

Especificaciones AISC 2005:

Diseño de edificios en acero



Por Carlos Aguirre*

El diseño para la construcción de edificios en acero de América Latina y Canadá ha ido progresivamente adoptando las especificaciones AISC (American Institute of Steel Construction). Es por ello que, una vez concluida la versión 2005 de la norma mencionada, hemos considerado conveniente incluir lo más interesante de esta en un breve informe de un miembro del Comité de Especificaciones de AISC, para ilustrar los nuevos cambios introducidos en la normativa. La importancia de la misma es tal, que seguramente servirá de guía a nuevas especificaciones para la construcción en acero en la región, así como por unir en un solo cuerpo los dos métodos de diseño que se manejaban alternativamente: El Diseño en Base a Tensiones Admisibles (ASD) y el Diseño en Base a Cargas y Resistencias Facturadas (LRFD).

La especificación AISC para el diseño de edificios en acero, desde una primera versión realizada el año 1923, basada en el método en «Tensiones Admisibles» (ASD) ha evolucionado a lo que hoy se denomina el método de diseño basado en «Cargas y Resistencias Facturadas» (LRFD), metodología que fue introducida por primera vez el año 1986. En esta última versión 2005, el Comité de Especificaciones del AISC ha realizado un es-

pecial esfuerzo en ofrecer un tratamiento unificado, de manera de incluir en la normativa el uso alternativo de ambos métodos de diseño (LRFD y ASD), presentando este último en un formato equivalente al anterior método de Tensiones Admisibles. Esta nueva norma viene a reemplazar las anteriores especificaciones ASD 1989 y LRFD 1999, permitiendo al diseñador elegir discrecionalmente el uso de uno u otro método.

Filosofía de diseño

El principio que guía este nuevo estándar es que las estructuras de acero desconocen por qué método fueran diseñadas; en otras palabras, la resistencia de la estructura terminada es un resultado independiente del método usado para su diseño. En esta premisa, la norma basa ambos métodos en la resistencia nominal de cada elemento, la cual es

* Ingeniero Civil graduado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, con postgrado en Ingeniería Sísmica en el Building Research Institute de Japón. Profesor de Diseño de Estructuras de Acero, en el Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso. Advisory Member, Committee of Specifications, American Institute of Steel Construction; miembro del Comité Técnico del Instituto Chileno del Acero.

modificada por el factor establecido por el método a usar, para su posterior comparación a la resistencia de diseño o admisible según corresponda. En toda la especificación, el diseño puede realizarse indistintamente de acuerdo a las disposiciones LRFD o ASD, criterios expresados en las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

La especificación LRFD fue originalmente calibrada de modo de entregar la misma resistencia que el método ASD para una relación carga viva (L) – carga muerta (D) de 3 en la combinación de carga dada por: 1.2D + 1.6L. En consecuencia, el factor de seguridad ASD puede ser calculado como 1.5/φ para la mayoría de las disposiciones de esta especificación. Un detalle adicional de la Especificación 2005 es la incorporación de disposiciones para secciones estructurales tubulares y ángulos simples.

Estados límites

La definición de estados límites asociados a un modo de falla es un concepto introducido en forma explícita en las disposiciones AISC con el método LRFD. Sin embargo, es preciso señalar que en especificaciones ASD anteriores, puede encontrarse el mismo concepto en forma implícita en diferentes situaciones. Por ejemplo en el diseño ASD de elementos en tracción, cuando se establece una tensión admisible para ser aplicada al área bruta y otra diferente para ser aplicada al área neta efectiva. Esto equivale a reconocer que ellas representan los estados límites de fluencia y fractura respectivamente. Lo mismo se encuentra implícito en el diseño ASD de elementos en flexión, cuando se clasifica las secciones en compactas y no compactas o se limita el largo no arriostrado del ala comprimida, lo que equivale a aceptar estados límites de pandeo local de ala y alma en el primer caso y al estado límite de pandeo lateral torsional en el último.

Elementos en tracción

La Especificación 2005 define la Resistencia de Diseño asociada a dos posibles estados límites: *Fluencia en el Área Bruta* y *Fractura en el Área Neta Efectiva*. En el método LRFD se define la *Resistencia de Diseño* multiplicando la Resistencia Nominal por un factor, normalmente de minoración de la resistencia de tracción (φ). En el Método ASD se define la Resistencia Admisible en Tracción dividiendo la Resistencia Nominal por un factor de seguridad Ω. Las expresiones correspondientes están dadas por las ecuaciones (3) y (4).

En ambos métodos, la resistencia del elemento es el menor valor obtenido de considerar los dos estados límites.

Se puede comprobar que el formato de resistencias admisibles es absolutamente coherente con el antiguo formato de tensiones admisibles. En efecto, al asociar el factor de seguridad Ω_t con el término de resistencia en las ecuaciones anteriores, resulta para el estado límite de fluencia, la tensión admisible $F_t = F_y/\Omega_t = 0.6 F_y$, lo cual resulta en una resistencia admisible a tracción $P_a = 0.6 F_y A_g$. Para el estado límite de fractura la tensión admisible que debe aplicarse es $F_t = F_u/\Omega_t = 0.5 F_u$, lo cual resulta en la siguiente resistencia admisible a tracción $P_a = 0.5 F_u A_e$. Estas disposiciones corresponden a las mismas que están en la Especificación ASD 1989. Las resistencias nominales son las mismas de la Especificación LRFD 1999.

Elementos en compresión

El diseño de secciones simétricas en compresión requiere algunas consideraciones del estado límite de pandeo por flexión, asociado a la carga crítica de pandeo correspondiente. En ambas metodologías las columnas han sido tradicionalmente diseñadas tomando como límite la carga crítica de pandeo elástico o inelástico. En la Especificación 2005, la resistencia nominal de un elemento en compresión está dada como lo muestra la ecuación (5).

Los valores correspondientes para la tensión crítica están dados por las ecuaciones (6) y (7).

Estas ecuaciones son las mismas de la Especificación LRFD 1999. Si se desea expresarlas en el formato de tensiones admisibles debe dividírselas por el factor de seguridad.

El **Gráfico 1** muestra una comparación entre la Especificación ASD 1989 y la Especificación 2005 en resistencias admisibles. La disposición de la Especificación ASD 1989 fue simplificada para la comparación, reemplazando el factor de seguridad variable por un factor constante en la región inelástica. La tensión admisible es esencialmente la misma en ambos estándares. Un cambio ocurrido desde las disposiciones LRFD 1999 es el aumento en el factor de resistencia ϕ_c de 0.85 a 0.90. Este aumento del factor de resistencia reconoce los cambios ocurridos en las últimas décadas en la producción de acero, que se traducen en una menor variabilidad en las características de planchas y en la calidad de los aceros.

Elementos en flexión

El diseño de elementos en flexión considera cuatro estados límites: fluencia, pandeo local del ala, pandeo local del alma y pandeo lateral torsional, estados límites que implícita o explícitamente siempre estuvieron presentes en la Especificación ASD.

MÉTODO LRFD

$$R_u \leq \phi R_n \quad (1)$$

R_u = Resistencia requerida (LRFD)
 R_n = Resistencia nominal
 ϕ = Factor de resistencia
 ϕR_n = Resistencia de diseño

MÉTODO ASD

$$R_a \leq R_n/\Omega \quad (2)$$

R_a = Resistencia requerida (ASD)
 R_n = Resistencia nominal
 Ω = Factor de seguridad
 R_n/Ω = Resistencia admisible

ESTADO LÍMITE FLUENCIA

$$P_n = F_y A_g \quad (3)$$

$$\phi_t = 0.90 \text{ (LRFD)} - \Omega_t = 1.67 \text{ (ASD)}$$

ESTADO LÍMITE FRACTURA

$$P_n = F_u A_e \quad (4)$$

$$\phi_t = 0.75 \text{ (LRFD)} - \Omega_t = 2.00 \text{ (ASD)}$$

$$P_n = A_g F_{cr} \text{ con: } \phi_c = 0.90 \text{ (LRFD)} \text{ y } \Omega_c = 1.67 \text{ (ASD)} \quad (5)$$

$$\text{Rango anelástico} \quad \frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow F_{cr} = \left(0.658 \frac{F_y}{E}\right) F_y \quad (6)$$

$$\text{Rango elástico} \quad \frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \rightarrow F_{cr} = 0.677 \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (7)$$

Estado límite de fluencia

Controla el diseño de elementos compactos cuya ala comprimida está suficientemente arriostrada para evitar el volcamiento. La resistencia nominal corresponde al momento plástico, que es expresado por la ecuación (8). Combinando adecuadamente los términos, se puede escribir para la tensión admisible la ecuación (9).

En las versiones anteriores en formato ASD, la razón de módulos se tomaba conservadoramente igual a 1.1, con lo cual resulta para secciones compactas una tensión admisible de $F_b = 0.66 F_y$. Esto demuestra que las disposiciones ASD 2005 coinciden con las anteriores en el estado límite de fluencia. La nueva especificación, sin embargo, permite al diseñador aprovechar la verdadera relación de módulos que permite llegar a resistencias hasta el 20% mayores (~0.80 F_y). En el caso del método LRFD, las disposiciones 1999 y 2005 para definir el estado límite de fluencia son idénticas.

Estado límite de volcamiento

Se presenta en elementos en los cuales el largo no arriostrado del ala comprimida de vigas alcanza valores altos. La ecuación que expresa la capacidad nominal de una viga a momento, con soportes laterales entre los límites L_p y L_r es una línea recta. Para vigas con soportes laterales a distancias mayores que L_r se usa una ecuación de pandeo elástico. La Especificación 2005 describe la resistencia de una viga no arriostrada mediante 3 ecuaciones, cada una con su propio intervalo de aplicabilidad. La Especificación ASD 1989 requería de 5 ecuaciones, las cuales en algunos casos debían ser primero evaluadas para después elegir el mayor valor calculado. El Gráfico 2 muestra una comparación entre las tensiones admisibles de la Especificación ASD 1989 y las disposiciones ASD 2005 en el caso de una sección W40x183. Para escribir las ecuaciones en el formato de tensiones admisibles, se las ha dividido por un factor de seguridad (Ω_b) de 1.67 y por el módulo elástico S_x . Las 5 ecuaciones de la anterior especificación ASD, fueron remplazadas por solo 3 ecuaciones en la versión 2005.

Se puede comprobar para esta viga, que la Especificación 2005 da valores mayores que los obtenidos usando las Especificaciones ASD 1989. Las versiones LRFD 1999 y 2005 dan valores muy próximos, excepto que las expresiones de las ecuaciones para pandeo elástico hayan sido modificadas en su presentación. En las especificaciones anteriores, las vigas armadas (plate girders) eran tratadas en capítulos especiales. En la Especificación

Gráfico 1
Tensiones admisibles ($F_y = 50$ ksi)

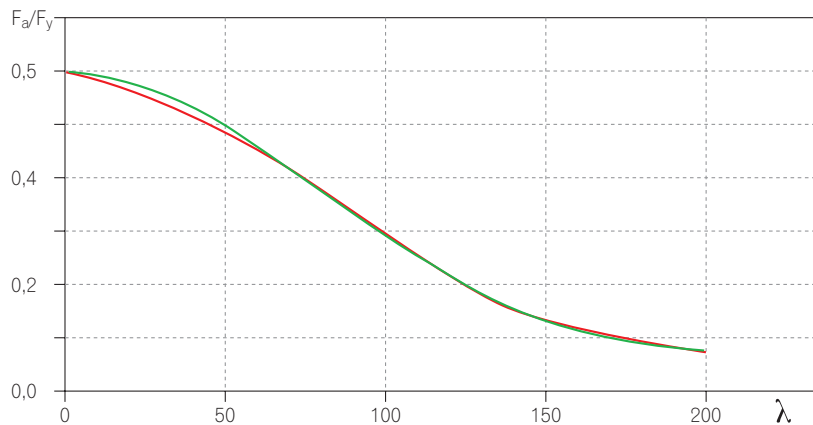
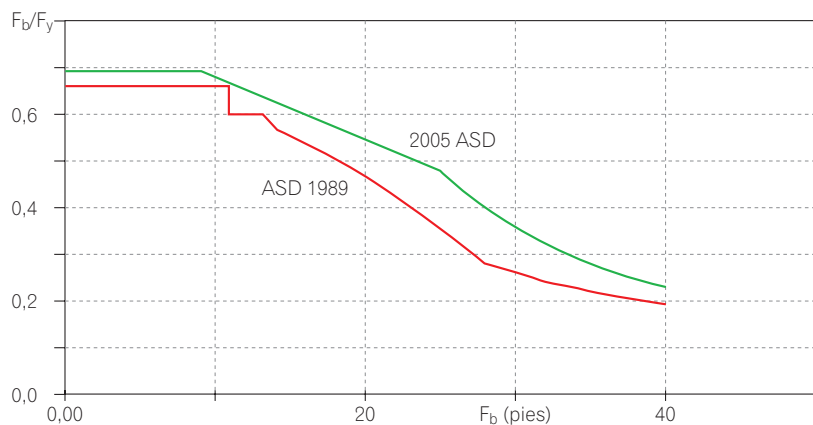


Gráfico 2
Tensiones admisibles W40x183 ($F_y = 50$ ksi)



$$M_n = M_p = F_y Z_x \text{ con } \phi_b = 0.90 \text{ (LRFD)} - \Omega_b = 1.67 \text{ (ASD)} \quad (8)$$

$$F_b = \frac{F_y Z_x}{\Omega_b S_x} = 0.6 F_y \left(\frac{Z_x}{S_x} \right) \quad (9)$$

ción 2005 todas las disposiciones de flexión son circunscritas al capítulo F, con la sola excepción de una sección específica destinada a la determinación de la esbeltez de los elementos planos componentes de la sección. Las vigas armadas, junto con la incorporación de las disposiciones para secciones tubulares y ángulos simples, hacen un capítulo F bastante extenso, pero completo para efectos de diseño.

Esfuerzo de corte

En la Especificación 2005, las disposiciones para esfuerzo de corte para secciones de ala ancha y secciones armadas,

con o sin consideración de efecto de campo de tracciones, quedan incorporadas juntas. La resistencia nominal V_n queda expresada como se muestra en la ecuación (10) y (11).

Estos valores han sido seleccionados para asegurar que la resistencia a esfuerzo de corte de una sección W laminada en la Especificación 2005 resulte la misma que se usaba en la Especificación ASD 1989. En términos de tensión admisible, resulta un valor para el esfuerzo de corte de $0.4 F_y$, que es el valor acostumbrado, lo cual se traduce en un leve aumento en la resistencia LRFD 2005 respecto de las disposiciones LRFD 1999.

Interacción de solicitaciones

La interacción de fuerzas normales y flexión son tratadas en términos de ecuaciones de interacción de acuerdo a un procedimiento establecido por años. En las Especificaciones ASD 1989 las ecuaciones de interacción eran simplemente líneas rectas mientras que en la Especificación 2005 se usa dos líneas rectas que dan una mejor estimación de la resistencia. Ecuaciones (12) y (13).

En el **Gráfico 3** se muestra el diagrama de interacción de flexión y esfuerzo axial de acuerdo a las ecuaciones (12) y (13), que aplican tanto a ASD como a LRFD. Las resistencias disponibles a compresión y flexión son determinadas considerando que la solicitación actúa aisladamente, tal como se discutió previamente en el diseño sin interacción. Las resistencias requeridas pueden ser determinadas alternativamente mediante un análisis de segundo orden (incluido en el proceso de análisis) o se puede usar el análisis usual de primer orden, a cuyo resultado se le aplica un factor de amplificación. En el análisis usual de primer orden, las ecuaciones de equilibrio son expresadas en la geometría inicial de la estructura sin deformar, la cual se supone se comporta elásticamente; de esta manera las fuerzas internas están biunívocamente asociadas a los desplazamientos resultantes. En la situación real, cuando una estructura se deforma, las fuerzas internas cambian con la deformación, planteamiento que requiere la incorporación de la geometría deformada de la estructura, formulación que se denomina análisis de segundo orden.

Los efectos de segundo orden han sido incluidos en las Especificaciones AISI desde 1961. El procedimiento seguido en las Especificaciones ASD 1989 fue amplificar las tensiones de flexión en el diagrama de interacción por el término (14).

Las versiones LRFD anteriores también permitían realizar un análisis de segundo orden o un análisis simplificado combinado con el uso de factores de amplificación B_1 y B_2 . La norma 2005 permite el uso alternativo de los factores expresados mediante la ecuación (15), según la aproximación que se desee.

Todos estos factores de amplificación relacionan la carga aplicada f_a o P_u y la carga de pandeo F_e' o P_e . En este sentido puede decirse que la especificación 2005 ha aumentado las opciones para considerar los efectos de segundo orden. Tal vez lo más significativo de las nuevas dis-

$$V_n = 0.6 F_y A_w C_v \text{ para almas de secciones I laminadas } C_v = 1.0 \text{ y para } h/t \leq 2.24 E/F_y \quad (10)$$

$$\phi_v = 1.00 \text{ (LRFD)} - \Omega_v = 1.50 \text{ (ASD)} \quad (11)$$

$$\frac{P}{P_y} \geq 0,2 \quad \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (12)$$

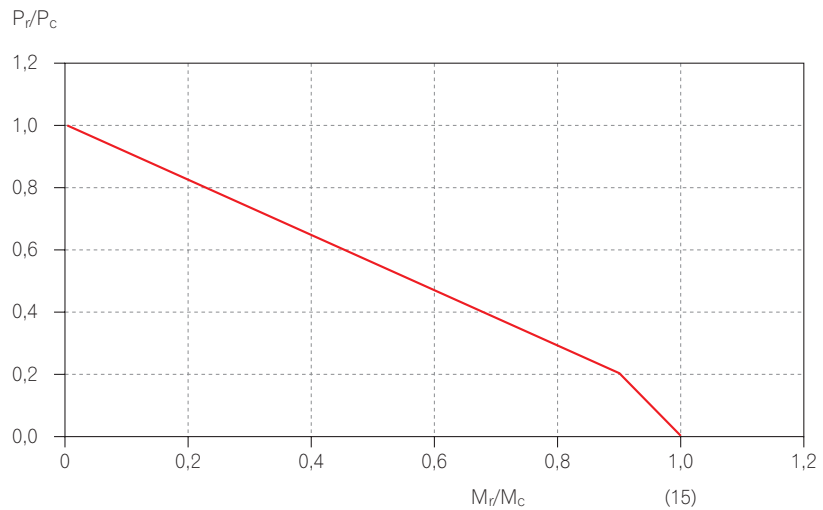
$$\frac{P}{P_y} \geq 0,2 \quad \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (13)$$

P_r = resistencia requerida en compresión, kips (N)
 P_c = resistencia disponible en compresión, kips (N)
 M_r = resistencia requerida en flexión, kip-in (N-mm)
 M_c = resistencia disponible en flexión, kip-in (N-mm)

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{P_{e1}}} \quad (14)$$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{\sum P_{e2}}} \quad (15)$$

Gráfico 3
Interacción esfuerzo axial - Momento



posiciones se encuentra en el Apéndice 7: Método de Análisis Directo, que provee una metodología para la determinación directa de los efectos de segundo orden. También permite el diseño de todas las vigas columnas usando el verdadero largo de la columna y un largo efectivo $K = 1$ cuando se satisface las otras disposiciones. La nueva especificación mantiene el uso de los factores de amplificación B_1 y B_2 , aun cuando se ha establecido algunos límites a su aplicabilidad. Esto está directamente relacionado con la rigidez lateral de la estructura; las nuevas disposiciones simplifican los efectos de segundo orden o bien los desprecian.

Elementos compuestos

El tratamiento de la construcción compuesta representa uno de los cambios más importantes respecto de las primeras especificaciones ASD. Este cambio es un reflejo de un cambio básico en la filosofía en donde ASD no requiere una distribución de tensiones elásticas. Al igual que en las otras disposiciones, se establece una resistencia nominal de los elementos a la cual se aplica un factor de seguridad para obtener los valores admisibles ASD.