

CARACTERIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE LA NORMA ANSI/AISC 360-10

Aníbal G. Tolosa
Ingeniero Civil - Magister en Ingeniería Estructural
UTN FRBA
anibal.tolosa@gmail.com

RESUMEN

Las normas suelen establecer requisitos a introducir en cada paso del diseño estructural con el objetivo de considerar, de una forma u otra, todos los aspectos relevantes que hacen al comportamiento estructural en el resultado final del diseño.

La variedad de formas en que los aspectos relevantes que hacen al comportamiento estructural pueden ser incorporados constituye el origen de los diferentes métodos de diseño que existen. En ese sentido, la norma ANSI/AISC 360-10 ofrece diferentes alternativas.

En este trabajo se presentan y caracterizan dichos métodos, estableciendo si alguno de ellos puede ser considerado como método de diseño directo.

ABSTRACT

Specifications usually set requirements to be introduced at each step of the structural design with the aim of taking into account, in one way or another, all aspects relevant to the structural behavior in the final design result.

The wide variety of ways in which all aspects relevant to the structural behavior may be incorporated leads to the various existing design methods. In such respect, ANSI/AISC 360-10 Specification offers different alternatives.

This paper provides and characterizes such methods, and determines whether any of them may be considered a direct design method.

PROCESO DE DISEÑO

Diseño, de acuerdo a la *user note* de la Sección C1. de la norma ANSI/AISC 360-10, es la combinación del análisis para determinar las resistencias requeridas más el dimensionamiento de los componentes para que tengan adecuadas resistencias disponibles. Así, puede pensarse que el proceso de diseño de una estructura requiere:

- Selección de los componentes estructurales
La selección de los elementos estructurales es realizada por el profesional teniendo en cuenta requisitos funcionales, arquitectónicos, legales y económicos.
- La determinación de las resistencias requeridas
La determinación de las resistencias requeridas se realiza aplicando métodos de análisis estructural para convertir las cargas en la estructura en solicitaciones en los elementos estructurales (barras, placas, etc).
- La determinación de las resistencias disponibles
La determinación de las resistencias disponibles se realiza aplicando los Capítulos D a K de la norma ANSI/AISC 360-10.
- La evaluación del diseño
La evaluación del diseño se realiza verificando que las resistencias requeridas sean iguales o menores que las disponibles.

Desde un punto de vista conceptual, estos pasos podrían pensarse como independientes formando parte de un proceso correlativo. Sin embargo, las normas suelen establecer requisitos a introducir en cada uno de los pasos con el objetivo de incluir (explícita o implícitamente, determinística o probabilísticamente) todos los aspectos relevantes que hacen al comportamiento estructural en el resultado final del diseño. La variedad de formas en que los mencionados aspectos pueden introducirse da origen a los distintos “métodos de diseño” establecidos por las normas.

MÉTODOS DE DISEÑO CONSIDERADOS EN LA NORMA ANSI/AISC 360-10

La Sección C1. “*General stability requirements*” de la norma ANSI/AISC 360-10 establece que la estabilidad debe asegurarse tanto para la estructura en su conjunto como para cada componente individual y que deberán considerarse:

- Deformaciones en barras debidas a flexión, corte y axil y todas aquellas deformaciones que contribuyan al desplazamiento de la estructura;
- Efectos de segundo orden geométrico (tanto $P\Delta$ como $P\delta$);
- Imperfecciones geométricas;
- Reducciones en la rigidez debidas a inelasticidad;

- Incertidumbres en rigideces y resistencias.

La norma establece que, en relación con la estabilidad, el diseño de una estructura puede realizarse mediante cualquier método racional que considere los aspectos mencionados aclarando, además, que entre los métodos que consideran dichos aspectos se encuentran los siguientes métodos de diseño propuestos por la propia norma:

- Los métodos “alternativos” del Apéndice 7;
- El método de Diseño por Análisis Directo (DAD) del Capítulo C;
- El método inelástico del Apéndice 1;

Respecto de los métodos “alternativos”, puede mencionarse que hasta la edición anterior de la norma (2005) la situación era inversa: los métodos llamados “alternativos” figuraban en el cuerpo normativo principal mientras que el Método DAD figuraba en el Apéndice 7.

EVALUACIÓN DEL DISEÑO

En la Sección B3.3. “*Design for Strength Using Load and Resistance Factor Design (LRFD)*” de la norma ANSI/AISC 360-10 se establece que un diseño en base LRFD debe satisfacer la siguiente inequación:

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

Donde:

R_u = Resistencia requerida

ϕ = Factor de resistencia

R_n = Resistencia nominal

ϕR_n = Resistencia disponible

Sin embargo, la propia norma establece dentro del Capítulo B los siguientes requisitos a cumplir:

- En la Sección B3.5. “*Design for Stability*” se dice que la estabilidad de la estructura en su conjunto y sus elementos individuales será determinada de acuerdo al Capítulo C.
- En la Sección B3.9. “*Design for Serviceability*” se dice que tanto la estructura en su conjunto como en sus elementos individuales y uniones deberán ser verificados funcionalmente y que los requerimientos a cumplir se detallan en el Capítulo L.
- En la Sección B3.11. “*Design for Fatigue*” se dice que los fenómenos de fatiga en elementos individuales y uniones deberán ser evaluados de

acuerdo a lo establecido en el Apéndice 3, aunque aclara que los efectos de fatiga no necesitan ser evaluados cuando son provocados por cargas sísmicas o de viento.

La presencia de estos requisitos obedece a que la inecuación que rige el diseño en base LRFD, por si misma, solo considera aspectos vinculados a la resistencia. Aspectos como la estabilidad, el desempeño bajo cargas de servicio, la influencia de fenómenos de fatiga, etc. deben ser evaluados en forma complementaria.

MÉTODOS INDIRECTOS, AVANZADOS Y DIRECTOS

Considerando que los métodos de diseño pueden clasificarse en métodos indirectos, métodos avanzados y métodos directos, resulta en este punto conveniente aclarar qué se entiende por cada uno (Tolosa, 2012).

Un método indirecto es un método de diseño que requiere la selección de los componentes estructurales, la determinación de las resistencias requeridas, la determinación de las resistencias disponibles y la evaluación del diseño. Mediante estos métodos se obtienen factores de utilización para todos los elementos estructurales y para todos los estados límite existentes. Así, por ejemplo, cada barra tendrá un factor de utilización propio el cual variará según el estado límite considerado. La verificación de una estructura mediante este método requiere constatar que, para cada barra y para cada estado límite aplicable a esa barra, la resistencia requerida sea menor a la resistencia disponible. La resistencia requerida se obtiene mediante análisis estructural, mientras que la resistencia disponible se obtiene siguiendo los criterios establecidos en la norma. La calificación de indirecto que recibe el método se debe a que la comparación entre resistencias requeridas y disponibles se hace independientemente del modelo estructural, en forma indirecta.

Un método avanzado es un método de diseño que, realizado sobre un modelo de análisis en el cual se introducen en forma explícita todos los aspectos necesarios para permitir una evaluación acabada y completa de un determinado estado límite. En consecuencia, dicho estado límite no requiere ser evaluado en forma independiente. Sin embargo, los demás estados límite presentes en la estructura deben ser evaluados aplicando el método indirecto. En conclusión, un método avanzado es similar a un método indirecto debido a que ambos requieren la evaluación indirecta del diseño. Asimismo, también coinciden en presentar factores de utilización por barra. Sin embargo, un método avanzado presentará menos estados límite evaluados en forma indirecta –o sea, menos factores de utilización por barra- debido a que algunos de ellos fueron incorporados en el propio modelo.

Un método directo es un método de diseño que no requiere la evaluación indirecta del diseño ya que todos y cada uno de los estados límite que afectan a la estructura han sido incorporados en el modelo de análisis mediante métodos avanzados. De esa manera, los requisitos vinculados a la resistencia y la estabilidad quedan satisfechos al encontrar una configuración equilibrada bajo el nivel de carga requerido. Esta característica conduce a que una estructura analizada mediante un método directo deja de tener factores de utilización “por barra” sino que pasa a

tener un factor de utilización “global”.

En este punto cabe considerar si alguno de los métodos contemplados por la norma permite realizar un diseño directo, si solamente constituyen variantes sencillas o avanzadas de métodos indirectos o, simplemente, métodos indirectos. Para ello, a continuación se caracterizará cada método considerado.

MÉTODOS ALTERNATIVOS DEL APÉNDICE 7

Entre los métodos alternativos, tratados en el Apéndice 7, se encuentran:

- Método K (effective length method);
- Método en primer orden (first-order method).

Ambos métodos poseen limitaciones. En el caso del método K, su uso está limitado a estructuras que satisfagan las siguientes condiciones:

- Las cargas gravitatorias son soportadas a través de columnas, paredes o marcos “nominalmente verticales”;
- La razón entre el máximo desplazamiento horizontal evaluado en segundo orden geométrico (2^{OG}) y el máximo desplazamiento horizontal evaluado en primer orden geométrico (1^{OG}), determinados en ambos casos bajo combinaciones resistentes LRFD, debe ser igual o menor a 1,50 en todas las plantas.

En el caso del método en primer orden, su uso está limitado al cumplimiento de las siguientes condiciones:

- Las cargas gravitatorias son soportadas a través de columnas, paredes o marcos “nominalmente verticales”;
- La razón entre el máximo desplazamiento horizontal evaluado en 2^{OG} y el máximo desplazamiento horizontal evaluado en 1^{OG}, determinados en ambos casos bajo combinaciones de resistencia, debe ser menor a 1,50 en todas las plantas;
- La resistencia axial requerida de todos aquellos miembros cuya rigidez flexional se considere que contribuye a la estabilidad lateral de la estructura debe ser menor o igual a $0,5 A_g F_y$.

Respecto a estos métodos puede decirse que ambos son indirectos por definición, careciendo de estados límite evaluados mediante métodos avanzados.

MÉTODO DAD DEL CAPÍTULO C

El método DAD, tratado en el Capítulo C, se presenta como la alternativa más versátil ya que su empleo es permitido para el diseño de cualquier estructura. Respecto de este último punto, cabe mencionar que aunque formalmente el método no posee limitaciones en cuanto a su aplicabilidad, la razón entre el máximo desplazamiento horizontal evaluado en 2^{OG} y el máximo desplazamiento horizontal evaluado en 1^{OG}, determinados en ambos casos bajo combinaciones de

resistencia LRFD, constituye un parámetro a tener en cuenta al momento de evaluar las bondades de una estructura. Valores elevados de dicha razón deben llamar a reconsiderar el diseño adoptado.

La determinación de las resistencias requeridas está regida por la Sección C2. y se realiza aplicando métodos de análisis estructural. En particular, en la Sección C2.1. “*General analysis requirements*” se establece que:

- El análisis debe considerar las deformaciones debidas a los momentos flectores, esfuerzo axil y de corte en barras y en todo otro elemento de la estructura. El análisis debe incorporar reducciones en todas las rigideces que se considere contribuyen a la estabilidad de la estructura;
- El análisis debe ser realizado considerando 2^oOG considerando tanto $P\Delta$ como $P\delta$ (análisis riguroso) aunque permitiendo considerar solamente $P\Delta$ (análisis aproximado) en algunas situaciones particulares;
- El análisis debe considerar todas las cargas, tanto gravitatorias como de otro origen, que puedan influir en el comportamiento estructural;
- El análisis debe hacerse considerando las combinaciones de resistencia LRFD (o multiplicando primero por 1,60 las combinaciones de resistencia ASD, realizando luego el análisis estructural y dividiendo finalmente los resultados por 1,60).

En la Sección C2.2. “*Consideration of initial imperfections*” se establece que los efectos de las imperfecciones iniciales que afecten la estabilidad de la estructura deben ser tenidos en cuenta ya sea mediante su modelado directo o mediante la aplicación de cargas nocionales. Sin embargo, una “*user note*” aclara que las imperfecciones aludidas en esa Sección son las originadas por la falta de verticalidad de la estructura. La falta de rectitud de las barras es tenida en cuenta en forma implícita en las curvas de resistencia de barras comprimidas que figuran en el Capítulo E de la norma.

En la Sección C2.2a. se establecen los criterios a considerar al modelar imperfecciones en forma directa. Según este criterio, la estructura debe analizarse desplazando los nodos donde se intersectan las barras de su posición nominal (perfecta) considerando para ello el patrón desestabilizante más riguroso (que genere la mayor resistencia requerida). También se menciona que para estructuras que soportan principalmente cargas gravitatorias mediante columnas nominalmente verticales, si considerando la reducción en las rigideces establecidas en la Sección C2.3. la razón entre el máximo desplazamiento lateral determinado en 2^oOG y el determinado en 1^oOG es igual o menor a 1,70 en todos los niveles (pisos), es posible analizar la estructura con imperfecciones iniciales únicamente al considerar combinaciones de carga que contengan solo cargas gravitatorias.

En la Sección C2.2b. se establece que para estructuras que soportan principalmente cargas gravitatorias mediante columnas nominalmente verticales es posible utilizar cargas nocionales para representar las imperfecciones iniciales. Las cargas nocionales deberán ser aplicadas al modelo estructural con su geometría nominal (perfecta).

En la Sección C2.3. “Adjustments to stiffness” se menciona que el análisis estructural realizado para determinar resistencias requeridas debe hacerse con rigideces reducidas considerando:

- Un factor 0,80 aplicado a todas las rigideces que se considere contribuyen a la estabilidad de la estructura, pudiéndose aplicar esta reducción a todas las rigideces de la estructura;
- Un factor adicional según alguna de las siguientes alternativas:
 - Un factor τ_b , aplicado a todas las rigideces flexionales que se considere contribuyen a la estabilidad de la estructura definido como:

$$\tau_b = \begin{cases} 1,0 & \text{si } \frac{P_r}{P_y} \leq 0,5 \\ 4 \left(\frac{P_r}{P_y} \right) \left[1 - \left(\frac{P_r}{P_y} \right) \right] & \text{si } \frac{P_r}{P_y} > 0,5 \end{cases} \quad (2)$$

- En estructuras donde las imperfecciones sean consideradas mediante cargas nocionales, en lugar de aplicar factores $\tau_b < 1,00$ es posible utilizar $\tau_b = 1,00$ en todas las barras si se aplica una carga nocional adicional.

La determinación de las resistencias disponibles está regida por la Sección C3. “Calculation of available strengths” y establece que la determinación de las resistencias disponibles de todos los elementos estructurales deben determinarse de acuerdo con lo establecido en los Capítulos D a K según corresponda sin ninguna otra consideración adicional en lo que a la estabilidad del conjunto se refiere. Adicionalmente se menciona que el factor K de longitud efectiva debe ser tomado igual a 1,0 a menos que un valor menor pueda justificarse mediante un análisis racional.

La evaluación del diseño se realiza verificando que, para todos los estados límite, se cumpla con la inequación base del diseño LRFD: que las resistencias disponibles sean siempre mayores o iguales que las resistencias requeridas.

Respecto a este método puede decirse que, a pesar de su nombre, no es un método de diseño por análisis “directo” en sentido estricto de la palabra. Esta afirmación obedece a que la propia metodología, definida por la norma, requiere que la evaluación del diseño se realice comparando las resistencias requeridas con las disponibles, elemento característico de los métodos indirectos. Este método es, en realidad, un método avanzado que no requiere la determinación del factor de longitud efectiva K para la verificación de barras comprimidas y/o flexocomprimidas.

MÉTODO INELÁSTICO DEL APÉNDICE 1

El método inelástico, tratado en el Apéndice 1, es la única alternativa contemplada

en la norma que permite un abordaje explícito de los fenómenos de segundo orden de material (2^oOM).

En particular, en la Sección 1.1. “*General Requirements*” se establece que cualquier método que utilice análisis inelástico para dimensionar los componentes estructurales (barras y conexiones) que satisfaga los requerimientos generales contenidos en la propia Sección 1.1 es permitido. Asimismo, se aclara que un método de diseño basado en análisis inelástico que satisfaga los requerimientos de la Sección 1.1., los requerimientos de ductilidad de la Sección 1.2. y los requerimientos de análisis de la Sección 1.3. satisface los mencionados requerimientos generales.

La determinación de las resistencias requeridas está regida por la Sección 1.3. “*Analysis Requirements*” donde se establece que el análisis estructural empleado debe satisfacer los requerimientos generales establecidos en la Sección 1.1 y que se permite que dichos requerimientos sean satisfechos mediante un análisis de 2^oOG/2^oOM que incluya los requerimientos de la propia Sección 1.3. En particular:

- En la Sección 1.3.1. se establece:
 - Que la tensión de fluencia mínima F_y y la rigidez de todos los componentes y conexiones de acero sean reducidos por un factor igual a 0,90 al momento del análisis estructural;
 - Que la influencia del esfuerzo axial y los momentos flectores según los ejes de mayor y menor inercia deben ser incluidos en la determinación de la respuesta inelástica;
 - Que la resistencia plástica de la sección transversal de los componentes será incluida en el análisis mediante alguna de las siguientes dos alternativas:
 - Comportamiento elástico-perfectamente plástico expresado en términos de esfuerzo axial, momento flector según el eje de mayor inercia y momento flector según el eje de menor inercia
 - Modelado explícito de la respuesta elástica-perfectamente plástica.
- En la Sección 1.3.2. se indica que el análisis debe incluir los efectos de imperfecciones geométricas iniciales mediante alguna de las siguientes dos alternativas:
 - Modelado explícito;
 - Cargas nocionales.
- En la Sección 1.3.3. se dispone que el análisis debe incluir la influencia de tensiones residuales y plastificación parcial mediante alguna de las siguientes dos alternativas:
 - Modelado explícito;
 - Reducción de la rigidez de todos los componentes estructurales mediante el factor $0,80\tau_b$ definido en la Sección C2.3. o mediante el factor 0,80 más la consideración de cargas nocionales adicionales.

La determinación de las resistencias disponibles está regida por la Sección 1.1.

“*General Requirements*”. Allí se establece que aquellos estados límite resistentes no detectados en el análisis inelástico deben ser evaluados de acuerdo con los criterios de verificación de los Capítulos D, E, F, G, H, I, J y K.

Adicionalmente, en la Sección 1.2. “*Ductility Requirements*” se establecen los criterios a seguir para asegurar que los componentes estructurales posean una ductilidad acorde al análisis inelástico implementado. En detalle, se establece:

- En la Sección 1.2.1., que la tensión de fluencia mínima F_y deberá ser menor a 450MPa ;
- En la Sección 1.2.2., que aquellas secciones de las barras donde se prevé se formarán rótulas plásticas deberán:
 - Ser doblemente simétricas;
 - Poseer una esbeltez local de alas y almas menor a λ_{pd} , siendo λ_{pd} igual a λ_p de la Tabla B4.1b de la norma ANSI/AISC 360-10 excepto para algunas situaciones (entre las que se encuentran las almas de perfiles doble T) que se indican en la propia Sección 1.2.2.;
- En la Sección 1.2.3., que aquellas secciones de barras donde se prevé se formarán rótulas plásticas, la longitud no arriostrada L_b deberá ser menor que L_{pd} . En particular:
 - Para barras que soportan flexión o flexotracción, se considerará a L_b como la distancia entre puntos arriostrados contra el desplazamiento lateral del ala comprimida o la torsión de la sección;
 - Para barras que soportan flexocompresión, se considerará a L_b como la distancia entre puntos arriostrados contra el desplazamiento lateral en el eje de menor inercia y la torsión de la sección;
- En la Sección 1.2.4., que para asegurar una adecuada ductilidad en las barras comprimidas donde se prevé se formarán rótulas plásticas, la resistencia disponible a compresión no será mayor que $0,75F_yA_g$.

La evaluación del diseño está regida por la Sección 1.1. “*General Requirements*”. Allí se establece que los estados límite resistentes, detectados mediante la aplicación de un análisis de 2^oOM que incorpore todos los aspectos enumerados en el Apéndice 1, no se encuentran sujetos a los criterios de verificación de la norma cuando el nivel de confiabilidad alcanzado en el análisis inelástico es igual o mayor al que surge de la aplicación de los Capítulos de la norma. Asimismo, también establece que aquellos estados límite resistentes no detectados en el análisis inelástico deben ser evaluados verificando que, para todos los estados límite, se cumpla con la inequación base del diseño LRFD: que las resistencias requeridas sean menores que las resistencias disponibles.

Respecto a este método puede decirse que es, esencialmente, un método indirecto ya que la norma orienta su implementación hacia la determinación de las resistencias disponibles de acuerdo a los Capítulos D a K de la propia norma. En el mismo sentido, si bien es cierto que la norma declara permitir análisis directos, no establece ninguna metodología para ello.

CONCLUSIONES

La norma ANSI/AISC 360-10 presenta varios métodos de análisis:

- Los métodos “alternativos” del Apéndice 7;
- El método de Diseño por Análisis Directo del Capítulo C;
- El método inelástico del Apéndice 1;

En cuanto a su versatilidad, todos los métodos tienen limitaciones, siendo el método DAD el más versátil.

En cuanto a su posibilidad de ser considerados como métodos directos, ninguno de los métodos contenidos en la norma ANSI/AISC 360-10 puede ser considerado como un método directo en sentido estricto ya que todos realizan la evaluación del diseño comparando resistencias requeridas con resistencias disponibles, elemento característico de los métodos de diseño indirectos.

BIBLIOGRAFÍA

ANSI/AISC 360-10, Specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA, 2010.

TOLOSA, Aníbal Guillermo, Metodología para la aplicación del Método Directo de Diseño en marcos de acero aporricados planos incluyendo fenómenos de segundo orden de material según el reglamento ANSI/AISC 360-10, Tesis aprobada para la obtención del título de Magister en Ingeniería Estructural, Buenos Aires, 2012.