglamentación específica vigente o, en su defecto, los valores acordados por la Propiedad y el Autor del proyecto. A tal fin, el proyectista deberá dimensionar la estructura con la rigidez suficiente y, en casos extremos, exigir que se lleve a cabo un proceso constructivo que minimice la parte de la flecha total que puede dañar a los elementos no estructurales.

### **50.2. Elementos solicitados a flexión simple o compuesta**

#### **50.2.1. Método general**

El procedimiento más general de cálculo de flechas consiste en un análisis estructural paso a paso en el tiempo, de acuerdo con los criterios del Artículo 25º, en el que, para cada instante, las deformaciones se obtienen mediante doble integración de las curvaturas a lo largo de la pieza.

#### **50.2.2. Método simplificado**

Este método es aplicable a vigas, losas de hormigón armado y forjados unidireccionales. La flecha se considera compuesta por la suma de una flecha instantánea y una flecha diferida, debida a las cargas permanentes.

##### **50.2.2.1. Cantos mínimos**

En vigas y losas de edificación, no será necesaria la comprobación de flechas cuando la relación luz/canto útil del elemento estudiado sea igual o inferior al valor indicado en la tabla 50.2.2.1.a Para vigas o losas aligeradas con sección en T, en que la relación entre la anchura del ala y del alma sea superior a 3, las esbelteces  $L/d$  deben multiplicarse por 0,8.



Tabla 50.2.2.1.a Relaciones  $L/d$  en vigas y losas de hormigón armado sometidos a flexión simple

SISTEMA ESTRUCTURAL $L/d$	$K$	Elementos fuertemente Armados: $\rho=1,5\%$	Elementos débilmente Armados $\rho=0,5\%$
Viga simplemente apoyada. Losas uni o bidireccional simplemente apoyada	1,00	14	20
Viga continua <sup>1</sup> en un extremo. Losas unidireccional continua <sup>1,2</sup> en un solo lado	1,30	18	26
Viga continua <sup>1</sup> en ambos extremos. Losas unidireccional o bidireccional continua <sup>1,2</sup>	1,50	20	30
Recuadros exteriores y de esquina en losas sin vigas sobre apoyos aislados	1,15	16	23
Recuadros interiores en losas sin vigas sobre apoyos aislados	1,20	17	24
Voladizo	0,40	6	8

<sup>1</sup> Un extremo se considera continuo si el momento correspondiente es igual o superior al 85% del momento de empotramiento perfecto.

<sup>2</sup> En losas unidireccionales, las esbelteces dadas se refieren a la luz menor.

<sup>3</sup> En losas sobre apoyos aislados (pilares), las esbelteces dadas se refieren a la luz mayor.

En el caso particular de forjados de viguetas con luces menores que 7 m y de forjados de losas alveolares pretensadas con luces menores que 12 m, y sobrecargas no mayores que 4 kN/m<sup>2</sup>, no es preciso comprobar si la flecha cumple con las limitaciones de 50.1, si el canto total  $h$  es mayor que el mínimo  $h_{min}$  dado por:

$$h_{min} = \delta_1 \delta_2 L / C$$

siendo:

$\delta_1$  factor que depende de la carga total y que tiene el valor de  $\sqrt{q/7}$ , siendo  $q$  la carga total, en kN/m<sup>2</sup>;

$\delta_2$  factor que tiene el valor de  $(L/6)^{1/4}$ ;

$L$  la luz de cálculo del forjado, en m;

$C$  coeficiente cuyo valor se toma de la Tabla 50.2.2.1.b:

Tabla 50.2.2.1.b

Coeficientes C				
Tipo de forjado	Tipo de carga	Tipo de tramo		
		Aislado	Extremo	Interior
Viguetas armadas	Con tabiques o muros	17	21	24
	Cubiertas	20	24	27
Viguetas pretensadas	Con tabiques o muros	19	23	26
	Cubiertas	22	26	29
Losas alveolares pretensadas (*)	Con tabiques o muros	36	-	-
	Cubiertas	45	-	-

(\*) Piezas pretensadas proyectadas de forma que, para la combinación poco frecuente no llegue a superarse el momento de fisuración

### 50.2.2.2. Cálculo de la flecha instantánea

Para el cálculo de flechas instantáneas en elementos fisurados de sección constante, y a falta de métodos más rigurosos, se podrá usar, en cada etapa de la construcción, el siguiente método simplificado:

1. Se define como momento de inercia equivalente de una sección el valor  $I_e$  dado por:

$$I_e = \left( \frac{M_f}{M_a} \right)^3 I_b + \left[ 1 - \left( \frac{M_f}{M_a} \right)^3 \right] I_f \leq I_b$$

donde:

$M_a$  Momento flector máximo aplicado, para la combinación característica, a la sección hasta el instante en que se evalúa la flecha.

$M_f$  Momento nominal de fisuración de la sección, que se calcula mediante la expresión:

$$M_f = f_{ctm,fl} W_b$$

$f_{ctm,fl}$  Resistencia media a flexotracción del hormigón, según 39.1

$W_b$  Módulo resistente de la sección bruta respecto a la fibra extrema en tracción.

$I_b$  Momento de inercia de la sección bruta.

$I_f$  Momento de inercia de la sección fisurada en flexión simple, que se obtiene despreciando la zona de hormigón en tracción y homogeneizando las áreas de las armaduras activas y pasivas multiplicándolas por el coeficiente de equivalencia.

2. La flecha máxima de un elemento puede obtenerse mediante las fórmulas de Resistencia de Materiales, adoptando como módulo de deformación longitudinal del hormigón el definido en 39.6 y como momento de inercia constante para toda la pieza el que corresponde a la sección de referencia que se define a continuación:



- a) En elementos simplemente apoyados la sección central.
- b) En elementos en voladizo, la sección de arranque.
- c) En vanos internos de elementos continuos

$$I_e = 0,50 I_{ec} + 0,25 I_{ee1} + 0,25 I_{ee2}$$

donde:

- $I_{ec}$  Inercia equivalente de la sección de centro de vano.
- $I_{ee}$  Inercia equivalente de la sección de apoyos.

- d) En vanos extremos, con continuidad solo en uno de los apoyos,

$$I_e = 0,75 I_{ec} + 0,25 I_{ee}$$

Para el cálculo de flechas instantáneas en elementos no fisurados de sección constante se utilizará la inercia bruta de la sección.

### 50.2.2.3. Cálculo de la flecha diferida

Las flechas adicionales diferidas, producidas por cargas de larga duración, resultantes de las deformaciones por fluencia y retracción, se pueden estimar, salvo justificación más precisa, multiplicando la flecha instantánea correspondiente por el factor  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho'}$$

donde:

- $\rho'$  Cuantía geométrica de la armadura de compresión  $A_s'$  referida al área de la sección útil,  $b_0 d$ , en la sección de referencia.

$$\rho' = \frac{A_s'}{b_0 d}$$

- $\xi$  Coeficiente función de la duración de la carga que se toma de los valores indicados seguidamente:

5 o más años	2,0
1 año	1,4
6 meses	1,2
3 meses	1,0
1 mes	0,7
2 semanas	0,5

Para edad  $j$  de carga y  $t$  de cálculo de la flecha, el valor de  $\xi$  a tomar en cuenta para el cálculo de  $\lambda$  es  $\xi_{(t)} - \xi_{(j)}$ .

En el caso de que la carga se aplique por fracciones  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , se puede adoptar como valor de  $\xi$  el dado por:



$$\xi = (\xi_1 P_1 + \xi_2 P_2 + \dots + \xi_n P_n) / (P_1 + P_2 + \dots + P_n)$$

### 50.3. Elementos solicitados a torsión

El giro de las piezas o elementos lineales sometidos a torsión podrá deducirse por integración simple de los giros por unidad de longitud deducidos de la expresión:

$$\theta = \frac{T}{0,3 E_c I_j} \quad \text{para secciones no fisuradas}$$
$$\theta = \frac{T}{0,1 E_c I_j} \quad \text{para secciones fisuradas}$$

donde:

- $T$  Torsor de servicio.
- $E_c$  Módulo de deformación longitudinal secante definido en 39.6.
- $I_j$  Momento de inercia a torsión de la sección bruta de hormigón.

### 50.4. Elementos solicitados a tracción pura

Las deformaciones en elementos sometidos a tracción pura pueden calcularse multiplicando el alargamiento medio unitario de las armaduras  $\varepsilon_{sm}$ , obtenido de acuerdo con 49.2.4, por la longitud del elemento.

## Artículo 51.º Estado Límite de Vibraciones

### 51.1. Consideraciones generales

Las vibraciones pueden afectar al comportamiento en servicio de las estructuras por razones funcionales. Las vibraciones pueden causar incomodidad en sus ocupantes o usuarios, pueden afectar al funcionamiento de equipos sensibles a este tipo de fenómenos, entre otros efectos.

### 51.2. Comportamiento dinámico

En general, para cumplir el Estado Límite de Vibraciones debe proyectarse la estructura para que las frecuencias naturales de vibración se aparten suficientemente de ciertos valores críticos.