

Método de diseño alternativo (Diseño por tensiones admisibles)

ACTUALIZACIÓN PARA EL CÓDIGO 2002

El Apéndice A de ACI 318-99, "Método de Diseño Alternativo," fue eliminado del Código 2002. Este método de diseño también se conoce como Diseño por Tensiones de Trabajo o Diseño por Tensiones Admisibles. Aunque este método fue eliminado del código, el artículo R1.1 del Comentario de ACI 318-02 dice: "El Método de Diseño Alternativo del Código 1999 se puede utilizar en reemplazo de las secciones aplicables del Código 2002." Observar que el Comentario no tiene valor legal. Por lo tanto, se advierte a los diseñadores que piensan utilizar el método alternativo en jurisdicciones que han adoptado el Código ACI 318-02 que deben solicitar la autorización de la correspondiente autoridad local.

CONSIDERACIONES GENERALES

Antes de la edición 1956 del código, el método de diseño por tensiones de trabajo, muy similar al método de diseño alternativo del Apéndice A, era el único método disponible para diseñar elementos de hormigón armado. El método de diseño por resistencia se introdujo en el código por primera vez en 1956, en forma de un apéndice. En la siguiente edición (1963), el diseño por resistencia se trasladó al cuerpo principal del código como una alternativa al método de diseño por tensiones de trabajo. Debido a la gran aceptación que tuvo el método por resistencia, el código 1971 dedicó apenas una página al método de las tensiones de trabajo. Luego el método de las tensiones de trabajo se trasladó del cuerpo principal del código a un apéndice de la edición 1983. A partir de entonces el método comenzó a llamarse "método de diseño alternativo," y permaneció en un apéndice hasta el código 1999.

El método de diseño alternativo presentado en el Apéndice A del código 1999 es un método que intenta lograr seguridad estructural y un comportamiento adecuado de la estructura bajo condiciones de servicio limitando las tensiones bajo cargas de servicio a ciertos valores especificados. Estas "tensiones admisibles" están dentro del rango de comportamiento elástico del hormigón en compresión y del acero en tracción (y compresión). Se asume que el hormigón se fisura y que por lo tanto no proporciona ninguna resistencia a la tracción. Las tensiones en el hormigón se representan mediante una distribución elástica lineal. El acero generalmente se transforma en un área de hormigón equivalente.

El método de diseño alternativo es idéntico al "método de diseño por tensiones de trabajo" utilizado hasta 1963 para elementos solicitados a flexión sin carga axial. Los procedimientos para el diseño de elementos solicitados a compresión y flexión, diseño al corte y diseño para adherencia y anclaje de las armaduras siguen los procedimientos del método de diseño por resistencia del cuerpo principal del código, en el cual se aplican diferentes factores para reflejar el diseño bajo cargas de servicio. Los procedimientos del método de diseño alternativo no han sido actualizados tan exhaustivamente como el resto del código.

El reemplazo del método de diseño por tensiones admisibles y el método de diseño alternativo por el método de diseño por resistencia se puede atribuir a diversos factores, entre los cuales se pueden mencionar:

- el tratamiento uniforme de todos los tipos de cargas, lo que significa que todos los factores de carga son iguales a la unidad. No se considera la diferente variabilidad de los diferentes tipos de cargas (cargas permanentes y sobrecargas).
- Se desconoce el factor de seguridad contra la falla (como se discute a continuación).
- Los diseños típicamente son más conservadores y, para un mismo conjunto de momentos de diseño, generalmente requieren más armadura o mayores dimensiones que las requeridas por el método de diseño por resistencia.

Se debe observar que en general los problemas de fisuración y flechas excesivas son menos probables en los elementos de hormigón armado que se diseñan en base a las tensiones de trabajo o el método de diseño alternativo que en aquellos que se diseñan usando métodos de resistencia cuando se utiliza armadura Grado 60. Esto se debe al hecho que con el diseño por resistencia y armadura Grado 60 las tensiones bajo cargas de servicio son considerablemente mayores que lo que serían si se utilizara el diseño por tensiones de trabajo.

Esto significa que los anchos de las fisuras y la limitación de las flechas son aspectos más críticos en los elementos diseñados utilizando métodos de diseño por resistencia, ya que estos factores están directamente relacionados con las tensiones en la armadura.

En la actualidad el método de diseño alternativo prácticamente ha caído en desuso, excepto para algunos tipos de estructuras especiales o por parte de diseñadores no familiarizados con el diseño por resistencia. Las zapatas son los elementos más frecuentemente diseñados usando el método de diseño alternativo. Observar que las estructuras de contención de agua se deben diseñar de acuerdo con ACI 350, *Environmental Engineering Concrete Structures*.

COMPARACIÓN DEL DISEÑO POR TENSIONES DE TRABAJO CON EL DISEÑO POR RESISTENCIA

Para ilustrar cómo varía el factor de seguridad del diseño por tensiones de trabajo respecto del método de diseño por resistencia, analizaremos una sección rectangular y una sección Te con las dimensiones indicadas en las Figuras 31-1 y 31-2, respectivamente. En ambos casos $f'_c = 4000$ psi; $f_y = 60$ ksi y la cantidad de armadura se hizo variar entre la armadura mínima de flexión de acuerdo con 10.5.1 y un máximo de $0,75\rho_b$ de acuerdo con el Apéndice B del Código 2002. Las resistencias a flexión se calcularon usando tres procedimientos:

1. Resistencia nominal a flexión, M_n , usando el diagrama rectangular de tensiones de 10.2.7. Los resultados se grafican en línea llena.
2. Resistencia nominal a flexión en base a las condiciones de equilibrio y compatibilidad. Este análisis detallado se realizó usando el programa Response 2000^{31.1}, adoptando relaciones tensión-deformación representativas para el hormigón y el acero de la armadura. Los resultados se grafican con el símbolo "+".
3. Análisis por tensiones de trabajo usando relaciones tensión-deformación elástico-lineales para el hormigón y la armadura y las tensiones admisibles bajo cargas de servicio del Apéndice A del código 1999. Los resultados se grafican mediante las líneas discontinuas que representan M_s .

Observaciones:

- (a) La resistencia a flexión en base al diagrama rectangular de tensiones, M_n , es muy similar a los resultados obtenidos del análisis detallado usando las condiciones de equilibrio y compatibilidad.
- (b) El factor de seguridad, representado por la relación $\phi M_n/M_s$, es altamente variable. Para la sección rectangular esta relación varía entre 2,3 y 2,8 mientras que para la sección Te varía entre 2,3 y 2,4. Comparando, para el diseño a flexión usando los factores de carga y reducción de la resistencia del Capítulo 9 el factor de seguridad está comprendido entre $1,2/0,9 = 1,33$ cuando predomina la carga permanente, y $1,6/0,9 = 1,78$ cuando predomina la sobrecarga. Para los factores de carga y reducción de la resistencia del Apéndice C, estas relaciones son iguales a $1,4/0,9 = 1,56$ y $1,7/0,9 = 1,89$ respectivamente.

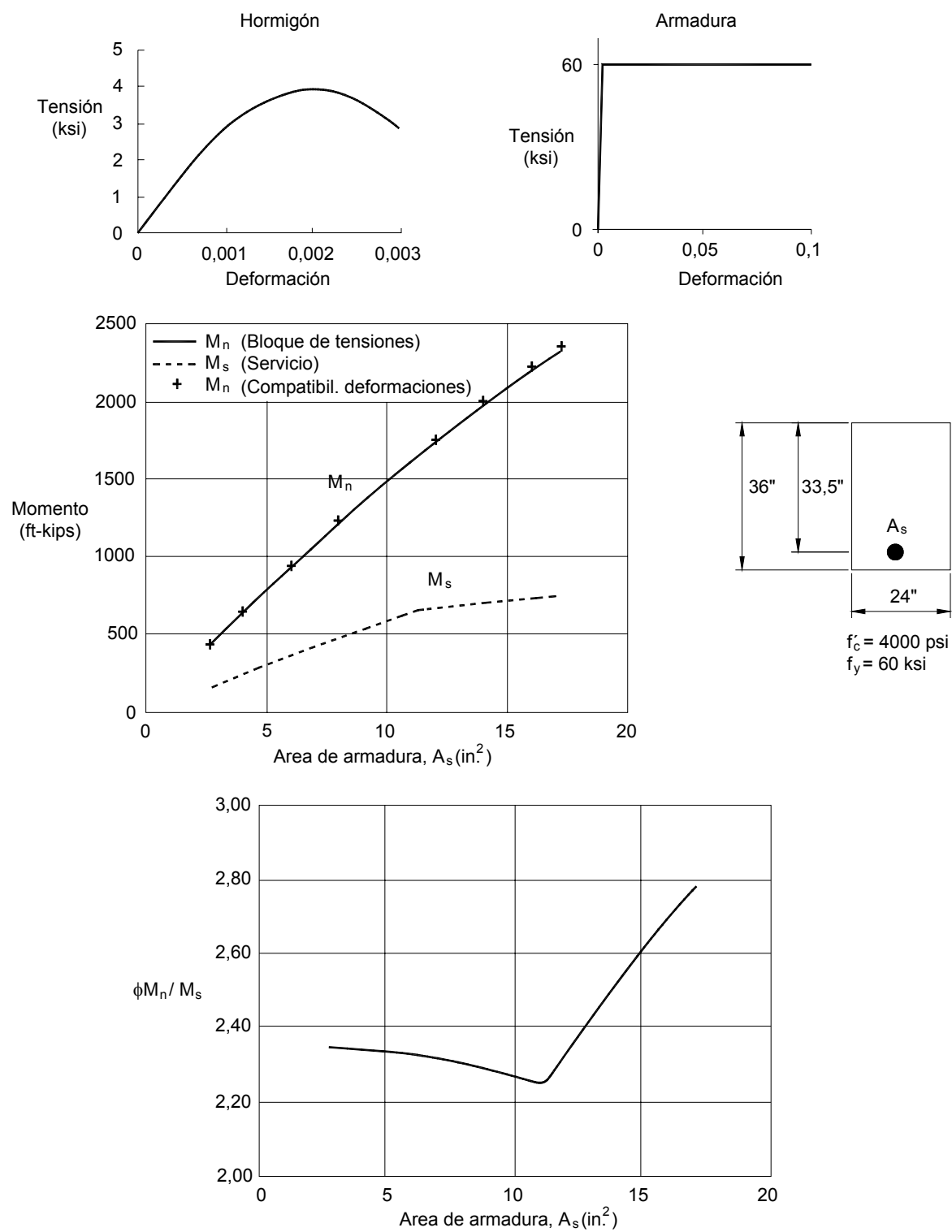


Figura 31-1 – Sección rectangular

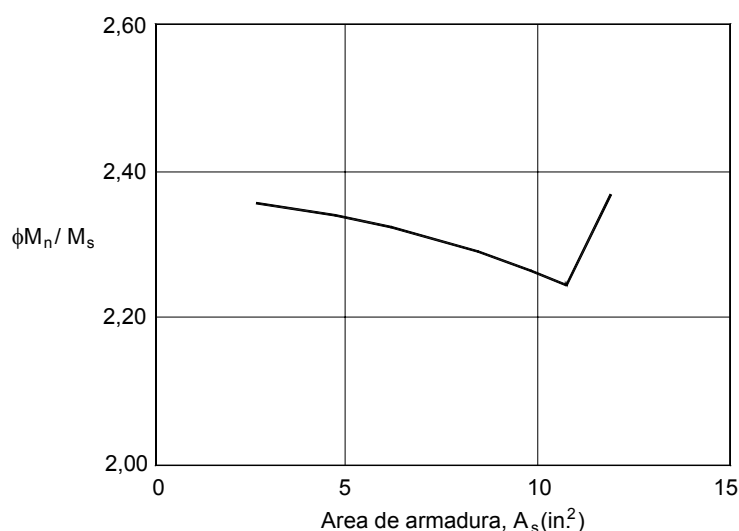
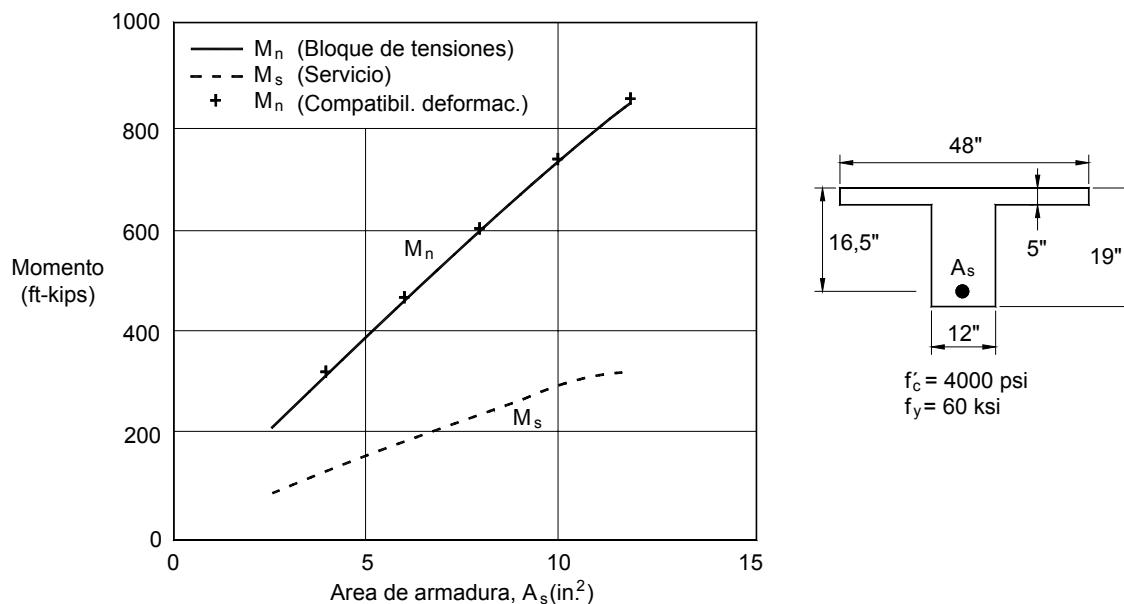


Figura 31-2 – Sección Te

Los siguientes párrafos describen algunos requisitos del Apéndice A del código 1999.

CAMPO DE VALIDEZ (A.1 DEL CÓDIGO '99)

El código especifica que cualquier elemento de hormigón armado no pretensado se puede diseñar usando el método de diseño alternativo del Apéndice A. Los elementos de hormigón pretensado se diseñan utilizando un enfoque similar descrito en el Capítulo 18 del código.

Todos los demás requisitos del código son aplicables a los elementos diseñados usando el método de diseño alternativo, a excepción de los requisitos sobre redistribución de momentos de la sección 8.4. Estos incluyen, por ejemplo, la distribución de la armadura de flexión y la esbeltez de los elementos comprimidos, así como requisitos relacionados con el comportamiento en servicio tales como la limitación de las flechas y la fisuración.

REQUISITOS GENERALES (A.2 DEL CÓDIGO '99)

Para este método de diseño los factores de carga correspondientes a todos los tipos de cargas se toman iguales a la unidad. Cuando hay cargas de viento o cargas sísmicas combinadas con otros tipos de cargas, el elemento se debe diseñar para resistir el 75% de la solicitación combinada total. Este enfoque es similar al del método de las tensiones de trabajo original, el cual permitía un exceso de resistencia de un tercio para las combinaciones de cargas que incluían efectos sísmicos o de viento.

Cuando la acción de las cargas permanentes reduce los efectos de otras cargas, para calcular los efectos de las cargas se puede utilizar el 85% de la carga permanente.

TENSIONES ADMISIBLES BAJO CARGAS DE SERVICIO (A.3 DEL CÓDIGO '99)

Las tensiones en el hormigón bajo cargas de servicio no deben superar los siguientes valores:

Flexión	Tensión en la fibra comprimida extrema	$0,45 f'_c$
Aplastamiento	En el área cargada	$0,3 f'_c$

Esta sección también contiene las tensiones admisibles del hormigón solicitado a corte, las cuales se describen en mayor detalle en A.7.

Las tensiones de tracción en la armadura bajo cargas de servicio no deben superar los siguientes valores:

Armadura Grado 40 y 50	20.000 psi
Armadura Grado 60 o superior, malla de alambre soldada (de alambres lisos o conformados)	24.000 psi

El artículo A.3.2(c) contiene tensiones de tracción admisibles para cierto caso especial.

FLEXIÓN (A.5 DEL CÓDIGO '99)

El diseño a flexión de los elementos se basa en las siguientes hipótesis:

- Las deformaciones varían linealmente con la distancia al eje neutro. Para los elementos de gran altura se debe utilizar una distribución no lineal de las deformaciones (ver 10.7).
- Bajo condiciones de carga de servicio, la relación tensión-deformación del hormigón comprimido es lineal mientras las tensiones son menores o iguales que la tensión admisible.
- En los elementos de hormigón armado el hormigón no resiste tracción.
- La relación de módulos, $n = E_s/E_c$, se puede tomar igual al entero más próximo, pero nunca menor que 6. El código contiene requisitos adicionales para el hormigón liviano.
- En los elementos con armadura de compresión, para calcular las tensiones se debe utilizar una relación de módulos efectiva igual a $2 E_s/E_c$ para transformar la armadura de compresión. La tensión en la armadura comprimida debe ser menor o igual que la tensión de tracción admisible.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA FLEXIÓN

Las siguientes ecuaciones se utilizan en el método de diseño alternativo para diseñar a flexión un elemento de sección transversal rectangular que solamente contiene armadura de tracción. Estas ecuaciones se basan en la hipótesis indicadas en el párrafo anterior y utilizan la simbología definida en la Figura 31-3. El desarrollo de estas ecuaciones se puede consultar en las

Referencias 33.2 y 33.3 o en otros textos sobre el diseño de hormigón armado. También es posible desarrollar ecuaciones para secciones transversales de otras geometrías, como por ejemplo para elementos con alas o con armadura de compresión.

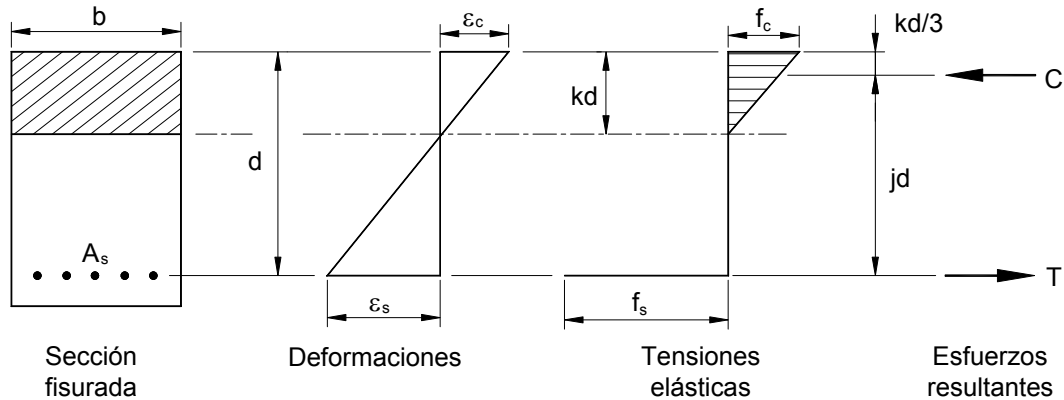


Figura 31-3 – Hipótesis del Método de Diseño Alternativo para flexión

$$k = \sqrt{2\rho n + (\rho n)^2} - \rho n$$

donde

$$\rho = \frac{A_s}{bd}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

$$j = 1 - \left(\frac{k}{3} \right)$$

$$f_s = \frac{M_s}{A_s j d}$$

$$f_c = \frac{2M_s}{k j b d^2}$$

A.7 CORTE Y TORSIÓN

El diseño a corte y torsión de acuerdo con el Apéndice A de ACI 318-99 se basa en los métodos de diseño por resistencia del Capítulo 11 del Código 1999, con coeficientes reducidos que permiten utilizar las ecuaciones para cargas no mayoradas bajo condiciones de carga de servicio.

Se presenta un conjunto completo de ecuaciones para el diseño al corte para facilitar el trabajo del usuario y también con el objetivo de explicitar las ecuaciones modificadas. Como las ecuaciones se presentan en el mismo formato que en el Capítulo 11 del código no las discutiremos en esta sección.

REFERENCIAS

- 33.1 Bentz, Evans C. y Collins, Michael P., "Response 2000 – Reinforced Concrete Sectional Analysis Using the Modified Compression Field Theory." Este documento se puede descargar de <http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/r2k.htm>.
- 33.2 MacGregor, J.G., *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, 2º Ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1997, p. 939.
- 33.3 Leet, Kennet, *Reinforced Concrete Design*, McGraw-Hill, New York, 1984, p. 544.

Ejemplo 31.1 – Diseño de una viga rectangular que solamente tiene armadura de tracción

Dada la viga de sección rectangular del Ejemplo 10.1, modificar la altura de la viga y/o la armadura requerida de manera de satisfacer las tensiones admisibles del método de diseño alternativo.

Los momentos bajo cargas de servicio son:

$$M_d = 56 \text{ ft-kips y } M_\ell = 35 \text{ ft-kips.}$$

$$f'_c = 4000 \text{ psi}$$

$$f_y = 60.000 \text{ psi}$$

$$A_s = 2,79 \text{ in.}^2$$

$$b = 10 \text{ in.}$$

$$h = 16 \text{ in.}$$

$$d = 13,5 \text{ in.}$$

Cálculos y discusión

Referencia del Código

1. Para comparar el diseño en base al método de diseño alternativo con el método de los factores de carga del código, verificar las tensiones bajo cargas de servicio en el hormigón y en el acero correspondientes al diseño dado en el Ejemplo 10.1.

$$M_s = M_d + M_\ell = (56 + 35)(12) = 1092 \text{ in.-kips}$$

$$E_c = 57.000\sqrt{f'_c} = 57.000\sqrt{4000} = 3.605.000 \text{ psi}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{29.000.000}{3.605.000} = 8,04 \quad \text{Usar } n = 8$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{2,79}{(10 \times 13,5)} = 0,0207$$

$$\rho n = (0,0207)(8) = 0,1656$$

$$k = \sqrt{2\rho n + (\rho n)^2} - \rho n = \sqrt{2(0,1656) + (0,1656)^2} - 0,1656 = 0,433$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0,433}{3} = 0,856$$

$$f_s = \frac{M_s}{A_s j d} = \frac{1092}{[(2,79)(0,856)(13,5)]} = 33,88 \text{ ksi} > 24,0 \text{ ksi (valor admisible)} \quad \text{NO VERIFICA}$$

$$f_c = \frac{2M_s}{k j b d^2} = \frac{2(1092)}{[(0,433)(0,856)(10)(13,5)^2]} = 3,23 \text{ ksi} > 0,45(4,00) = 1,80 \text{ ksi (valor admisible)} \quad \text{NO VERIFICA}$$

Nota: Estos cálculos se basan en la hipótesis de comportamiento elástico-lineal de los materiales. Como tanto f_c como f_s son mayores que las tensiones admisibles, aumentamos la altura de la viga.

2. Verificar las tensiones en el hormigón y la armadura asignando al elemento una mayor altura, pero manteniendo la misma cantidad de armadura.

$$h = 24 \text{ in.} \quad d = 21,5 \text{ in.}$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{2,79}{(10 \times 21,5)} = 0,0130$$

$$\rho n = (0,0130)(8) = 0,1038$$

$$k = \sqrt{2\rho n + (\rho n)^2} - \rho n = \sqrt{2(0,1038) + (0,1038)^2} - 0,1038 = 0,364$$

$$j = 1 - \frac{k}{3} = 1 - \frac{0,364}{3} = 0,879$$

$$f_s = \frac{M_s}{A_s j d} = \frac{1092}{[(2,79)(0,879)(21,5)]} = 20,71 \text{ ksi} < 24,0 \text{ ksi (valor admisible)} \quad \text{VERIFICA}$$

$$f_c = \frac{2M_s}{k j b d^2} = \frac{2(1092)}{[(0,364)(0,879)(10)(21,5)^2]} = 1,48 \text{ ksi} < 0,45(4,0) = 1,80 \text{ ksi (valor admisible)} \quad \text{VERIFICA}$$

Nota: Fue necesario aumentar la altura efectiva casi un 60% para poder satisfacer las tensiones admisibles manteniendo la misma cantidad de armadura.

3. Calcular la resistencia al momento de diseño, ϕM_n , del elemento modificado para determinar el factor de seguridad (FS).

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 b f'_c} = \frac{(2,79)(60)}{[(0,85)(10)(4,00)]} = 4,92 \text{ in.}$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = (2,79)(60) \left[21,5 - \left(\frac{4,92}{2} \right) \right] = 3190 \text{ in.-kips}$$

$$\phi M_n = 0,9(3190) = 2870 \text{ in.-kips}$$

$$FS = \frac{\phi M_n}{M_s} = \frac{2870}{1092} = 2,63$$