

CLASE 2 - Verificaciones en Servicio

1. Generalidades

El postensado se caracteriza porque los cables se tensan luego de hormigonado el elemento, para ello es necesario dejar prevista una vaina con el propósito de permitir el libre desplazamiento del pretensado en el hormigón y poder realizar el tensado. El anclaje del pretensado en el hormigón se hace por medios mecánicos mediante una placa que se apoya en una trompeta sobre el hormigón, pudiendo ser un anclaje activo (permite tensado) y/o un anclaje pasivo (no permite tensado). Generalmente una vez realizado el tensado se procede a inyectar la vaina con mortero.

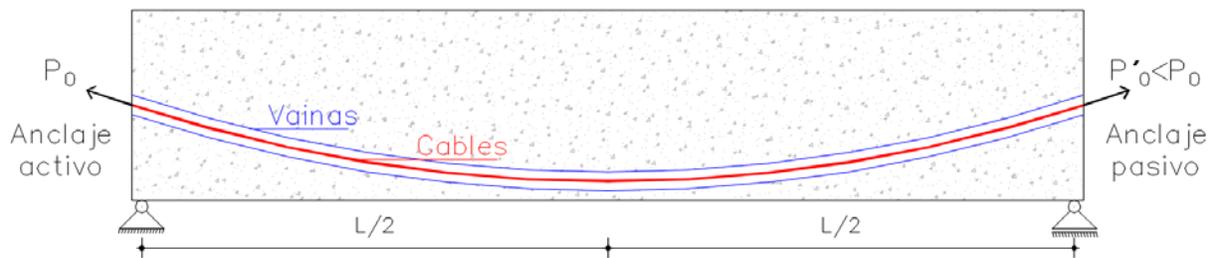


Figura 9: Esquema de postensado en viga

La fuerza de pretensado P_0 que se aplica inicialmente a la viga, no es la misma fuerza que alcanzan las distintas secciones de la misma. De forma instantánea y a lo largo del tiempo, se producen pérdidas de pretensado que dependen de la sección considerada. Por lo tanto, tendremos distintos valores de fuerza dependiendo del tiempo y de la sección evaluada, que serán siempre menores a la fuerza inicial, $P(x,t) < P_0$.

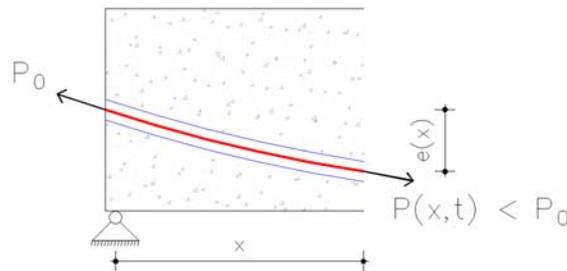


Figura 10: Fuerza de pretensado

Brevemente comentaremos que las pérdidas de pretensado se clasifican en:

- Instantáneas $\rightarrow t = t_0$ (ocurren en el tensado) $\rightarrow P_1 = P_0 - \Delta P_{inst}$
- Diferidas $\rightarrow t > t_0$ (ocurren luego del tensado) $\rightarrow P_2 = P_0 - \Delta P_{inst} - \Delta P_{dif}$

2. Verificación de tensiones

La estructura pretensada pasa por diversas fases críticas a lo largo de su vida que es necesario verificar. Los límites de tensiones se clasifican como Estados Límites de Servicio, siendo necesario comprobar que los límites de tensiones no son sobrepasados en las distintas situaciones de proyecto.

Las situaciones más críticas suelen ser:

- El instante de transferir la fuerza de pretensado al hormigón o instante inicial. En este estado la fuerza de tensado es máxima, dado que solo han ocurrido las pérdidas instantáneas y el hormigón es joven por lo que tiene una resistencia baja. En esta fase, el momento exterior es mínimo, solo actúa el peso propio de la viga.
- A largo plazo, donde la fuerza de pretensado será mínima ya que se han producido todas las pérdidas. En esta etapa la resistencia del hormigón ya ha alcanzado su valor máximo y las acciones exteriores son máximas.

Las comprobaciones que se deben realizar son descritas en la norma UNE EN 1992-1-1.

- Fibras comprimidas
 - UNE EN 1992-1-1 capítulo 5.10.2.2 $\rightarrow \sigma_C \leq 0,6f_{ck}$ para la combinación característica.
 - UNE EN 1992-1-1 capítulo 7.2 $\rightarrow \sigma_C \leq 0,45f_{ck}$ para la combinación cuasipermanente, de lo contrario se deberá considerar una fluencia no lineal.
- Fibras traccionadas
 - UNE EN 1992-1-1 capítulo 7.3.1 $\rightarrow w_k \leq w_{max}$

Tabla 7.1N, trabajaremos, por ejemplo, bajo la hipótesis de ambiente XC4.

Clase de exposición	Elementos con armadura pasiva y con armaduras activas no adherentes	Elementos con armaduras activas adherentes
	Combinación de cargas cuasipermanente	Combinación de cargas frecuente
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3		Descompresión
NOTA 1 Para las clases de exposición X0, XC1, la abertura de la fisura no influye en la durabilidad y este límite se establece para garantizar, en general, una apariencia aceptable. En ausencia de condiciones de apariencia se puede tratar este límite de modo menos estricto.		
NOTA 2 Para estas clases de exposición, además, la descompresión se debería comprobar bajo la combinación cuasipermanente de cargas.		

w_{max} se hallará bajo la combinación frecuente de cargas.

Como se menciona en la Nota 2, para la clase de exposición XC4 se deberá comprobar la descompresión bajo la combinación cuasipermanente de cargas, lo cual significa verificar que las armaduras activas (en su totalidad) se encuentran en la zona comprimida de la sección bajo dicha combinación de acciones.

De forma simplificada en el trabajo limitaremos las fibras traccionadas a la resistencia a tracción del hormigón $\sigma_T \leq f_{ctm,fl,j}$ (UNE EN 1992-1-1 capítulo 3.1.8, σ_T hallada para la combinación frecuente de acciones), de esta manera garantizamos que se verifica la fisuración de la pieza y adicionalmente se pueden aplicar las ecuaciones tensionales simplificadas de resistencia de materiales.

En las verificaciones de tensiones, el término de pretensado debe estar además multiplicado por su respectivo coeficiente parcial de seguridad, según sea su efecto favorable o desfavorable.

En UNE EN 1992-1-1 capítulo 5.10.9 se indican coeficientes para los cálculos en estados límite de servicio y en estado límite de fatiga. Los valores recomendados son:

- Para armaduras pretesas o activas no adherentes: 1,05 cuando el efecto sea desfavorable y 0,95 cuando el efecto sea favorable.
- Para armaduras postesas con armaduras activas adherentes: 1,1 cuando el efecto sea desfavorable y 0,90 cuando el efecto sea favorable.
- En casos especiales podrían tomarse ambos coeficientes iguales a 1.

Bajo las hipótesis de utilizar la sección bruta de hormigón y que el material se comporta como elástico lineal (vale la suma de estados tensionales) se analizarán las tensiones en las distintas etapas.

2.1. Situación inicial ($t=t_0$)

Se aplica el tensado contra el peso propio de la viga y ocurren las pérdidas instantáneas. Tendremos el valor máximo de la fuerza de pretensado, valor mínimo de la resistencia de hormigón y la única acción exterior es la debida al peso propio. La acción de pretensado se considera como una compresión aplicada al nivel de los cables.

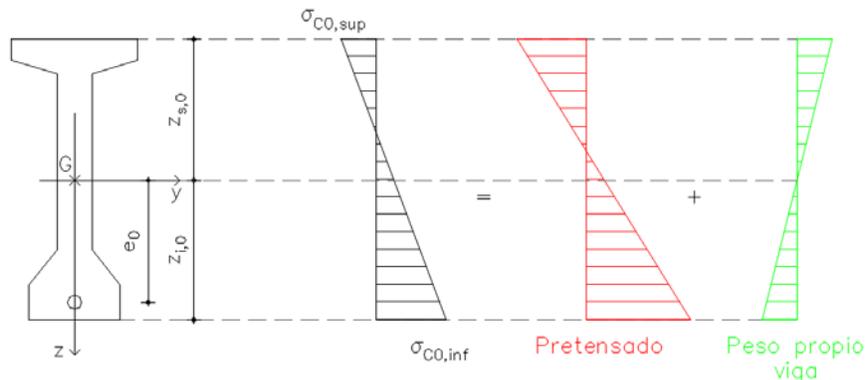


Figura 11: Tensiones situación inicial

Por lo tanto, para las fibras inferiores de la viga, considerando a $z_{i,0}$ como una distancia se tendrá que las solicitaciones de pretensado comprimen (-) las fibras inferiores, mientras que la solicitación de peso propio de la viga tracciona (+) las fibras inferiores, obteniendo que

$$\sigma_{C0,inf} = -\gamma_P \frac{P_1}{A_0} - \gamma_P \frac{P_1 \cdot e_0}{I_0} z_{i,0} + \frac{M_{pp,v}}{I_0} z_{i,0} \geq -0,6f_{ck,j}$$

Cuanto más alto es el valor de pretensado, mayor será el nivel de compresión, pudiendo superar el límite admitido, por lo tanto se debe considerar su efecto como desfavorable $\gamma_P = 1,1$.

$$\sigma_{C0,inf} = -1,1 \cdot P_1 \left(\frac{1}{A_0} + \frac{e_0}{I_0} z_{i,0} \right) + \frac{M_{pp,v}}{I_0} z_{i,0} \geq -0,6f_{ck,j} \quad (1)$$

Por otra parte, para las fibras superiores de la viga, considerando a $z_{s,0}$ como una distancia se tendrá que la sollicitación de directa del pretensado comprime (-) las fibras superiores mientras que la sollicitación de flexión del pretensado tracciona (+) las fibras superiores. La sollicitación de peso propio de la viga comprime (-) las fibras superiores, obteniendo que,

$$\sigma_{C0,sup} = \gamma_P \cdot P_1 \left(-\frac{1}{A_0} + \frac{e_0}{I_0} z_{s,0} \right) - \frac{M_{pp,v}}{I_0} z_{s,0} \leq f_{ctm,fl,j}$$

En esta oportunidad el valor de γ_P dependerá del signo de la siguiente expresión $\left(-\frac{1}{A_0} + \frac{e_0}{I_0} z_{s,0} \right)$. Si el signo de la expresión anterior es positivo, cuanto más alto es el valor de pretensado, mayor será el nivel de tracción, pudiendo superar el límite admitido, por lo tanto se debe considerar su efecto como desfavorable $\gamma_P = 1,1$. Por otra parte, si el signo de la expresión anterior es negativo, cuanto más alto es el valor de pretensado, menor será el nivel de tracción, por lo tanto se debe considerar su efecto como favorable $\gamma_P = 0,9$.

$$\sigma_{C0,sup} = \begin{cases} 1,1 \\ 0,9 \end{cases} \cdot P_1 \left(-\frac{1}{A_0} + \frac{e_0}{I_0} z_{s,0} \right) - \frac{M_{pp,v}}{I_0} z_{s,0} \leq f_{ctm,fl,j} \quad (2)$$

Donde,

- P_1 , es la fuerza de pretensado luego de las pérdidas instantáneas, $P_1 = P_0 - \Delta P_{inst}$.
- $M_{pp,v}$, es el momento debido al peso propio de la viga.

2.2. Llenado de losa ($t=t_1$)

Generalmente la viga oficia de encofrado para la losa, por lo tanto la viga aislada es la que toma el peso del hormigón de la losa en estado fresco. Por lo tanto, el peso propio de la losa solo provocará tensiones normales en la sección de la viga.

Adicionalmente se considera, como se detalló en teórico, que un porcentaje de las pérdidas diferidas ya han ocurrido y reducen la fuerza de pretensado actuante. Estas pueden ser consideradas simplifcadamente como una tracción aplicada al nivel de los cables y de valor $\Delta P_{dif,1}$.

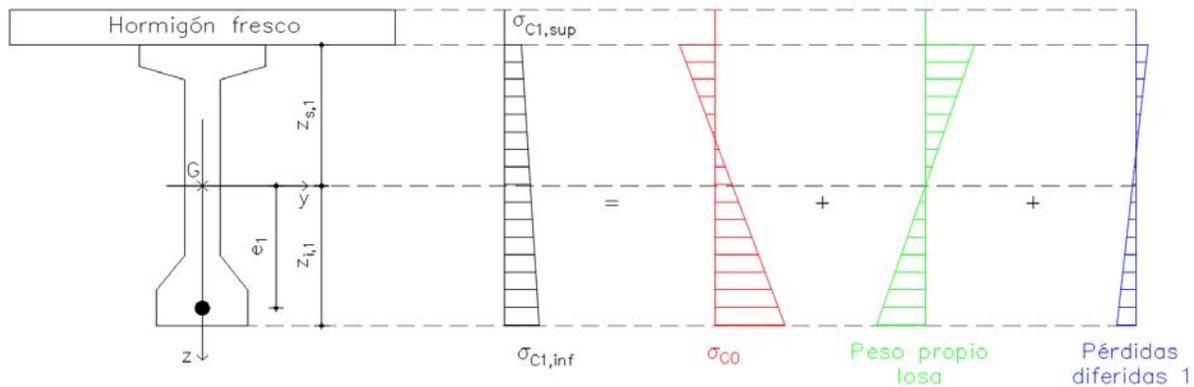


Figura 12: Tensiones llenado de losa

Repitiendo los razonamientos anteriores para identificar los efectos de cada acción se obtiene,

$$\sigma_{C1,inf} = \sigma_{C0,inf} + \frac{M_{pp,l}}{I_1} z_{i,1} + \gamma_P \cdot \Delta P_{dif,1} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{e_1}{I_1} z_{i,1} \right)$$

$$\sigma_{C1,sup} = \sigma_{C0,sup} - \frac{M_{pp,l}}{I_1} z_{s,1} + \gamma_P \cdot \Delta P_{dif,1} \left(\frac{1}{A_1} - \frac{e_1}{I_1} z_{s,1} \right)$$

Donde,

- $M_{pp,l}$, es el momento debido al peso propio de la losa.
- $\Delta P_{dif,1}$, es el valor de fuerza de las pérdidas diferidas de la fuerza de pretensado.

2.3. Situación final ($t=\infty$)

Una vez que el hormigón ha fraguado la sección resistente de hormigón pasa a ser la sección compuesta de hormigón viga más losa por lo que las cargas aplicadas a partir de este momento serán resistidas conjuntamente por la viga y la losa. Sin embargo las tensiones a las que estaba sometida la viga aislada en las etapas anteriores seguirán estando presentes y por ello siempre existirá una discontinuidad de tensiones en ambos hormigones.

Además de lo anteriormente comentado se producirán las pérdidas diferidas de pretensado, estas pueden ser consideradas simplíficadamente como una tracción aplicada al nivel de los cables y de valor $\Delta P_{dif,2}$, que producirá un diagrama de tensiones con distribución lineal en toda la sección (viga y losa). Lo anterior no es necesariamente cierto pero para el trabajo asumiremos esta hipótesis pues un análisis más riguroso está fuera del alcance de este curso. En el teórico se dará mayor detalle del comportamiento de estos elementos para este efecto. En futuras clases de consulta se podrá discutir y explicar detalladamente este fenómeno.

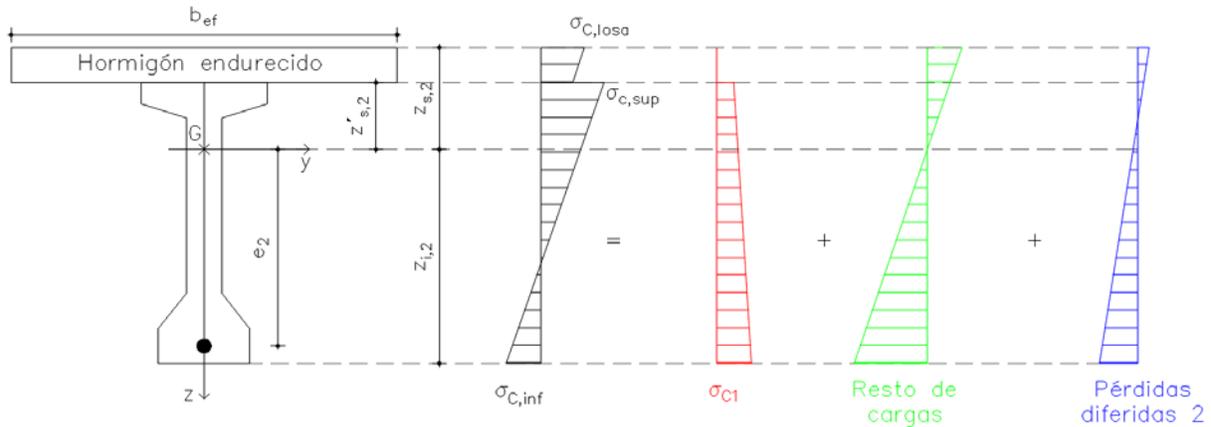


Figura 13: Tensiones situación final

Repitiendo los razonamientos anteriores para identificar los efectos de cada acción se obtiene,

$$\sigma_{C,inf} = \sigma_{C1,inf} + \frac{M_{term}}{I_2} z_{i,2} + \frac{M_{Q,frec}}{I_2} z_{i,2} + \gamma_P \cdot \Delta P_{dif,2} \left(\frac{1}{A_2} + \frac{e_2}{I_2} z_{i,2} \right) \leq f_{ctm,fl,j}$$

En este caso cuanto más bajo es el valor de pretensado, mayor será el nivel de tracción, pudiendo superar el límite admitido, por lo tanto se debe considerar su efecto como favorable $\gamma_P = 0,9$.

$$\sigma_{C,inf} = \sigma_{C1,inf} + \frac{M_{term}}{I_2} z_{i,2} + \frac{M_{Q,frec}}{I_2} z_{i,2} + 0,9 \cdot \Delta P_{dif,2} \left(\frac{1}{A_2} + \frac{e_2}{I_2} z_{i,2} \right) \leq f_{ctm,fl,j} \quad (3)$$

OBSERVAR, que $\sigma_{C1,inf}$ es tal que, $\sigma_{C0,inf}$ y $\sigma_{C1,inf}$ se deben recalcular de manera tal de usar $\gamma_P = 0,9$ en la Ecuación (1).

Adicionalmente se debe verificar la descompresión para la combinación cuasipermanente, si bien esto implica comprobar que las armaduras activas se encuentren en la sección comprimida, se admite la verificación simplificada del lado de la seguridad al nivel de las fibras inferiores.

$$\sigma_{C,inf} = \sigma_{C1,inf} + \frac{M_{term}}{I_2} z_{i,2} + \frac{M_{Q,cuasi}}{I_2} z_{i,2} + 0,9 \cdot \Delta P_{dif,2} \left(\frac{1}{A_2} + \frac{e_2}{I_2} z_{i,2} \right) \leq 0 \quad (4)$$

Por otra parte, para las fibras superiores se tiene,

$$\sigma_{C,sup} = \sigma_{C1,sup} - \frac{M_{term}}{I_2} z'_{s,2} - \frac{M_{Q,carac}}{I_2} z'_{s,2} + \gamma_P \cdot \Delta P_{dif,2} \left(\frac{1}{A_2} - \frac{e_2}{I_2} z'_{s,2} \right) \geq -0,6f_{ck,j}$$

Nuevamente el valor de γ_P dependerá del signo de la siguiente expresión $\left(\frac{1}{A_2} - \frac{e_2}{I_2} z'_{s,2} \right)$, pudiendo tener un efecto favorable o desfavorable.

$$\sigma_{C,sup} = \sigma_{C1,sup} - \frac{M_{term}}{I_2} z'_{s,2} - \frac{M_{Q,carac}}{I_2} z'_{s,2} + \{0,9\} \cdot \Delta P_{dif,2} \left(\frac{1}{A_2} - \frac{e_2}{I_2} z'_{s,2} \right) \geq -0,6f_{ck,j} \quad (5)$$

OBSERVAR, que $\sigma_{c1,sup}$ es tal que, $\sigma_{c0,inf}$ y $\sigma_{c1,inf}$ se deben calcular de manera tal de usar el mismo valor de γ_p en las Ecuaciones (2) y (5).

Por otra parte para las fibras superiores de la losa y aplicando teoría de resistencia de materiales para secciones compuestas tenemos que,

$$\sigma_{c,losa} = - \left[\frac{M_{term}}{I_2} z_{s,2} + \frac{M_{Q,carac}}{I_2} z_{s,2} - \begin{Bmatrix} 1,1 \\ 0,9 \end{Bmatrix} \cdot \Delta P_{dif,2} \left(\frac{1}{A_2} - \frac{e_2}{I_2} z_{s,2} \right) \right] n_e \geq -0,6 f_{ck,j} \quad (6)$$

OBSERVAR, que las ecuaciones (5) y (6) eventualmente pueden no ser aplicables debido a que es razonable pensar que la pieza estará fisurada para la combinación característica.

Donde,

- M_{term} , es el momento debido a las terminaciones, resto de acciones permanentes.
- $M_{Q,frec}$, es el momento debido a la acciones variables en su combinación frecuente.
- $M_{Q,cuasi}$, momento debido a la acciones variables en combinación cuasipermanente.
- $M_{Q,carac}$, es el momento debido a la acciones variables en su combinación característica.
- $\Delta P_{dif,2}$, es el valor de fuerza de las pérdidas diferidas de la fuerza de pretensado.
- $n_e = E_{c,losa} / E_{c,viga}$.
- Parámetros geométricos indicados en (3).

3. Estimación Fuerza de Pretensado

Para estimar el pretensado de la viga del trabajo deberemos utilizar las ecuaciones (1), (2), (3) y (4). Los parámetros geométricos y las solicitaciones son datos y de manera tal que la única incógnita sea P_0 , realizaremos las siguientes hipótesis,

- Pérdidas instantáneas 10% $\rightarrow P_1 = P_0 - \Delta P_{inst} = 0,9 \cdot P_0$
- Pérdidas diferidas totales 15% (5%+10%) $\rightarrow \Delta P_{dif,1} = 0,05 \cdot P_0$ y $\Delta P_{dif,2} = 0,10 \cdot P_0$

Asumiremos por ahora que los anteriores son los valores de pérdidas instantáneas y diferidas, que luego deberemos calcular detalladamente. Con estos valores se sustituye en las ecuaciones antes mencionadas y se obtendrá un intervalo de valores admisibles para $P_0 \rightarrow$ Se elige P_0 .

3.1. Fuerza de Pretensado

Una vez obtenida la fuerza de pretensado P_0 , debemos determinar la cantidad de cables y vainas a utilizar en nuestra viga. Para ello se debe de tener en cuenta lo indicado en el Artículo 5.10.2.1 y 5.10.3 de la norma UNE-EN-1992-1-1. Bajo la hipótesis de que el sistema de postensado a utilizar presenta cierto nivel de garantía adicional, la fuerza de pretensado P_0 debe estar limitada de manera tal de proporcionar sobre las armaduras activas una tensión no mayor que,

- a) Situaciones permanentes: luego de tensado ($P_1 = 0,9 \cdot P_0$)

$$\sigma_{pm0}(x) \leq \begin{cases} 0,75f_{pk} \\ 0,85f_{p0,1k} \end{cases} \rightarrow A_p \geq \frac{0,9 \cdot P_0}{\sigma_{pm0}} \quad (7)$$

b) Situaciones temporales: al momento del tensado (P_0)

$$\sigma_{p,m\acute{a}x} \leq \begin{cases} 0,80f_{pk} \\ 0,90f_{p0,1k} \end{cases} \rightarrow A_p \geq \frac{P_0}{\sigma_{p,max}} \quad (8)$$

Donde,

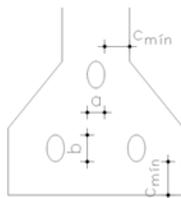
- f_{pk} , carga unitaria maxima de tracci3n.
- $f_{p0,1k}$, lımite elastico característico. Tomaremos $f_{p0,1k} = 0,9f_{pk}$.

A partir de las Ecuaciones (7) y (8) obtendremos la cantidad total de acero activo que necesitamos para nuestra viga, y utilizando por ejemplo el catálogo de MK4 disponible en el EVA obtendremos el número de cables y vainas necesarias para cubrir dicha cantidad de acero activo.

3.2. Disposici3n de cables

Consideraciones a la hora de elegir la cantidad y tamaño de vainas.

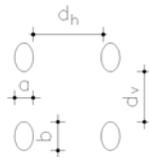
- Recubrimiento de armaduras activas postesas, UNE EN 1992-1-1 capítulo 4.4.1.2 (3).



$$c_{min} \geq \begin{cases} a \\ 0,5b \\ 4 \text{ cm} \end{cases} \text{ y } \neq 8 \text{ cm}$$

Figura 14: Recubrimiento mínimo

- Distancia entre armaduras activas postesas. UNE EN 1992-1-1 capítulo 8.10.1.3. La distancia mínima entre vainas también estará limitada por el tamaño máximo del agregado.



$$d_v \geq \begin{cases} b \\ 5 \text{ cm} \end{cases}$$

$$d_h \geq \begin{cases} a \\ 4 \text{ cm} \end{cases}$$

Figura 15: Distancias mínimas

4. Consideraciones geométricas adicionales

Se recomienda seguir lo indicado en el Capítulo 10.9.5.2 de la UNE-EN-1992-1-1 para definir la geometría en la zona de apoyos (Figura 16). Por otra parte, la Figura 17 muestra una primer guía para definir la geometría en los extremos de la viga, esto se verá con mayor profundidad en el tema anclajes

de la fuerza de pretensado. Si el estudiante desea avanzar en esta instancia podrá profundizar en la definición de la geometría de la viga en la zona de anclaje utilizando la tabla 11 del catálogo MK4.

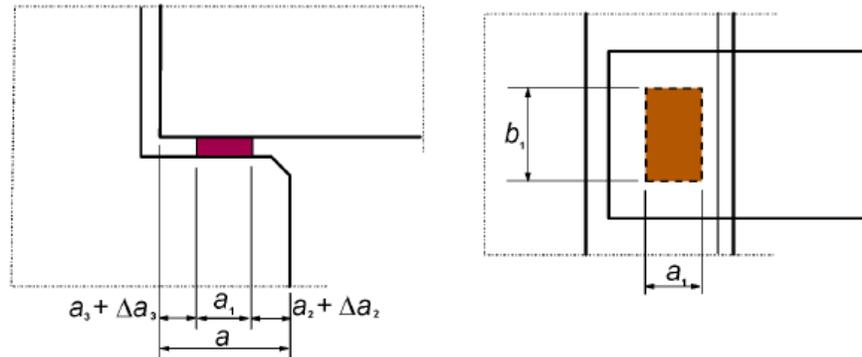


Figura 16: Apoyo de viga

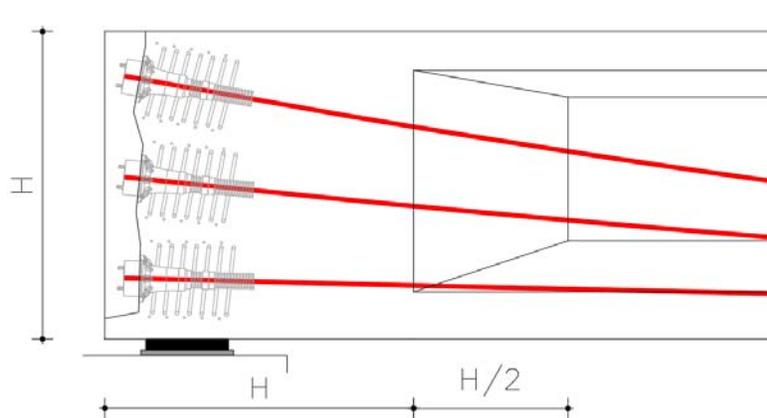


Figura 17: Geometría de viga en apoyo