

Requisitos alternativos para el diseño de elementos de hormigón armado y pretensado solicitados a flexión y a compresión

ACTUALIZACIÓN PARA EL CÓDIGO 2002

El nuevo Apéndice B contiene los requisitos que fueron desplazados cuando los Requisitos de Diseño Unificados, que anteriormente estaban en el Apéndice B, se incorporaron al cuerpo principal del Código 2002. En particular, los requisitos para redistribución de los momentos del Capítulo 8, los métodos de diseño para elementos solicitados a flexión y a compresión del Capítulo 10, y los correspondientes requisitos para los elementos de hormigón pretensado del Capítulo 18 fueron trasladados del cuerpo principal del código de 1999 al Apéndice B del Código de 2002.

B.1 CAMPO DE VALIDEZ

El artículo 8.1.2 permite utilizar el Apéndice B para diseñar elementos de hormigón armado y pretensado solicitados a flexión y compresión. Debido a que se podría pensar que un apéndice no forma oficialmente parte de un documento legal a menos que su adopción se especifique explícitamente, el cuerpo principal del código contiene esta referencia específica que convierte al Apéndice B en una parte legal del código.

El Apéndice B contiene requisitos para la redistribución de los momentos, para el diseño de elementos solicitados a flexión y compresión, y para elementos de hormigón pretensado que durante muchos años estuvieron en el cuerpo principal del código. Utilizar estos requisitos es tan válido como utilizar los artículos correspondientes del cuerpo principal.

La sección B.1 indica las secciones del Apéndice B que se deben utilizar en reemplazo de las del cuerpo principal del código cuando para diseñar una estructura se utiliza el Apéndice B. Debemos enfatizar que si se decide utilizar una sección del Apéndice B se deben utilizar todas las secciones de este apéndice. Todas los demás requisitos del cuerpo principal también son aplicables.

De acuerdo con RB.1, se pueden utilizar tanto los factores de carga y reducción de la resistencia del Capítulo 9 como los del nuevo Apéndice C (ver el Capítulo 33 de esta publicación). Los factores de reducción de la resistencia dados en el Capítulo 9 o en el Apéndice C par secciones controladas por tracción sólo se deben utilizar para elementos solicitados exclusivamente a flexión. De manera similar, los factores de reducción de la resistencia para secciones controladas por compresión se deben utilizar para elementos solicitados a flexión y carga axial en los cuales ϕP_n es mayor o igual que $0,10f_cA_g$ o la carga axial

balanceada ϕP_b , cualquiera sea el valor que resulte menor (ver 9.3.2.2 y C3.2.2). Para los demás casos ϕ se puede incrementar linealmente hasta 0,90 a medida que ϕP_n disminuye desde $0,10f_c A_g$ o ϕP_n hasta cero (9.3.2.2 y C3.2.2).

B8.4 REDISTRIBUCIÓN DE LOS MOMENTOS NEGATIVOS EN LOS ELEMENTOS CONTINUOS NO PRETENSADOS SOLICITADOS A FLEXIÓN

La sección B8.4 permite redistribuir los momentos negativos en los elementos continuos solicitados a flexión cuando los porcentajes de armadura no superan cierto valor especificado.

En el Código ACI 318 1963 se permitió por primera vez modificar los momentos negativos como máximo un 10 por ciento (Fig. RB8.4). Las experiencias con el uso de este requisito, aunque satisfactorias, seguían siendo conservadoras. Posteriormente el máximo porcentaje de modificación se incrementó a los valores indicados en la Figura 32-1. El aumento se basaba en el mejor conocimiento del comportamiento bajo cargas últimas y de servicio que se había logrado a través de los ensayos y estudios analíticos realizados. El Apéndice B del Código 2002 mantiene los mismos criterios de modificación.

En la Figura 32-2 se ilustra una comparación entre la redistribución permitida de acuerdo con las secciones 8.4 y B8.4 del Código 2002, en función de la deformación en el acero más traccionado, ϵ_t .

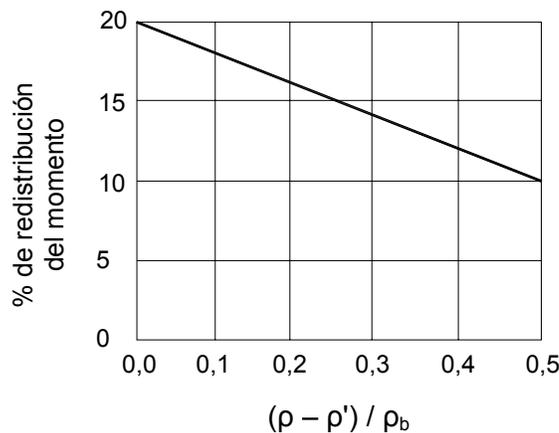


Figura 32-1 – Redistribución admisible de los momentos para elementos no pretensados

En muchos casos la aplicación de B8.4 permitirá reducir considerablemente la armadura total requerida sin reducir la seguridad, y además reducir la congestión de las armaduras en las regiones de momento negativo.

De acuerdo con 8.9, los elementos continuos se deben diseñar para resistir más de una configuración de sobrecargas. Para cada una de las configuraciones se realiza un análisis elástico, y se obtiene una envolvente de los momentos en cada sección. De este modo, para cualquiera de las condiciones de carga consideradas, ciertas secciones en un tramo dado llegarán al momento último, mientras que las demás tendrán capacidad de reserva. Ensayos realizados indican que una estructura puede continuar soportando cargas adicionales si las secciones que han alcanzado sus capacidades de momento continúan rotando como rótulas plásticas y redistribuyen los momentos a otras secciones hasta que se forma un mecanismo de colapso.

Reconocer esta capacidad de carga adicional superior a la indicada por el diseño original sugiere la posibilidad de rediseñar para lograr ahorros en los materiales. La sección B8.4 permite rediseñar incrementando o disminuyendo los momentos elásticos negativos para cada una de las condiciones de carga (con la correspondiente modificación de los momentos positivos para continuar satisfaciendo los principios de la estática). Estas modificaciones de los momentos pueden reducir tanto los momentos máximos positivos como los momentos máximos negativos de la envolvente final. Para asegurar una capacidad de rotación adecuada, las cuantías de acero en todas las secciones deben satisfacer los requisitos de B8.4, lo cual se ilustra en la Figura 32-1.

En ciertos casos el principal beneficio que se obtendrá de la aplicación de B8.4 será simplemente una reducción del momento negativo en los apoyos, con lo cual se evitará la congestión de las armaduras o se reducirán las dimensiones de la sección de hormigón. En este caso, la cuantía de acero aún debe satisfacer la Figura 32-1.

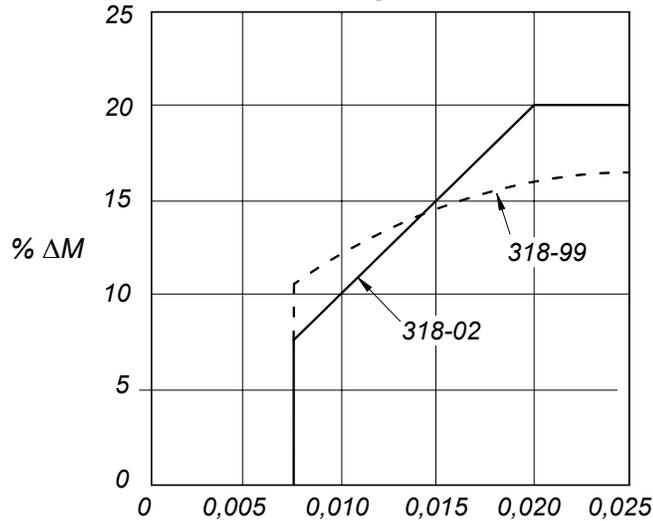


Figura 32-2 – Comparación de la redistribución de los momentos para elementos no pretensados

El campo de validez de los requisitos de B8.4 se puede resumir de la siguiente manera:

1. Los requisitos se aplican a los elementos continuos no pretensados solicitados a flexión. La redistribución de momentos para los elementos pretensados se trata en B18.10.4.
2. Los requisitos no se aplican a los elementos diseñados usando los momentos aproximados indicados en 8.3.3 ni a los sistemas de losas diseñados por el Método de Diseño Directo (ver 13.6.1.7 y RB8.4).
3. Los momentos flectores se deben determinar mediante métodos analíticos, tales como distribución de momentos. No se permite redistribuir los momentos determinados en base a métodos aproximados.
4. Las cuantías de la armadura ρ ó $(\rho - \rho')$ en una sección en la cual se ha de modificar el momento no debe ser mayor que un medio de la cuantía balanceada, ρ_b , definida por la Ecuación (B8-1).
5. El máximo porcentaje admisible de aumento o disminución del momento negativo está dado por:

$$20 \left(1 - \frac{\rho - \rho'}{\rho_b} \right)$$

6. La redistribución de los momentos negativos se realiza para cada una de las configuraciones de cargas consideradas. Luego los elementos se dimensionan para los máximos momentos modificados que resultan de todas estas condiciones de cargas.
7. La modificación de los momentos negativos de los apoyos de cualquier tramo exige modificar también los momentos positivos del mismo tramo (B8.4.2). Para mantener las condiciones de equilibrio, una disminución del momento negativo en el apoyo exige un aumento del momento positivo del tramo.
8. En todos los nudos se debe mantener el equilibrio estático, tanto antes como después de la redistribución de los momentos.

9. En el caso que los momentos negativos a ambos lados de un apoyo fijo sean desiguales (es decir, cuando los tramos adyacentes tienen diferentes longitudes), la diferencia entre estos dos momentos se toma hacia el apoyo. Si se modifica alguno de estos dos momentos negativos, la diferencia resultante entre los momentos modificados se toma hacia el apoyo.
10. Se pueden realizar tantos ciclos de redistribución de momentos como se desee, siempre que luego de cada ciclo de redistribución se calcule un nuevo incremento o disminución admisible para el momento negativo en base a las cuantías de acero finales provistas para los momentos de apoyo modificados obtenidos del ciclo anterior.
11. Una vez finalizado el diseño y seleccionadas las armaduras es necesario comparar las cuantías reales dispuestas con el valor de la Figura 32-1 correspondiente al porcentaje de redistribución de momento aplicado, y verificar que se satisfagan los requisitos de B8.4.

El Capítulo 9 de las Notas sobre ACI 318-99 contiene ejemplos que ilustran estos requisitos.

B10.3 PRINCIPIOS Y REQUISITOS GENERALES – ELEMENTOS NO PRETENSADOS

Un elemento alcanza la resistencia a flexión última cuando el valor de la deformación específica en la fibra comprimida extrema llega a la deformación específica última del hormigón, ϵ_u (aplastamiento). En ese momento la deformación específica en la armadura traccionada puede ser igual a la deformación específica correspondiente a la primera fluencia ($\epsilon_s = \epsilon_y = f_y/f_u$), puede ser menor que la deformación específica de fluencia, o puede ser mayor que la deformación específica de fluencia. La condición de deformación que existe en el acero cuando la deformación específica del hormigón llega al valor último depende de la proporción relativa de armadura con respecto al hormigón. Si la cantidad de acero es lo suficientemente baja, la deformación en el acero traccionado superará ampliamente la deformación de fluencia ($\epsilon_s \gg \epsilon_y$) cuando la deformación en el hormigón llegue a ϵ_u , con lo cual habrá grandes flechas y habrá un aviso de la falla inminente (condición de falla dúctil). Si se coloca una mayor cantidad de acero es posible que la deformación específica en el acero traccionado no llegue a la deformación de fluencia ($\epsilon_s < \epsilon_y$) cuando la deformación en el hormigón llegue a ϵ_u , lo cual significaría que las flechas serían pequeñas y habría poco aviso de la falla inminente (condición de falla frágil). Pero siempre es aconsejable anticipar modos de falla dúctiles.

La intención de los requisitos de B10.3.3 es asegurar un modo de falla dúctil, limitando la cantidad de armadura de tracción a 75 por ciento de la cuantía balanceada para garantizar que el acero llegue a la fluencia antes que se produzca el aplastamiento del hormigón. Si se utiliza la cuantía balanceada la deformación específica en el acero llegará a la deformación de fluencia en el mismo instante en que el hormigón llegue a la deformación correspondiente al aplastamiento.

La máxima cantidad de armadura permitida en una sección rectangular armada solamente con armadura de tracción es:

$$\rho_{\max} = 0,75 \bar{\rho}_b = 0,75 \left[0,85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \times \frac{87.000}{87.000 + f_y} \right]$$

siendo $\bar{\rho}_b$ la cuantía de armadura que produce condiciones balanceadas de deformación para una sección rectangular armada solamente con armadura de tracción.

La máxima cantidad de armadura permitida en una sección con alas armada solamente con armadura de tracción es:

$$\rho_{\max} = 0,75 \left[\frac{b_w}{b} (\bar{\rho}_b + \rho_f) \right]$$

donde b_w = ancho del alma
 b = ancho de ala efectivo (ver 8.10)
 $\rho_f = A_{sf} / b_w d$
 h_f = espesor del ala

La máxima cantidad de armadura requerida en una sección rectangular con armadura de compresión es (B10.3.3):

$$\rho_{\max} = 0,75 \bar{\rho}_b + \rho' \frac{f'_{sb}}{f_y}$$

donde $\rho' = A'_s / bd$

A'_s = área de la armadura comprimida

f'_{sb} = tensión en la armadura comprimida para la condición de deformación balanceada

$$= 87.000 - \frac{d'}{d} (87.000 + f_y) \leq f_y$$

d' = distancia entre la fibra comprimida extrema y el baricentro de la armadura de compresión

Observar que cuando hay armadura de compresión la porción de ρ_b aportada por la armadura de compresión ($\rho' f'_{sb} / f_y$) no se debe reducir aplicando el factor 0,75. Para lograr un comportamiento dúctil en las vigas que tienen armadura de compresión sólo es necesario limitar la porción de la armadura traccionada balanceada por la compresión en el hormigón ($\bar{\rho}_b$).

Se debe observar que el objetivo del límite establecido para la armadura traccionada de los elementos solicitados a flexión es lograr un comportamiento dúctil. Ensayos realizados han demostrado que las vigas armadas con la cantidad de armadura balanceada calculada se comportan en realidad de forma dúctil, con flechas y fisuración que aumentan gradualmente hasta llegar a la falla. No ocurren fallas bruscas por compresión a menos que la cantidad de armadura colocada sea considerablemente mayor que la cantidad balanceada calculada.

Esto se debe en parte al límite para la deformación específica última del hormigón supuesta para el diseño, $\epsilon_u = 0,003$. La deformación específica máxima real determinada en base a ensayos físicos puede superar ampliamente este valor. El valor 0,003 sirve de límite inferior. A menos que se requieran ductilidades inusualmente elevadas, para la mayoría de los diseños aplicando la limitación de $0,75\rho_b$ se obtendrá un comportamiento dúctil.

En el Ejemplo 7.1 se presenta una comparación del método de diseño unificado con los requisitos de B10.3, para el caso de una viga rectangular armada solamente con armadura de tracción. El Ejemplo 7.3 presenta una comparación similar para el caso de una viga rectangular con armadura de compresión.

B18.1 HORMIGÓN PRETENSADO - CAMPO DE VALIDEZ

Esta sección contiene un listado de los requisitos del código que no se aplican a los elementos de hormigón pretensado. El artículo RB18.1.3 contiene un comentario detallado y presenta los motivos específicos por los cuales se excluyeron algunos de estos requisitos.

B18.8 LÍMITES PARA LA ARMADURA EN LOS ELEMENTOS PRETENSADOS SOLICITADOS A FLEXIÓN

En la Figura 32-3 se ilustran los requisitos de B18.8 para el porcentaje de armadura. Observar que se puede agregar armadura para tener un índice de armadura mayor que $0,36\beta_1$, pero no se puede asumir que esta armadura adicional contribuye a la resistencia al momento.

El artículo B18.8.3 requiere que la cantidad total de armadura pretensada y no pretensada de los elementos solicitados a flexión sea adecuada para desarrollar una resistencia la momento de diseño como mínimo igual a 1,2 veces el momento de fisuración ($\phi M_n \geq \phi M_{cr}$), donde M_{cr} se calcula aplicando la teoría de la elasticidad usando un módulo de rotura igual a $7,5\sqrt{f'_c}$ (ver 9.5.2.3). Los requisitos de B18.8.3 son análogos a los de 10.5 para elementos no pretensados, y su intención es que sirvan como

una precaución contra las fallas bruscas por flexión provocadas por la rotura de los tendones de pretensado inmediatamente después de la fisuración. El requisito asegura que habrá fisuración antes de llegar a la resistencia a la flexión, y con un margen suficiente como para permitir que se produzcan flechas significativas que advertirán que se está llegando a la capacidad última. En los elementos pretensados típicos el margen entre el momento de fisuración y la resistencia a flexión generalmente es suficientemente grande, pero el diseñador se debe asegurar realizando esta verificación.

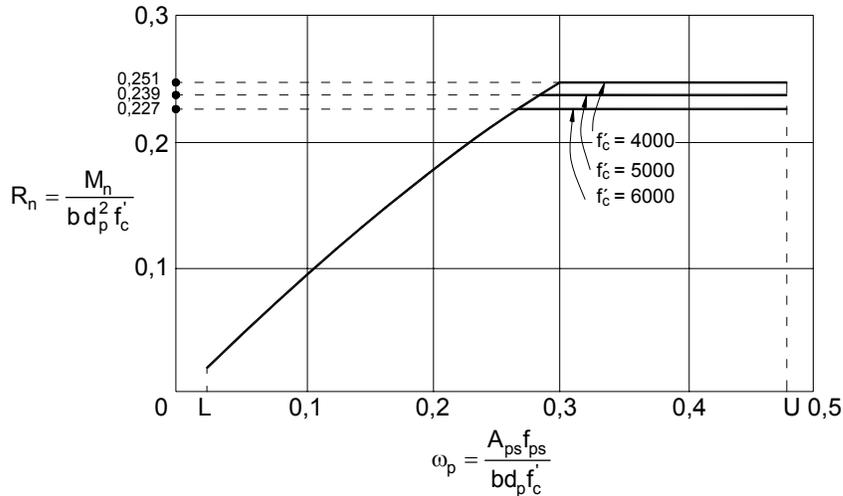


Figura 32-3 – Límites admisibles para la armadura pretensada e influencia sobre la resistencia al momento

El momento de fisuración M_{cr} de un elemento pretensado se determina sumando todos los momentos que provocarán una tensión en la fibra inferior igual al módulo de rotura f_r . En el Capítulo 24 de esta publicación se presentan ecuaciones detalladas que permiten calcular M_{cr} para elementos pretensados.

Observar que hay una excepción en B18.3.3 que permite obviar el requisito de $1,2M_{cr}$ en el caso de (a) losas en dos direcciones postesadas con tendones no adherentes, y (b) elementos solicitados a flexión en los cuales la resistencia a la flexión mayor o igual que dos veces la requerida por 9.2. El Capítulo 24 de esta publicación contiene más información sobre este tema.

B18.10.4 REDISTRIBUCIÓN DE LOS MOMENTOS NEGATIVOS EN LOS ELEMENTOS CONTINUOS PRETENSADOS SOLICITADOS A FLEXIÓN

El comportamiento inelástico de algunas secciones de las vigas y losas de hormigón pretensado puede provocar una redistribución de los momentos a medida que el elemento se acerca a su resistencia. Bajo ciertas circunstancias reconocer este comportamiento puede representar una ventaja en el diseño. Aunque los métodos de diseño rigurosos para determinar la redistribución de los momentos son complejos, se puede aplicar un método racional permitiendo un ajuste razonable de la sumatoria de los momentos debidos a las cargas gravitatorias mayoradas calculados elásticamente y los momentos secundarios no mayorados debidos al pretensado. El porcentaje de modificación se debe mantener dentro de límites de seguridad predeterminados.

De acuerdo con B18.10.4.1, el máximo porcentaje admisible de incremento o disminución del momento negativo en un elemento continuo pretensado solicitado a flexión es:

$$20 \left[1 - \frac{\omega_d + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega')}{0,36 \beta_1} \right]$$

Observar que solamente se permite redistribuir los momentos negativos cuando en los apoyos se provee armadura adherente de acuerdo con 18.9. La armadura adherente garantiza que luego de la fisuración las vigas y losas con tendones no adherentes actuarán como elementos flexionados, y no como una serie de arcos atirantados.

Al igual que en el caso de los elementos no pretensados, cuando se modifican los momentos negativos de los apoyos de un tramo también se deben modificar los momentos positivos del mismo tramo (B18.10.4.2). Para mantener la condición de equilibrio, una disminución del momento negativo de un apoyo exige un correspondiente aumento del momento positivo del tramo.

La cantidad de redistribución admisible depende de que las secciones críticas tengan suficiente capacidad de deformación inelástica. Las secciones que tienen elevadas cantidades de armadura no tendrán suficiente capacidad de deformación inelástica. Por lo tanto, sólo está permitido redistribuir los momentos negativos si la sección se diseña de manera que el índice de armadura correspondiente sea menor que $0,24\beta_1$ (ver B18.10.4.3). Este requisito concuerda con los requisitos de B8.4 para elementos no pretensados. Observar que cada una de las expresiones de B18.10.4.3 es igual a $0,85a/d_p$ siendo a la altura de la distribución rectangular de tensiones equivalente para la sección considerada (ver 10.2..7.1).

En la Figura 32-4 se ilustra una comparación entre el porcentaje de redistribución permitida de acuerdo con las secciones 18.10.4 y B18.10.4 del código 2002, en función de la deformación específica en el acero más traccionado, ϵ_t .

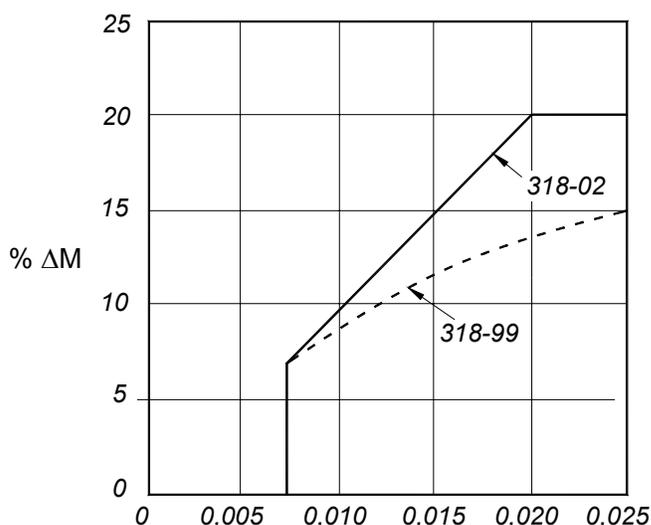


Figura 32-4 – Comparación de la redistribución de los momentos para elementos pretensados