

## **Capítulo 8 Cálculos necesarios para la comprobación de los estados límites. Estado Limite de Utilización.-**

### **8.1 Características de los materiales utilizados.-**

En todo el proceso anterior nuestro objetivo consistía en obtener una primera aproximación de la configuración de las armaduras activas que con los datos utilizados resolviera el problema propuesto.

Para ello se utilizaron unas hipótesis y premisas empíricas para poder obtenerla. Entre ellas estaban:

- Las secciones tenían comportamiento elástico frente a las solicitaciones.
- Se habían utilizado sus características geométricas sin considerar secciones homogéneas, al estar constituidas por dos materiales con diferente modulo de elasticidad.
- Las Perdidas de la fuerza de pretensado se habían obtenido sobre la base de unos coeficientes teóricos, sin efectuar los cálculos correspondientes a la normativa.

Es en este punto donde debemos suministrar los datos de las características de los materiales necesarios para efectuar las comprobaciones requeridas por la normativa. Estos datos son:

- Resistencia característica del hormigón  $f_{ck}$  (FCK)
- Fracción de la resistencia característica a la puesta en tensión del hormigón (CJ)
- Coeficiente de ambiente para el calculo de la retracción y fluencia (ICOM) cuyos valores están comprendidos entre (1,4)

Con estos datos y las formulaciones correspondiente podemos definir las características de los materiales:

- FCJ resistencia del hormigón a la edad j en la puesta en tensión  
 $FCJ = CJ \times FCK$
- ECJ modulo de elasticidad instantáneo del hormigón a la edad j  
 $ECJ = 6600 \times \sqrt{FCJ}$  ; FCJ N/mm<sup>2</sup> para modulo tangente.
- EC modulo de elasticidad secante  $EC = 6000 \times \sqrt{FCJ}$  ; FCJ N/mm<sup>2</sup>
- EP modulo de deformación longitudinal del acero armaduras activas constante = 210 KN/mm<sup>2</sup>
- WT sección de armaduras activas  $WT = 3,1416 \times DIA^2 \times NC/4$  donde DIA diámetro de las armaduras activas y NC numero total de cables.

## 8.2 Cálculo de los valores característicos de la fuerza de pretensado.-

### 8.2.1 Creación de rutinas auxiliares de cálculo.

Nuestro siguiente punto es determinar el valor de la fuerza de pretensado calculando las pérdidas en las secciones tanto las instantáneas como las diferidas.

Cuando las enumeramos en el apartado correspondiente vimos que algunas de ellas dependían del estado de tensión de la sección, producido por la fase de aplicación de las cargas y las características de los materiales. Las otras tenían un cálculo empírico de formulación engorrosa que estaba recogido en la normativa y que puede ser cambiante de una normativa a otra y de una edición a otra, parece lógico independizar el código de estos cálculos y dejar en el código fuente una versión legible de la formulación de las pérdidas.

Es por eso que vamos a crear unas subrutinas que nos proporcionen los datos o parámetros que se utilizan en cálculo, en función de algunas características de las secciones y materiales de las que están constituidas.

Crearemos dos, una llamada TABL para recoger los coeficientes para el cálculo de la retracción y fluencia y otra que llamaremos TENS que nos devolverá las tensiones para la fase de vacío y cualquier otra situación de carga.

Empecemos por TABL. En el cálculo de la retracción la normativa la hacía proporcional a un coeficiente  $\varepsilon_{rf} = \beta_t \varepsilon_{01} \varepsilon_{02}$ , que escrito de acuerdo con nuestra notación será  $ERF = BT \times E01 \times E02$ . BT tomaba el valor 1 para el cálculo de las pérdidas finales y las E01 Y E02 eran dos coeficientes que dependían del ambiente de trabajo de la pieza y del espesor ficticio respectivamente.

Para la determinación de BT a cualquier edad del hormigón, se usaba la siguiente expresión

$$BT = EDAD^{0,875} / (EDAD^{0,875} + R_1) \quad \text{y} \quad R_1 \text{ venia dado } R_1 = 1,50 \times EMS^{R_2} \quad \text{y} \\ R_2 = 1,34 \times (1 - EDAD/6.10^4)(1 - 0,9/EDAD^2).$$

Crearemos una función B dentro de TABL que proporcionándole la EDAD y el espesor medio ficticio EMS como argumentos, evalúe el coeficiente BT de acuerdo a las formulaciones anteriores.

EMS se obtiene teniendo en cuenta que su valor es  $EMS = ALFA(ICOM) \times EMSP$  y que detallaremos al hablar de E02

Para E01 crearemos una tabla unidimensional de nombre TE01 que funcione con el índice ICOM, parámetro de ambiente proporcionado en los datos de entrada, cuyos valores están recogidos en la tabla correspondiente que describimos al hablar de la retracción. Se tiene :

$$E01 = -TE01(ICOM)$$

Para la determinación de E02 su formulación puede escribirse

$$E02 = 0,7 \times (EMS + 16)/(EMS + 8) ;$$

Donde  $EMS = ALFA(ICOM) \times EMSP$ ;  $ALFA(ICOM)$  es un vector individual que recoge los valores de alfa de acuerdo con la tabla del mismo nombre que se encuentra en la definición de la pérdida por retracción, De  $EMSP$  podríamos discutir aquí la ventaja de calcularlo individualizado para cada sección o crear un valor medio de la suma aritmética y hacerlo constante para todas las secciones, que parece lo mas adecuado debido a la forma de las mismas, en cualquier caso los resultados variaran poco.

Por consiguiente  $EMSP = 2 \times \frac{\sum_{I=1}^{NPAR+1} A(I)/PERI(I)}{NPAR + 1}$  que fue calculado con anterioridad en las propiedades geométricas de la sección.

En cuanto a la pérdida por fluencia sabemos que es proporcional a  $\phi_f$  valor final del coeficiente de fluencia, teniendo en cuenta la edad  $j$  del hormigón a partir de la introducción del pretensado y puede determinarse por:

$$FT = BA + FO1 \times FO2 \times (BTF - BTJ) + 0.4 \times BPTJ$$

Donde  $BA$  puede calcularse con la función  $BFA$  cuyo único argumento es la edad en que se pone el hormigón en carga y puede formularse por:

$$BFA = 0,8 \times (1 - RF)$$

$$RF = EDAD^{0,75} / (EDAD^{0,75} + 5,5)$$

El termino  $F01$  es un coeficiente dado por la tabla que vimos al hablar de la fluencia que depende del ambiente representado por  $ICOM$ , así como hicimos en los casos anteriores lo incluiremos como un vector  $TF0$  cuyo índice es la variable de ambiente,  $F01$  vendrá dado como :

$$F01 = TFO(ICOM)$$

El factor  $F02$  depende solo del espesor ficticio y puede evaluarse por la siguiente expresión

$$F02 = 1,12 \times (EMS + 31) / (EMS + 17)$$

El termino  $BTF$ ,  $BTJ$  que venían definidos por:

$$BTF = ((EDAD^{F_1} / (f^{F_1} + 21,5)) (1 + EMS^{1,7} / 26600) + 4EDAD^3 / (EDAD^5 + 2430))^{F_2}$$

Puede evaluarse creando una función que llamaremos  $BF$  cuyos argumentos serán  $EMS$ ,  $EDAD$ ,  $FC$  y que calculara de acuerdo con las siguientes formulaciones:

$$F1 = 1 - 0,12 \times EMS^{0,3}$$

$$RF2 = 10^{11} / (EDAD^3 + 10^{11})$$

$$BF = ((EDAD^{F1} / (FC^{F1} + 21.5)) \times (1 + EMS^{1,7} / 26600) + 4 \times EDAD^3 / (EDAD^5 + 2430))^{RF2}$$

La deformación elástica diferida BPTJ puede aproximarse mediante:

$$\beta'_{t-j} = ((t-j) + 10)/((t-j) + 40) - 9 \cdot 10^5 (t-j)^3 / ((t-j)^6 + (t-j)^3 10^7 + 10^{11}) .$$

El limite de esta expresión para  $t = \infty$  vale 1, que tomaremos como valor de BPTJ para las perdidas finales.

Resumiendo la subrutina TABL proporcionándole los parámetros ESMP, FCK, FCJ nos devolverá los parámetros necesarios para el calculo de los coeficientes finales de retracción y fluencia en los siguientes parámetros BT, E01, E02, F01, F02, BTF, BTJ.

Vamos a crear la segunda subrutina que nos proporcionara las tensiones a nivel de las fibras superiores e inferiores, así como la del centro de gravedad de la sección, para cualquier hipótesis de carga y características de la sección (bruta, neta, homogénea), con lo que será una herramienta a utilizar en todos los cálculos y comprobaciones que siguen.

Su nombre como ya dijimos será TENS y sus argumentos de salida ((CPV, CSV, CIV), (CPC, CSC, CIC)) el grupo terminado en V es el conjunto de tensiones producidas por la actuación aislada de la fuerza del pretensado, las terminadas en C representan el conjunto de tensiones que se produce por la actuación del pretensado y un estado de carga cualquiera. CP significa tensión en el centro de gravedad, CS en la fibra superior y CI en la inferior.

Como parámetros de entrada la subrutina tendrá:

|             |                                                                                                                                    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AT</b>   | Área de la sección a considerar (bruta, neta, homogénea)                                                                           |
| <b>PMT</b>  | Fuerza de pretensado (PKI)                                                                                                         |
| <b>EIM</b>  | Excentricidad del pretensado                                                                                                       |
| <b>YSVT</b> | Coordenada del centro de gravedad respecto al borde superior a considerar en la actuación del pretensado (bruta, neta, homogénea). |
| <b>YIVT</b> | Coordenada del centro de gravedad respecto al borde superior a considerar en la actuación del pretensado (bruta, neta, homogénea). |
| <b>NITP</b> | Momento de inercia a considerar en la actuación del pretensado (bruta, neta, homogénea) .                                          |
| <b>MFTM</b> | Momento flector aplicado a la sección (permanente, sobrecargas usuales, no usuales o cualquier combinación).                       |
| <b>YSCT</b> | Coordenada del centro de gravedad respecto al borde superior a considerar en la actuación del flector (bruta, neta, homogénea).    |
| <b>YICT</b> | Coordenada del centro de gravedad respecto al borde inferior a considerar en la actuación del flector (bruta, neta, homogénea).    |

**NITC** Momento de inercia a considerar en la actuación del flector (bruta, neta, homogénea).

**HT (I)** Altura de la sección.

La formulación es como se sigue:

$$\begin{aligned} \text{CSV} &= \text{PMT}/\text{AT} - \text{PMT} \times \text{EIM} \times \text{YSVT}/\text{NITP} \\ \text{CIV} &= \text{PMT}/\text{AT} + \text{PMT} \times \text{EIM} \times \text{YIVT}/\text{NITP} \\ \text{CIC} &= \text{CIV} - \text{MFTN} \times \text{YICT}/\text{NITC} \\ \text{CSC} &= \text{CSV} + \text{MFTN} \times \text{YSCT}/\text{NITC} \\ \text{CPV} &= (\text{CIV} - \text{CSV}) \times (\text{HT(I)} - \text{RC})/\text{HT(I)} + \text{CSV} \\ \text{CPC} &= (\text{CIC} - \text{CSC}) \times (\text{HT(I)} - \text{RC})/\text{HT(I)} + \text{CSC} \end{aligned}$$

### 8.2.2 Valores característicos y fases en la prefabricación.

Cuando hablamos del valor característico de la fuerza de pretensado decíamos que existían tantos como fases se considerasen en la vida de la pieza, en particular la norma exigía considerar dos de ellos, el de la puesta en tensión y estado final a tiempo  $\infty$ .

En las piezas prefabricadas por su tipo de fabricación, son estos dos estados los que realmente existen y a los que denominamos la fase de vació y la de servicio.

Las pérdidas a considerar se calcularan y se aplicaran como ya hemos hecho en cada uno de los estados y coinciden con las instantáneas para el primero y con las totales, instantáneas mas diferidas para el segundo.

### 8.2.3 Calculo de pérdidas en las secciones.

Vamos a calcular las pérdidas en la distintas secciones en que hemos dividido la pieza en  $\text{NPAR} + 1$  para ello utilizaremos un bucle que recorra el índice desde 1 a  $\text{NPART} + 1$  previamente habremos llamado a la subrutina TABL para establecer los coeficientes necesarios para el calculo.

Para la determinación de las mismas utilizaremos la sección bruta de la que ya conocemos todas sus características geométricas y mecánicas.

### 8.2.4 Pérdidas instantáneas.

De las que enunciamos al hablar de ellas solo tiene para nosotros interés la producida por el acortamiento elástico del hormigón, las pérdidas por rozamiento no son aplicables a este tipo de armaduras, las producidas por la penetración de cuñas, a efectos prácticos no se consideran.

### 8.2.5 Pérdidas por acortamiento elástico del hormigón AP3(I).

Si recordamos venia expresada por  $\Delta P_{i3} = \sigma_{cp} A_p E_p / E_{cj}$  en la que  $\sigma_{cp}$  es la tensión a nivel del centro de gravedad producida por la fuerza característica inicial que con nuestra nomenclatura es PM.

Si proporcionamos a TENS los argumentos de entada necesarios utilizando las características geométricas de la sección o sección bruta, nos devolverá en CPV la

tensión que buscamos que guardaremos en CCP(I) y podemos escribir con nuestra notación:

$$AP3(I) = CCP(I) \times WT \times EP/ECJ$$

En la que el resto de las variables ya conocemos su significado.

Ahora estamos en condiciones de calcular el valor característico de esta fuerza  $PKI(I) = PM - AP3(I)$  que nos servirá de fuerza característica en los cálculos posteriores.

### 8.2.6 Perdidas diferidas finales.

Serán calculadas suponiendo que la puesta en carga se realiza a los 7 días y que a los 10000 días se alcanza el valor final de estas perdidas.

### 8.2.7 Perdidas por Retracción APF4(I).

Utilizando los valores proporcionados por TABL podemos calcular ERF cuya expresión era  $ERF = BT \times E01 \times E02$ , ahora la pérdida puede evaluarse por:

$$AP4F(I) = ERF \times EP \times WT$$

Nótese que la retracción es común a todas las secciones.

### 8.2.8 Perdidas por Fluencia APF5(I).

Proporcionamos a EC su valor  $EC = 6000.FCK^{1/2}$ , para el calculo de la fluencia, valoramos FT por  $FT = BA + FO1 \times FO2 \times (BTF - BTJ) + 0.4 \times BPTJ$  donde  $BPTJ = 1$  y el resto de los coeficientes vienen calculados de TABL. Ahora para el calculo de APF5 debemos de suministrar a TENS los valores requeridos que cambian desde la llamada anterior estos son la fuerza de pretensado  $PMT = PKI(I)$ , y el momento flector, que utilizaremos el de la carga permanente  $MFTN = MFPR(I)$ . TENS nos proporcionara en el argumento CPC la tensión a nivel del centro de gravedad que guardaremos en  $CGCP(I) = CPC$ . Con estos datos podemos evaluar la perdida tal como sigue:

$$AP5F(I) = (FT \times CGCP(I) \times WT \times EP/EC)$$

### 8.2.9 Perdidas por relajación del acero de las armaduras activas APF6(I).

Como ya dijimos la evaluación de la relajación de acuerdo con la normativa Española es compleja puesto que los fabricantes no proporcionan la información requerida para ello aun como en este caso habiéndola solicitado varias veces.

Es por ello por lo que vamos a tomar como referencia la recomendación de la Asociación Científica del Pretensado (ASP), que a falta de justificaciones especiales admite para el acero que el relajamiento total puede considerarse  $1,5 \rho_{1000h}$ .

Esta recomendación es sencilla y practica y esta refrendada por la experiencia de los fabricantes de este tipo de vigas.

Para las armaduras activas de piezas pretesas se utilizan en la practica alambres de diámetros iguales o superiores a 5 mm por problemas de corrosión bajo tensiones, exigiéndose además que los aceros sean de bajo nivel de relajación. La norma Española

UNE exige que la relajación de estos aceros a para una fracción 0,7 de la tensión máxima de rotura sea  $\leq 2\%$ , La norma ASTM para alambres de baja relajación exige que para una fracción de 0,7 de la carga de rotura sea  $\leq 2,5\%$  y para 0,8  $\leq 3,5\%$ .

Para proyecto elegiremos, dado que las tensiones iniciales en las armaduras están comprendidas entre 0,7 y 0,8 de la carga de rotura que la relajación total del acero puede estimarse por un coeficiente de pérdida del 5% de la tensión inicial. Que se corresponde con la aplicación de la recomendación ASP para una relajación a las mil horas de 3,34%. Por lo que evaluaremos esta pérdida por :

$$APF6 = 0,05 \times PM$$

idéntica para todas las secciones.

### 8.3 Fuerza residual final en las secciones.

La fuerza residual en una sección venia representada por  $P_{kf}(I) = P_{ki} - \sum P_{dif,\infty}(I)$ .

Que de acuerdo a nuestra nomenclatura podemos escribir  $PKF = PKI - PERD(I)$  nos interesa además tener guardadas las perdidas diferidas que representaremos por  $PERD(I)$  en cada sección, así como las perdidas totales que representaremos por  $PERDF(I)$  y cuyo valor conocemos como  $PERDF(I) = PERD(I) + AP3(I)$ , para los cálculos que siguen a continuación.

### 8.4 Determinación de los coeficientes reales de perdidas.

Si recordamos  $TMAXP(I)$  representaba el valor máximo requerido en la sección de la fuerza de pretensado para que se cumplieran las condiciones de tensiones en la fibras de la sección. Podemos ahora comparar la fuerza residual  $PKF(I)$  con la fuerza requerida  $TMAXP(I)$ , si esta es menor en cualquier sección, será necesario recalcular los coeficientes de perdidas utilizados en principio teniendo en cuenta que los nuevos coeficientes vendrán dado de acuerdo con la siguiente expresión:

$$COIC(I) = (TMAXP(I) + PERDF(I))/TMAXP(I)$$

Con la siguiente corrección de restricción de fuerza residual de pretensado en la sección dada por la norma  $0,9 \times 0,6 \times f_{máx,k} \times WT$  lo que equivale a decir  $PM/PKF(I) \geq 1,125$  o lo que es lo mismo  $COIC(I) \geq 1,125$

Con lo que devolveríamos el calculo al punto de la determinación de  $P \times e$  desde el ultimo RI encontrado e iteraríamos de nuevo con los nuevos coeficientes de perdidas para afinar la solución.

El proceso continuaría hasta que en todas las secciones la fuerza residual sea superior o igual a la requerida.

Cuando encontremos la solución debemos de comprobar que en ninguna sección la fuerza residual es  $PKF(I) > PM/1,125$  y en aquellas que ocurriese igualaríamos  $PKF(I) = PM/1,125$ .

Versiones anteriores de la Instrucción consideraban que la fuerza residual estaba limitada como máximo a  $0,6 \times f_{máx,k} \times WT$  lo que equivale a  $PM/PKF(I) \geq 1,25$  este valor esta mas en concordancia con los resultados obtenidos por nosotros, un valor bueno para las iteraciones es  $COIC(I) \geq 1,28$  que es que se ha adoptado de salida en el procesos de diseño.

## 8.5 Armaduras Pasivas.

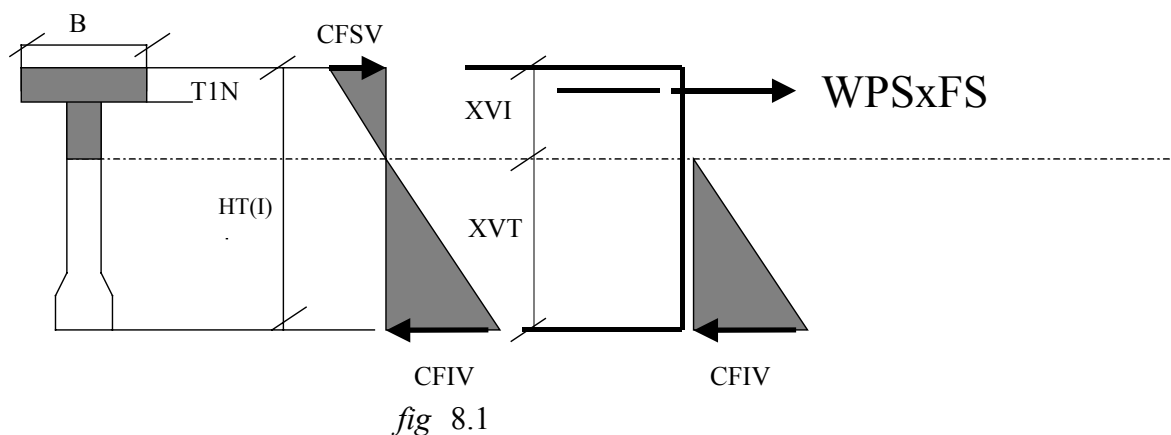
Puede ocurrir que se necesiten armaduras pasivas en la fase de vació por que se alcancen tensiones de tracción en las fibras superiores de algunas secciones iguales o menores a las de tracción admisibles por el hormigón a esta edad, aunque después en la fase de servicio las fibras estén comprimidas.

Para evitar una posible fisuración en estas zonas en la fase de vació vamos a disponer y calcular las armaduras pasivas necesarias en la parte superior de la sección.

Consideraremos que la sección tiene comportamiento elástico y el diagrama de tensiones para ella es lineal y es el que se obtiene de la flexión compuesta originada por el pretensado.

Suponemos que todas las tracciones van a ser absorbidas por las armaduras pasivas y que estas trabajan a su limite elástico. Luego cuando usemos las secciones homogeneizadas comprobaremos el estado real de tensiones en las fibras resultantes.

Nuestro esquema de trabajo será:



Para calcular el área sometida a tracción en la sección convenimos en que las cartelas de la cabeza se pueden a efectos de estos cálculos sustituir por un rectángulo de ancho B el de la cabeza, y altura  $T1/2$ , con lo que la cabeza estará simulada por un rectángulo de anchura B y altura  $T1N = T + T1/2$ .

Los cálculos que efectuaremos a continuación son repetitivos para todas las secciones en que hemos dividido la pieza ( $NPAR + 1$ ), no considerándose las secciones en que  $CFSV(I) \geq 0$ .



Vamos a calcular la posición de la fibra neutra respecto al borde superior de la sección su valor XVI vendrá dado por:

$$XVI = -CFSV(I) \times HT(I) / (CFIV(I) - CFSV(I))$$

Comprobaremos este valor con la altura teórica de la cabeza T1N, si es menor pondremos la variable V1=0 y si es mayor la sustituiremos por uno.

Definamos ahora la variable XVT cuyo valor es la diferencia entre XVI y T1N;  $XVT = XVI - T1N$ , la tensión en la fibra inferior de la cabeza CFTN vendrá dada entonces por :

$$CFTN = XVT \times |CFSV(I)| / XVI$$

El volumen de tracciones VOLC para la sección I podemos expresarlo por:

$$VOLC = (|CFSV(I)| \times XVI \times B - V1 \times XVT \times CFTN \times (B - S)) / 2.$$

Deberemos obtener el máximo de la variable VOLC, un procedimiento sencillo es crear una variable VMOL que inicializaremos a cero antes de recorrer las secciones y en cada paso calcularemos con una función el máximo entre VMOL y VOLC, almacenándolo en la variable VMOL, al final del proceso tendremos este máximo en dicha variable, que dividido por el límite elástico FS de dichas armaduras nos dará la sección de estas requeridas WPS.

$$WPS = VMOL / FS$$

## 8.6 Definición de secciones y calculo de sus características.

En los cálculos de los estados limites vamos a utilizar diferentes tipos de secciones que conviene definir previamente hasta ahora hemos trabajado con lo que denominamos sección bruta en todo el dimensionado anterior.

### 8.6.1 Sección Bruta.

La normativa la define, como la que resulta de considerar las dimensiones reales de la pieza, sin deducción de los huecos correspondientes a las armaduras activas ni solidarización de las pasivas. También la hemos denominado en algunas partes, sección geométrica.

Sus propiedades tales como área coordenadas del centro de gravedad, perímetro, momento de inercia han sido ya calculadas, cuando hablamos de ella y servirán de base para el calculo de las propiedades de las otras secciones.

### 8.6.2 Sección Neta.

Se llama así a la que se obtiene a partir de la sección bruta, deduciendo los huecos que se practican en el hormigón para el alojamiento de las armaduras activas y sus anclajes, y solidarizando las armaduras pasivas mediante la aplicación de los correspondientes coeficientes de equivalencia.

El calculo de sus propiedades es como sigue:

El área la denominaremos AN(I) su calculo en función de la sección bruta y tomando un coeficiente de homogenización de valor 10 para las pasivas y un recubrimiento para las mismas D<sub>pp</sub> podemos escribir :

$$AN(I) = A(I) + 10 \times WPS - WT$$

La coordenada del centro de gravedad respecto al borde inferior de la sección YGNI(I) vendrá dada por :

$$YGNI(I) = (YGI(I) \times A(I) + 10 \times WPS \times (HT(I) - D_{pp}) - RC \times WT) / AN(I)$$

Y respecto al borde superior YGNS(I) por :

$$YGNS(I) = HT(I) - YGNI(I)$$

El momento de inercia NIN(I) respecto a un eje que pasa por el centro de gravedad de la sección y paralelo a los bordes de la misma. Vamos a calcularlo con el teorema de Steiner apoyándonos en el momento de la sección bruta.

Primero vamos a calcular el momento de inercia de los huecos de armaduras con respecto al borde inferior de la sección este vendrá dado por:

$$SUMP = \sum_{IX=1}^{IX=MAXC} ((MAXC + 1 - IX) \times R + D_{ap}) \times CC(I) \times WT / NC$$

Ahora el momento de inercia lo podemos escribir como:

$$NIN(I) = NI(I) + A(I) \times YGI(I)^2 + 10 \times WPS \times (HT(I) - D_{pp})^2 - WT \times DIA^2 / 16 - SUMP - AN(I) \times YGNI(I)^2$$

### 8.6.3 Secciones homogeneizadas .

Se definen así a las secciones que se obtienen a partir de la sección neta una vez solidarizadas las armaduras activas longitudinales adherentes, aplicando los oportunos coeficientes de equivalencia. En particular las calcularemos aplicando los coeficientes N=5 y N=10.

Las áreas AH5 y AHX vendrán dadas por :

$$AH5(I) = AN(I) + 5 \times WT$$

$$AHX(I) = AN(I) + 10 \times WT$$

Los centros de gravedad respecto a la fibra inferior YG5I(I), YGX(I) se calcularan como:

$$YG5I(I) = (YGNI(I) \times AN(I) + 5 \times RC \times WT) / AH5$$

$$YGXI(I) = (YGNI(I) \times AN(I) + 10 \times RC \times WT) / AHX$$

Y respecto a la superior como:

$$YG5S(I) = HT(I) - YG5I(I)$$

$$YGXS(I) = HT(I) - YGX(I)$$

El momento de inercia de estas secciones lo calcularemos en función del de la sección neta solidarizando las armaduras activas y aplicando el teorema de Steiner con respecto al borde inferior de la sección. Conociamos del calculo de la sección neta, el valor del momento de Inercia de los huecos de las armaduras que habíamos calculado en la variable SUMP, los coeficientes de equivalencia que vamos a utilizar 5 y 10 nos servirán para representar el efecto de la solidarización de las armaduras así podemos escribir:

$$NIX(I) = NIN(I) * AN(I) * YGNI(I)^2 + 10 \times SUMP - AHX(I) \times YGX(I)^2$$

$$NI5(I) = NIN(I) * AN(I) * YGNI(I)^2 + 5 \times SUMP - AH5(I) \times YGXI(I)^2$$

#### **8.6.4 Sección eficaz.**

Es la formada por la zona comprimida del hormigón y las áreas de las armaduras longitudinales, tanto activas adherentes como pasivas, multiplicadas por los coeficientes de equivalencia de acuerdo con el apartado anterior.

### **8.7 Estado limite de utilización**

#### **8.7.1 Coeficiente de seguridad y fases de comprobación.**

Los coeficientes de seguridad para hormigón, acero, y acciones, en la normativa se recomienda que se tomen con valor la unidad, dejando a juicio del proyectista el incremento de estos en situaciones especiales. En particular y para piezas de armaduras pretensas recomienda que  $\gamma_p$  tome el valor de 0,95 si la acción del pretensado es favorable y 1,05 en caso contrario.

Como sabemos las fases de comprobación pueden clasificarse en dos grupos correspondiente a la construcción del elemento uno y el otro al servicio del mismo y dentro en cada una de ellas existirán tantas “subfases” como estados alcance la estructura .

Vamos a calcular las tensiones en las fibras extremas de las secciones para las comprobaciones de los estados limites de utilización de la estructura.

### **8.8 Calculo de tensiones en las secciones.**

#### **8.8.1 Fases de construcción.**

Para este tipo de estructuras prefabricadas consideramos solo la Fase de aplicación de pretensado y la llamamos en particular **fase de vació**.

En esta fase solo actúa como acción la fuerza de pretensado como ya conocíamos y los valores de las tensiones podemos calcularlos proporcionándole a TENS los argumentos necesarios.

De acuerdo con la normativa las características de las secciones a usar son las de la sección homogeneizada con coeficiente  $n = 5$  y la fuerza característica de pretensado  $PKI(I)$  con coeficiente  $\gamma_p = 1$ .

**AT** = AH5(I)  
**PMT** = PKI (I)  
**EIM** = YG5I(I)-RC  
**YSVT** = YG5S(I)  
**YIVT** = YG5I(I)  
**NITP** = NI5(I)  
**HT (I)** = HT(I)

TENS nos devolverá CSV que almacenaremos en CFSV(I) y CIV que almacenaremos en CFIV(I).

### 8.8.2 Fases de servicio.

En la fase de servicio vamos a considerar diferentes estados de carga dentro de la misma hipótesis, estos resultados nos servirán para la comprobaciones correspondientes a los límites de utilización.

Primero consideraremos las tensiones producidas por la carga permanente con la fuerza final del pretensado PKF(I) utilizando como dice la normativa las secciones netas para las tensiones de vacío y la homogeneizada con  $n=10$  para la de servicio. Los parámetros a proporcionar a TENS serán:

**AT** = AN(I)  
**PMT** = PKF(I)  
**EIM** = YGNI(I) - RC  
**YSVT** = YGNS(I)  
**YIVT** = YGNI(I)  
**NITP** = NIN(I)  
**MFTM** = MPRM(I)  
**YSCT** = YGXS(I)  
**YICT** = YGXI(I)  
**NITC** = NIX(I)  
**HT (I)** = HT(I)

TENS nos devolverá (CSV, CIV, CSC, CIC) que almacenaremos en (CFSVP(I), CFIVP(I), CFSCP(I), CFICP(I)).

Ahora consideraremos el estado de carga que se produce al considerar la carga permanente y las sobrecargas usuales desfavorables, volveremos a proporcionar a TENS los argumentos necesarios :

**AT** = AN(I)  
**PMT** = PKF(I)  
**EIM** = YGNI(I) - RC

**YSVT** = YGNS(I)  
**YIVT** = YGNI(I)  
**NITP** = NIN(I)  
**MFTM** = MF2(I)  
**YSCT** = YGXS(I)  
**YICT** = YGXI(I)  
**NITC** = NIX(I)  
**HT (I)** = HT(I)

TENS nos devolverá (CSV, CIV, CSC, CIC) que almacenaremos en (CFSV2(I), CFIV2(I), CFSC2(I), CFIC2(I)).

Consideremos ahora el estado de tensiones que se produce al considerar la totalidad de la carga (permanentes + sobrecargas usuales + no usuales) mas desfavorables.

Proporcionando a TENS los argumentos correspondientes:

**AT** = AN(I)  
**PMT** = PKF(I)  
**EIM** = YGNI(I) - RC  
**YSVT** = YGNS(I)  
**YIVT** = YGNI(I)  
**NITP** = NIN(I)  
**MFTM** = MF1(I)  
**YSCT** = YGXS(I)  
**YICT** = YGXI(I)  
**NITC** = NIX(I)  
**HT (I)** = HT(I)

TENS nos devolverá (CSV, CIV, CSC, CIC) que almacenaremos en (CFSV1(I), CFIV1(I), CFSC1(I), CFIC1(I)).

Estamos en condiciones ahora de hacer las comprobaciones de los estados limites de utilización relacionados con la fisuración y obtener así la clase de diseño a la que pertenece la pieza.

Si el conjunto (CFSC1(I), CFIC1(I)) en todas las tensiones son  $\geq 0$  la estructura corresponde a la **CLASE I** de la normativa Española.

Si el conjunto (CFSC1(I), CFIC1(I)) todas las tensiones son  $\geq f_{ct,k}$ , el conjunto (CFSC2(I), CFIC2(I)) todas las tensiones son  $\geq 0$  y se comprueba la restricción referente a armaduras de la zona de tracción del estado limite de aparición de fisuras. La estructura corresponde a la **CLASE II** de la normativa Española.

Si el conjunto de tensiones (CFSCP(I), CFICP(I))  $\geq 0$  y se cumplen las condiciones del estado limite de fisuración controlada la estructura corresponde a la **CLASE III** de dicha normativa.

## **8.9 Definiciones y comprobaciones adicionales.**

### **8.9.1 Estado limite de descompresión.**

Es aquel que bajo la actuación de las acciones mas desfavorable enumeradas para cada comprobación de clase, no se alcanza la descompresión en ninguna fibra de la sección.

### **8.9.2 Estado limite de aparición de fisuras.**

Es aquel que bajo la actuación de las acciones mas desfavorable se alcanza la resistencia a la tracción  $f_{ct,k}$  del hormigón en algunas fibras de la sección.

Para las Clases II y III se hace obligatorio la comprobación de las cuantías de armaduras activas y pasivas en la zona de tracción. Esta viene expresada por la siguiente expresión:  $(WST + WPT) \geq ACT/200$ .

Donde WST es la armadura pasiva dispuesta en la zona de tracción, WPS es el área de armaduras activas que se encuentran en dicha zona y ACT es el área sometida a tracción del hormigón.

### **8.9.3 Estado limite de fisuración controlada.**

Este estado esta relacionado con la amplitud de las aberturas originadas por las tracciones en el hormigón. Estableciéndose limites para ellas, relacionados con el ambiente donde presta servicio la pieza y que quedan recogidos en la siguiente párrafo.

WLIM = 0,1 mm para elementos estructurales expuestos a la intemperie, o interiores en atmósfera húmeda o medianamente agresiva, bien ventilada.

WLIM = 0,2 mm para elementos estructurales interiores en atmósfera normal.

Para la comprobación de este estado se determinara que las aberturas máximas WMAX se calculara teniendo en cuenta los ciclos de repetición de las cargas por las siguientes expresiones validas para piezas que utilizan como armaduras pasivas barras corrugadas:

$WMAX = (ASS - 40) \times 10^{-3} \leq WLIM$  para cargas con pocas repeticiones.

$WMAX = ASS \times 10^{-3} \leq WLIM$  para cargas repetidas más de un centenar de veces con su valor máximo.

Donde ASS es la variación de tensión en  $N/mm^2$ , de las armaduras de tracción a partir del estado de neutralización si se suponen actuando las solicitaciones de calculo sobre la sección eficaz.