

Capítulo 6 El predimensionado.-

6.1 Background.-

Cuando hablábamos del pretensado en general vimos entre otros que para obtener los mejores resultados debíamos tratar de ajustar la excentricidad y la fuerza al requerimiento de cada sección con su posible carga a lo largo de la vida de la estructura, efecto que conseguíamos con el levantamiento de armaduras activas en las secciones donde no eran necesarias o que había que disminuir la excentricidad.

Desdichadamente en nuestro caso de piezas prefabricadas con de armaduras pretesas rectas, no podemos jugar con la fuerza de pretensado, que en principio sin considerar perdidas es la misma en todas las secciones y su línea de acción se mantiene paralela al borde inferior de la pieza. Para la excentricidad en el caso de piezas rectas es constante, con lo que problema se reduce a calcular la coordenada inferior del núcleo limite para la carga y clase de diseño que estemos proyectando, esto sería por ejemplo el caso de las viguetas pretensadas.

Si cambiamos las alturas de las secciones creando un peralte hacia el centro de la pieza desde cada extremo, cada sección en las que normalmente dividimos la pieza, tendría que las coordenadas inferiores de su centro de gravedad se elevarían respecto a las anteriores. Como quiera que el cable equivalente es paralelo al borde inferior de la pieza, las excentricidades irán variando en sentido creciente desde el extremo al centro y luego decreciente desde el centro al otro extremo, pudiéndose así obtener excentricidades mayores en las secciones donde normalmente las solicitaciones son mayores, la figura siguiente ilustra este efecto.

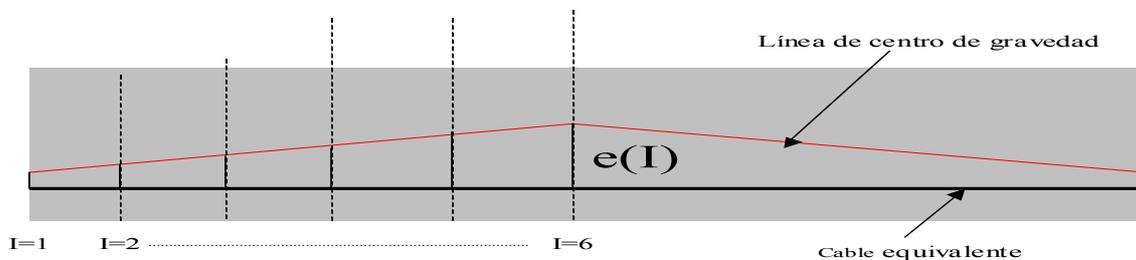


fig 6.1

Otro punto importante era la aplicación del pretensado en fases de la carga permanente real. En el caso de prefabricación solo podremos actuar con dos fases, la de aplicación del pretensado (vacío), que dependiendo del método podremos o no trabajar con el peso propio y la de servicio. Quedando la excentricidad máxima limitada a la que se pueda conseguir en la primera.

Para los rendimientos de secciones no tenemos problemas y trataremos de utilizar diseños con la máxima esbeltez posible.

Recordamos también que la Instrucción definía el uso y calidad de las piezas de pretensado asimilándolas a clases cuya definición estaba ligada con el estado de fisuración del hormigón, que a su vez es una función de las tensiones que se podían

aplicar a este y que eran características de su edad. Esto lo traducimos a las zonas límites primera y segunda y vimos en los ejemplos que la primera era casi siempre más restrictiva que la segunda.

Por simplicidad de la exposición no vamos a entrar ahora en los estados límites de utilización que analizaremos en detalle más adelante pero vamos a definir tres valores para la fibra más descomprimida en cada fase, que en el caso particular nuestro se corresponden con la de vacío y la de servicio.

Para la fase de vacío la fibra más descomprimida debe ser la superior para ella definiremos el parámetro TESH que podrá tomar valores $(0, f_{ct,j})$, en los casos corrientes y mayores a estos en casos especiales, estando limitadas las tracciones a las que producirían las aperturas máximas admitidas en estado límite de fisuración controlada.

Para la de servicio definiremos dos parámetros TEIF1 y TEIF2 correspondientes a la fibra más descomprimida que en este caso es la inferior cuyo significado es para el primero el límite de tensión admisible que produciría la **hipótesis de carga total más desfavorable en la fibra inferior extrema**. Para el segundo el límite de tensión admisible que produciría **la carga permanente mas la sobrecarga usual en la fibra inferior extrema**.

El rango de valores de TEIF1 es el mismo que para TESH, teniendo en cuenta la edad del hormigón en esta fase y que en ningún caso la tensión producida por la carga permanente efectiva será <0 para lo cual $TEIF1 \geq -(MFSU + MFSNU).YGI/NI$, donde los MF son los momentos de las sobrecargas usuales y no usuales. Para TEIF2 el valor será casi siempre ≥ 0 en los casos que se admitan tracciones estas serán inferiores a $\geq -MFSU.YGI/NI$ que garantiza que con la carga permanente la tensión en la fibra inferior es ≥ 0 .

La combinación de estos valores nos permitirá diseñar de acuerdo con las clases de la Instrucción.

6.2 Algoritmo de calculo de P.e

Vamos a crear un algoritmo que nos permita encontrar el valor de **P.e** que de salida nos proporcionen el primer diseño, una vez hechos los cálculos con estos valores iniciales iteraremos con los valores reales, ajustando los coeficientes de diseño entre cada etapa para obtener el resultado final.

Como siempre dividiremos la pieza en un número dado de secciones que incluyan una sección extrema y la central y designaremos por I una de estas secciones genéricas.

Designemos por RI el valor de la distancia entre el centro de paso del cable equivalente y el borde inferior de la pieza que como vemos en la figura anterior es recto.

Designemos ahora dos variables PVM y PM que representan respectivamente el valor mínimo y máximo requeridos en la pieza que cumplen los requisitos de tensiones TE..., el primero para la hipótesis de vacío o puesta en tensión y el segundo para la de servicio o carga para un RI dado. Inicialmente tomarán los valores $PVM = 10^8$ y $PM = 0$.

Nuestro proceso habrá acabado satisfactoriamente cuando encontremos para un RI dado un par de valores PVM y PM tales que $PVM \geq PM$.

Fijado un RI inicial por ejemplo 10 cm, vamos a calcular para cada sección I en las que hemos dividido la pieza lo siguiente:

La excentricidad $e(I)$ sera $e(I) = YGI(I) - RI$

La variable $ZV = 1/A(I) - e(I).YGS(I)/NI(I)$

La ecuación de tensiones en la fibra superior en el supuesto de que en la hipótesis de vacío actué el peso propio y la fuerza de vacío PV, la podemos escribir:

$$\sigma_s(I) = PV(I)/A(I) - PV(I).e(I).YGS(I)/NI(I) + MPP(I).YGS(I)/NI(I)$$

Si sustituimos la tensión por la máxima definida por TESH y pasamos el termino del peso propio al otro lado de la ecuación y lo llamamos ZH0 podemos escribir:

$$TESF - MPP(I).YGS(I)/NI(I) = PV(I).ZV \Rightarrow PV(I) = (TESF - ZH0)/ZV$$

que nos proporcionaría el valor de la fuerza que con $e(I)$ cumple la condición de tensiones en la sección.

Si analizamos los valores de ZV vemos que para el valor 0, RI correspondería con el borde inferior el núcleo central lo que implica que con cualquier valor de PV la tensión sería 0, para valores positivos de ZV si RI esta por debajo del centro de gravedad y con compresiones siempre la tensión sería positiva por lo que nos seguimos manteniendo en el interior del núcleo central, para valores superiores de RI la fibra superior siempre seguirá en compresión y será el borde superior de la primera zona limite el que limite la sección en la ecuación de la tensión de la fibra inferior, por tanto en estos dos casos y en principio cualquier valor de la fuerza satisfaría la inecuación de la tensión, es por lo que respecto a esta restricción mantenemos la sección como valida y asignamos el valor de $PV(I) = 10^8$.

Para los valores negativos de ZV tomamos como valor de $PV(I) = ZH0/ZV$ si ahora comparamos el $PV(I)$ con PVM y escogemos para PVM el menor de los dos valores tendremos en PVM el valor de fuerza a partir de la cual con la excentricidad dada se deja de cumplir la condición TESH.

Sigamos con los cálculos sobre la fibra inferior, definimos como ZT la siguiente expresión $ZT = 1/A(I) + e(I).YGI(I)/NI(I)$ y seguimos escribiendo la ecuación de la tensión en la fibra inferior para una fuerza P1 cuando actúa la carga total y P2 cuando lo hace la carga permanente y sobrecargas usuales tendríamos:

$$\sigma_{i1}(I) = P1(I)/A(I) + P1(I).e(I).YGI(I)/NI(I) - MF1(I).YGI(I)/NI(I);$$

$$\sigma_{i2}(I) = P2(I)/A(I) + P2(I).e(I).YGI(I)/NI(I) - MF2(I).YGI(I)/NI(I)$$

Si igualamos la primera a la condición limite TEIF1 de tensión, pasamos el termino del flector al otro lado y convenimos en llamar a esta suma ZH1 tendríamos para P1

$P1(I) = ZH1/ZT$ y efectuando lo mismo para la otra expresión con los valores correspondientes se tendría $P2(I) = ZH2/ZT$, si ahora escogemos el mayor valor de ambos y lo multiplicamos por un coeficiente de perdidas en la sección $COIC(I)$, tendríamos el valor necesario de la fuerza aplicar. Este valor lo comparamos con PM y escogemos el mayor valor de ellos, con lo que PM ira guardando el, mayor valor de la fuerza de pretensado que para un RI dado cumple simultáneamente con TEIF1 y TEIF2.

Cuando hayamos recorrido todas las secciones para un RI dado tendremos en PVM el valor que cumple en todas las secciones con la restricción TESH y en PM el valor que cumple en todas las secciones las TEIF1 y TEIF2 aplicadas las perdidas finales, si ahora aplicamos a PVM las perdidas iniciales COIV que podemos suponer con bastante aproximación idéntica en todas las secciones y comparamos tendremos:

Si PVM es mayor o igual a PM hemos encontrado el valor de la fuerza de Pretensado PM que junto con las $e(I)$ cumple las restricciones TE... y nuestro predimensionado habrá acabado.

Si PVM es menor que PM incrementaríamos el valor de RI en 0.01 cm y continuaríamos el proceso.

Tendremos que definir un valor de RI a partir del cual no nos interese el diseño, en el supuesto de que no converjan PVM y PM, este podría ser un determinado valor K por encima del centro de gravedad de la sección extrema, alcanzado el cual pararíamos las iteraciones.

6.3 Numero de alambres.-

Con el algoritmo anterior hemos encontrado un valor para la fuerza inicial de pretensado P_0 , pasar al numero de cables necesarios NC, teniendo en cuenta las limitaciones de la Instrucción es una operación sencilla, si llamamos $f_{p,k}$ al menor de los valores:

$$0,75f_{máx,k} \text{ donde } f_{máx,k} = \text{carga unitaria de rotura del acero}$$

$$0,90f_{yk}, \text{ donde } f_{yk} = \text{limite elástico del acero.}$$

Se tendría $P_0 = f_{p,k} \cdot A_p = f_{p,k} \cdot \pi \cdot NC \cdot DIA^2 / 4$ donde A_p es el área total de armadura activa y DIA es el diámetro de los alambres. Despejando tendríamos:

$$NC = 4 \cdot P_0 / f_{p,k} \cdot \pi \cdot DIA^2$$

NC tiene que ser un valor entero por lo que en la expresión anterior tomaríamos la parte entera de NC y le sumariamos 1.

Con este valor de NC recalculáramos el valor de $P_0 = f_{p,k} \cdot \pi \cdot NC \cdot DIA^2 / 4$, para las siguientes fases del proceso.

6.4 Restricciones para la distribución de los alambres en la sección.-

Junto con el valor de P_0 calculamos en el algoritmo anterior un valor de la excentricidad que manejábamos por la variable RI, que definimos como la distancia del punto de paso del cable equivalente al extremo inferior.

Nuestro problema ahora es como distribuir los alambres en capas alojadas en la cabeza inferior y el alma de forma que el centro de gravedad de tal distribución coincida con las RI requeridas en cada sección.

Este problema puede que nos lleve a una solución teórica de distancia entre las capas variables y diferentes números de alambres en las mismas, muy difíciles de llevar a la práctica industrial, por eso vamos a definir una serie de restricciones que nos permitan abordarlo.

Para ello primero vamos a considerar la distancia mínima a la que deben estar los alambres de los paramentos de la pieza, esta distancia esta recogida en la práctica por La Instrucción y diferentes recomendaciones de Organismos encargados de normalización y buena práctica tales como la Asociación Española del Pretensado del Instituto Eduardo Torroja. Por el momento la vamos a denominar $D_{a,p}$ y en su momento veremos los valores que toma.

La segunda restricción que también la proporcionan las normativas anteriores y se corresponde con la distancia mínima entre armaduras activas, vamos a denominar R a la distancia entre capas posibles para las armaduras activas y cuando llegue la asignación de valores, lo haremos teniendo en cuenta la restricción.

Podemos ahora imponer condiciones al número de alambres por capa, dependiendo que se trate del alma o de la cabeza inferior y siempre teniendo en cuenta la distancia a los paramentos y la distancia entre armaduras, llamemos **NCFA** al número de cables en una capa o fila completa del alma y **NCFC** a lo mismo pero referido a la cabeza inferior.

La tercera restricción la proporcionan las secciones extremas al tener en cuenta el trazado recto de las armaduras, ya que por su inferior altura nos limitan el número de capas posibles viniendo este definido por la expresión siguiente:

$$\text{MAXC} = (\text{HT}(1) - 2 \cdot D_{a,p}) / R$$

Podemos ahora dividir las armaduras en dos conjuntos uno correspondiente a la cabeza inferior y otro correspondiente al alma. Tomaremos como regla general el llenado completo de las capas de la cabeza inferior y el resto de cables lo distribuiremos en el alma en capas completas menos la última que la ajustaremos al número total de cables.

Con este planteamiento obtener el valor exacto de RI será difícil, pero en la mayoría de los casos podremos obtener valores próximos a él jugando con la ocupación de capas y el valor de la variable R de separación.

Vamos a buscar ahora el conjunto de valores próximos a RI que junto con P_0 siguen cumpliendo las condiciones TE... .

Si el centro de gravedad de la configuración de armaduras anteriores esta comprendido entre estos valores tendremos el problema resuelto.

6.5 El concepto de tolerancia.-

Asimilaremos esta diferencia aceptable en el valor de RI a una tolerancia del valor RI y definiremos dos valores uno por encima de RI que denominaremos tolerancia superior y lo representaremos TOLS y otro por debajo que denominaremos tolerancia inferior y representaremos por TOLI a partir de los cuales en una de las secciones dadas dejan de cumplirse las condiciones TE.... Nótese que estos dos valores están referidos al borde inferior de la pieza al igual que RI.

Definido el concepto de tolerancia, para su determinación nos vamos a basar en una rutina o procedimiento que nos permita obtenerlas por la comprobación de las condiciones TE... en todas las secciones en las que hemos dividido la pieza.

Conocemos que los puntos que cumplen con las condiciones TE... deben estar localizados en el interior de la jácena (entre los contornos de la sección extrema I=1) y el interior de la primera zona limite (definida por TEFS y la TEI.. mas restrictiva), por ello tomaremos como primer valor de TOLI, cero, es decir coincide con el paramento inferior y para TOLS el valor HT(1) coincidente con el paramento superior de esta sección.

Si llamamos TEI a la coordenada del borde inferior de la primera zona limite referida al centro de gravedad de la sección y TRI a la misma coordenada referida al borde inferior de la sección podemos escribir para una sección genérica I :

$$TEI = (-TEFS/(COIV. PM) + 1/A(I)) N(I)/YGS(I) + MPP(I)/(COIV. PM)$$

$$TRI = YGI(I) - TEI$$

Comparando ahora con el valor de TOLI, si TRI es mayor que TOLI sustituimos el valor de TOLI por el de TRI , al final del ciclo tendremos almacenado en TOLI el mayor valor de TRI que se corresponde con la menor excentricidad.

Nótese que la fuerza de pretensado esta afectada por el coeficiente de perdidas en vacío COIV.

En el mismo paso por la sección de la rutina, podríamos calcular las coordenadas del borde superior de la primera zona limite. Si llamamos a las coordenadas de estos puntos CEI referidas al centro de gravedad y TRS a las mismas referidas al borde inferior de la sección, teniendo en cuenta que CEI es el menor de los valores CEI1 y CEI2 correspondiente a las TEI1 y TEI2 podemos escribir:

$$CEI1 = (COIC(I)(TEI1 + MF1(I).YGI(I)/NI(I))/PM - N(I)/(A(I).YGI(I))$$

$$CEI2 = (COIC(I)(TEI2 + MF2(I).YGI(I)/NI(I))/PM - N(I)/(A(I).YGI(I))$$

$$TRS = YGI(I) - CEI$$

Comparando ahora TRS con TOLS, si TRS es menor que TOLS sustituimos TOLS con TRS.

Al igual que en calculo de la tolerancia inferior, la fuerza de pretensado esta afectada por los coeficientes de perdidas correspondientes a la fase, que en el caso de la tolerancia superior se corresponden con las perdidas totales y se han calculado individualizadas para cada sección, aunque para la primera aproximación se hayan supuesto iguales en todas las secciones.

Por comodidad y claridad de las representaciones siguientes, utilizaremos los valores de las zonas limites referidos al borde inferior de la pieza, así como el punto de paso del cable equivalente RI

Las figuras siguientes se representan para una jácena de las siguientes características :

caracteristicas geometricas	m
ancho de cabeza superior	B= 0,8
altura de cabeza superior	T= 0,07
ancho de cabeza inferior	B0= 0,41
altura de cabeza inferior	T0= 0,13
espesor del alma	S= 0,1
altura de cartela superior	T1= 0,04
altura de cartela inferior	T01= 0,07
Luz	L= 18
Peralte	C= 10%

fig 6.2

Como siempre dividiremos la jácena en partes diez en este caso y tomamos la parte simétrica de la izquierda incluida la sección extrema y la media ya que para este ejemplo se encuentra solicitada por una única carga uniforme de valor 14,4 kN/m . Sus áreas, inercias y demás características se recogen en el cuadro siguiente:

X en m	Area	Inercia	YGS	YGI	HT	nci	ncs	Rendimiento
0	0,174	0,009	0,272	0,328	0,600	0,183	-0,151	0,556
1,8	0,192	0,017	0,359	0,421	0,780	0,243	-0,207	0,577
3,6	0,210	0,028	0,446	0,514	0,960	0,298	-0,259	0,581
5,4	0,228	0,043	0,534	0,606	1,140	0,350	-0,308	0,577
7,2	0,246	0,061	0,623	0,697	1,320	0,398	-0,355	0,570
9	0,264	0,083	0,711	0,789	1,500	0,444	-0,400	0,562

fig 6.3

Supongamos que el pretensado se aplica en una sola fase (sin actuar el peso propio) y que restringimos las tensiones en la fibras extremas a ≥ 0 N/mm² en cualquier fase.

Tras iterar con los algoritmos de calculo de RI encontramos los siguientes valores para RI y PM en la fase de servicio, RI = 0,345428 m y PM = 1300kN.

Las tensiones de las fibras se representan en el siguiente cuadro:

				tensiones N/mm2	
				estado de servicio	
X en m	P en N	e en mm	MF en kNm	fibra superior	fibra inferior
0	1300000	-17	0	13,693	6,63
1,8	1300000	76	291	17,129	1,92
3,6	1300000	168	521	17,816	0,64
5,4	1300000	260	686	17,359	0,76
7,2	1300000	352	786	16,358	1,52
9	1300000	444	820	15,080	2,61

fig 6.4

Si ahora suponemos un coeficiente de perdidas diferidas de 0,28 igual en todas las secciones tendríamos que la fuerza actuante en la fase de vacío sería de 1800 kN, con lo que en esta fase, se tendría el siguiente estado de tensiones:

				tensiones N/mm2	
				estado de vacío	
X en m	P en N	e en mm		fibra superior	fibra inferior
0	1800000	-17		11,30	9,18
1,8	1800000	76		6,44	12,81
3,6	1800000	168		3,73	14,13
5,4	1800000	260		2,01	14,55
7,2	1800000	352		0,84	14,56
9	1800000	444		0,00	14,38

fig 6.5

Los valores calculados para las zonas límites primera y segunda se recogen en el siguiente cuadro, en el que hay que destacar que el borde inferior de la primera zona límite se corresponde con el borde inferior del núcleo central, al haberse restringido los valores de las tensiones en las fibras extremas a valores ≥ 0 N/mm² y haberse aplicado el pretensado en una sola fase (sin actuar el peso propio).

fct,j=	0,000		fctj= 14,667 fck		0,000 0,000 0,000							
X en m	e>=	e<=	e>=	e<=	ncs	nci	NI	P	YGI	YGS	fase ant	fase act
0	-151,088	182,760	-176,321	145,765	-0,151	0,183	0,009	1300,000	0,328	0,272	0,000	0,000
1,8	17,381	242,925	-59,537	241,489	-0,207	0,243	0,017	1300,000	0,421	0,359	0,000	291,412
3,6	141,404	298,227	-8,383	355,151	-0,259	0,298	0,028	1300,000	0,514	0,446	0,000	520,603
5,4	219,450	349,594	-22,480	485,314	-0,308	0,350	0,043	1300,000	0,606	0,534	0,000	686,117
7,2	249,916	397,820	-101,961	631,003	-0,355	0,398	0,061	1300,000	0,697	0,623	0,000	786,494
9	231,253	443,523	-247,262	791,525	-0,400	0,444	0,083	1300,000	0,789	0,711	0,000	820,277

fig 6.6

Con el algoritmo de calculo de las tolerancias, obtenemos para estas los siguientes valores TOLS = 0,37233138 m. y para TOLI = 0,345427799 referidos como siempre al borde inferior de la pieza.

Si ahora representamos la primera zona limite junto con las tolerancias obtendríamos para este ejemplo la siguiente representación:

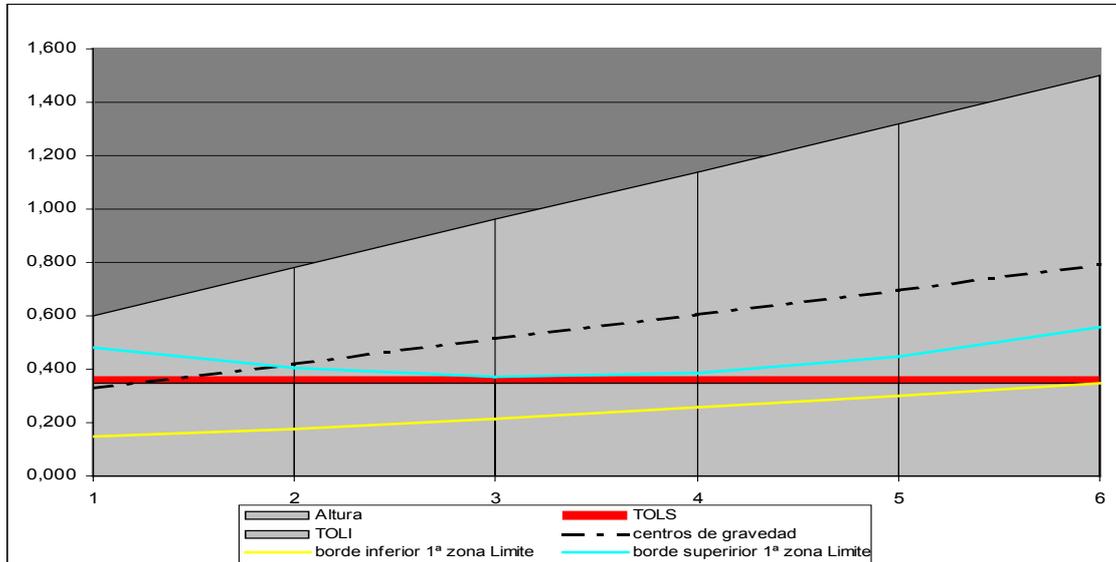


fig 6.7

En la que los valores permisibles de RI se corresponden a la zona en rojo cuyo borde superior es TOLS y el inferior TOLI .

Nótese que la TOLS se corresponde con el mínimo valor del borde superior de la primera zona limite y TOLI con el máximo valor del borde inferior.

No se han representado los efectos de la segunda zona limite, que como ya hemos adelantado casi siempre es menos restrictiva que la primera y puede ampliarse en la mayoría de los casos aumentando la resistencia del hormigón o su proceso de curado antes de la puesta en tensión.

Ahora definido y representado el concepto de las tolerancias, podemos retomar el problema de la distribución de armaduras activas en el punto que lo dejamos y tratar de encontrar una formulación que nos ayude en su determinación.