

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO POR ANÁLISIS DIRECTO INELASTICO SEGÚN LA NORMA ANSI/AISC 360-10

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

RESUMEN

En los métodos directos de diseño, todos los requisitos vinculados a la resistencia y la estabilidad estructural quedan satisfechos al encontrar una configuración equilibrada bajo el nivel de carga requerido, sin necesidad de verificaciones adicionales. Para que ello sea posible, el modelo estructural analizado debe considerar todos y cada uno de los estados límite que afectan a la estructura.

La norma ANSI/AISC 360-10, aunque admite su aplicación, no contiene ningún método de diseño estrictamente directo. En este trabajo se desarrolla una propuesta de metodología para la implementación de un método directo de diseño, la cual se basa sobre el método de Diseño por Análisis Directo (método DAD) de la Sección C1.1. y el Apéndice 1 de la norma ANSI/AISC 360-10.

ABSTRACT

In direct design methods, all requirements related to structural resistance and stability are met when finding a balanced configuration at the required loading level, no additional verifications being necessary. For such purpose, the structural model analyzed should consider each and every limit state affecting the structure

Although applicable, ANSI/AISC 360-10 Specification does not contain any strictly direct design method. This paper proposes a methodology for the implementation of a direct design method, based on the Direct Analysis Design (DAD) method in Section C1.1. and the Appendix of ANSI/AISC 360-10 Specification.

PRESENTACIÓN

Se presenta a continuación una propuesta de metodología para la implementación de un método de diseño por análisis directo (Tolosa, 2012). Esta metodología, que requiere de un análisis estructural en segundo orden de material (o inelástico), es denominada método de diseño por análisis directo inelástico (método DADI). La misma se basa sobre el método de diseño por análisis directo de la Sección C1.1. (método DAD) y el Apéndice 1 de la norma ANSI/AISC 360-10.

Teniendo en cuenta desarrollos anteriores (Choi y Kim, 2002 y Modugno, 2010) la metodología propuesta busca facilitar la implementación sencilla y práctica del método DADI en marcos de acero aporricados planos. A continuación (Figura 1) se procederá a detallar uno a uno los pasos que hacen a la implementación de la metodología propuesta.

METODOLOGÍA

Paso 1: Definir topología, introducir secciones y modelar cargas

Inicialmente se definen las dimensiones generales de la estructura a partir de establecer las coordenadas de los nodos y la incidencia de las barras. Es en este punto donde pueden introducirse los segmentos rígidos que representan el tamaño finito de los nodos y posibles excentricidades.

A continuación se asignan secciones a cada barra. Esta operación puede requerir el uso de variados criterios: experiencia previa del profesional actuante, similitud con estructuras conocidas, relaciones dimensionales, criterios analíticos, etc.

Finalmente, se introducen las cargas. Debe tenerse especial cuidado en modelar correctamente las acciones sobre aquellos elementos cuyas cargas son definidas por criterios de áreas tributarias. En ese sentido, es frecuente que las normas soliciten que elementos con menor área tributaria (vigas de piso, por ejemplo) sean diseñados para soportar sobrecargas de uso mayores que elementos con mayor área tributaria (vigas principales que soportan vigas de piso, por ejemplo). Para que ambas situaciones puedan coexistir en un mismo modelo puede optarse por colocar las cargas que corresponden a los elementos de menor área tributaria –las vigas de piso mencionadas anteriormente– y, en sus extremos, fuerzas concentradas en dirección contraria que eliminen la carga excedente y permitan que sea transmitida a los elementos de mayor área tributaria –las vigas principales mencionadas anteriormente– sólo la proporción de carga que corresponde.

En este punto se introducen, además de los estados simples de carga, las combinaciones de estados simples de carga para obtener las combinaciones resistentes (LRFD, últimas) –con las que se verificarán resistencia y equilibrio– y las combinaciones funcionales (servicio) –con las que se verificarán deformaciones, desplazamientos y confort–.

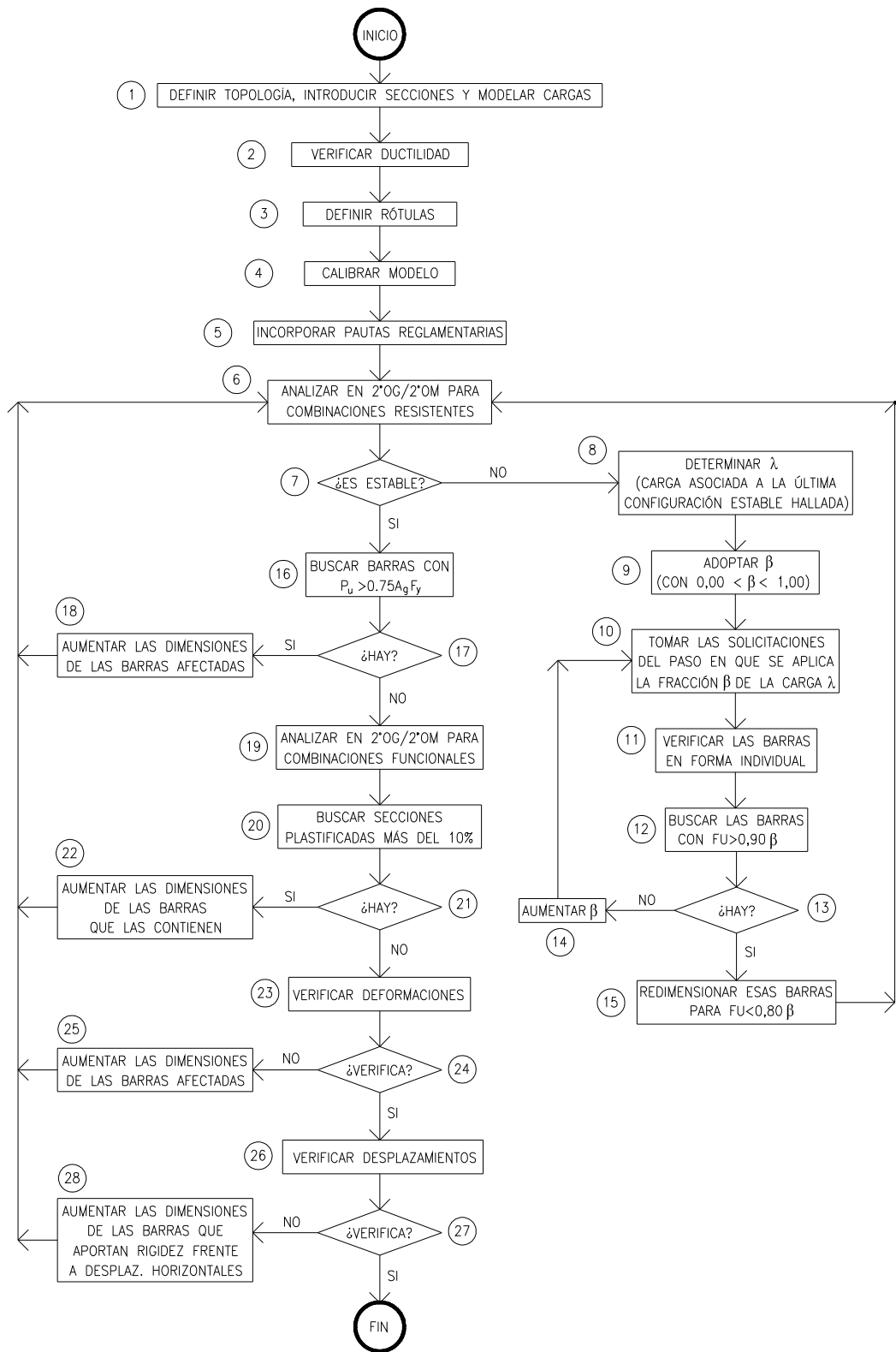


Figura 1. Diagrama de flujo para la implementación del Método de Diseño por Análisis Directo Inelástico (Método DADI)

Con el objetivo de descartar posibles errores groseros en el modelado, es recomendable en este punto hacer un análisis en primer orden geométrico y de material para poder constatar, para cada estado simple de carga considerado, que los diagramas de esfuerzos característicos presentan aspectos “razonables”, que las deformaciones encontradas sean las esperables para la estructura y que la resultante de reacciones sea igual y contraria al total de las cargas que pretendieron introducirse.

Paso 2: Verificar ductilidad

Se confirma que las secciones adoptadas satisfacen los criterios de ductilidad establecidos en la norma. En este sentido, debe evaluarse:

- Calidad del acero utilizada;
- Compacidad de alas;
- Compacidad de almas;
- Distancia entre arriostramientos en puntos de formación de rótulas;

Cabe recordar que la incorporación en el modelo de análisis de fenómenos espaciales –como ser el pandeo lateral torsional y los pandeos locales de ala y alma– son difíciles de implementar. Por ese motivo, la alternativa más sencilla consiste en utilizar secciones compactas y convenientemente arriostradas, las cuales permitan asumir no sólo que no habrá inestabilidades locales ni laterales sino que tampoco es necesaria la modelación de imperfecciones debidas a la falta de regularidad de las secciones. En el caso de no poder satisfacer estos criterios, se podrá optar por verificar en forma individual aquellos estados límite relevantes que no hayan podido ser incorporados en el modelo de análisis, aplicando las pautas establecidas en los Capítulos D a K de la norma. En general, este principio es aplicable a todos los aspectos relevantes no incorporados en y/o detectados por el modelo. En particular, las resistencias de las barras a corte y la resistencia de las uniones –que son siempre relevantes y que frecuentemente no son incorporadas en los modelos– deberán hacerse de ese modo.

Paso 3: Definir rótulas

Se introducen en el modelo rótulas de acuerdo con las posibilidades del programa empleado. Si se utilizan las rótulas concentradas definidas a partir de una curva momento versus rotación (M vs. R), debe recordarse que la rotación a considerar es la plástica y no la total y que la ecuación de interacción debe satisfacerse siempre.

Resulta importante aclarar que deberá definirse una rótula en todo lugar donde exista la posibilidad de formarse una rótula.

Por último, cabe agregar que no debe incluirse el endurecimiento por deformación al caracterizar el comportamiento del acero. De hacerlo se podría llegar a considerar que una sección es capaz de tomar momentos flectores mayores al momento plástico, algo no permitido por la norma.

Paso 4: Calibrar modelo

Un modelo pensado para ser analizado en primer orden geométrico (1^oOG) y primer orden de material (1^oOM) no precisa la definición de ningún parámetro particular. Sin embargo, un modelo pensado para ser analizado en segundo orden geométrico (2^oOG) y segundo orden de material (2^oOM) precisa la definición de varios parámetros los cuales tienen una notable influencia en los resultados obtenidos.

Los parámetros que deben ser definidos al momento de hacer un análisis en 2^oOG/2^oOM son:

- Número de segmentos por barra;
- Características de las rótulas consideradas;
- Cantidad de escalones de carga;
- Tolerancia adoptada al evaluar si el equilibrio es alcanzado o no.

Un modelo no calibrado presenta, ante menores variaciones de los parámetros mencionados, grandes variaciones en los resultados. Esta situación es, a todas luces, inadmisibles. Por el contrario, un modelo calibrado presenta una razonable estabilidad de los resultados a pesar de introducir en el modelo moderadas variaciones en dichos parámetros.

El proceso de calibración debe hacerse en forma específica para cada modelo y de acuerdo al software empleado. La forma de llevarlo a cabo consiste en variar los parámetros mencionados de a uno por vez y, comparando los resultados obtenidos con los anteriores, determinar si la diferencia es admisible. Lamentablemente la respuesta de los modelos analizados en 2^oOG/2^oOM es marcadamente no lineal y los parámetros mencionados son interdependientes, por lo que el proceso para lograr la convergencia de los parámetros no es sencillo.

Como orientación, para comenzar el proceso de calibración se proponen los siguientes valores iniciales:

- Número de segmentos en que se dividen las columnas: 6 segmentos por barra para columnas de marcos apertados planos;
- Número de segmentos en que se dividen las vigas: no tiene mayor trascendencia en los resultados;
- Tolerancia: <0,1%;
- Número de escalones: >25.

En caso de que el software empleado disponga de la posibilidad de definir las rótulas mediante fibras, se proponen los siguientes valores iniciales:

- Longitud de las fibras en las rótulas:
 - En columnas: tomar una longitud del 6% de la longitud de las columnas;
 - En vigas: tomar una longitud del 6% de la longitud de las vigas;

- Discretización de las fibras en las rótulas:
 - Vigas
 - Alas: 8 fibras en el largo y 1 fibra en el espesor;
 - Alma: 19/20 fibras en la altura y 1 fibra en el espesor.
 - Columnas
 - Alas: 8 fibras en el largo y 2 fibras en el espesor;
 - Alma: 14 fibras en la altura y 1 fibra en el espesor;

Paso 5: Incorporar pautas reglamentarias

La norma ANSI/AISC 360-10 establece la introducción en el modelo de algunos aspectos, a saber:

- Reducción al 90% de la rigidez de las barras y conexiones (generalmente a través de la reducción del valor del módulo de elasticidad longitudinal E) y de la tensión de fluencia F_y ;
- Introducción de imperfecciones.

La reducción de la rigidez es al 80% en caso de no modelar las tensiones residuales en forma explícita.

La introducción de imperfecciones puede hacerse a través de las cargas nocionales, recomendándose considerar tanto las que representan la falta de verticalidad como a las que consideran la falta de rectitud para evitar la necesidad de:

- Verificar que cada barra se encuentra por debajo del umbral de carga establecido reglamentariamente para poder desprestigiar esta imperfección;
- Verificar si se tienen barras demasiado esbeltas en el sistema, ya que considerando la falta de rectitud se pone su presencia en evidencia.

Paso 6: Analizar en 2^oOG/2^oOM para combinaciones re sistentes

Realizados los pasos anteriores se procede a iniciar el análisis estructural considerando 2^oOG/2^oOM.

Paso 7: ¿Es estable?

Luego del análisis en 2^oOG/2^oOM, puede que se haya encontrado una solución equilibrada para las cargas aplicadas. En ese caso, la estructura se considera estable. La otra alternativa que puede darse es que el programa de cálculo haya podido encontrar una solución equilibrada hasta cierto nivel de carga pero no para la totalidad de cargas aplicadas. En ese caso la estructura se considera inestable. Cabe aclarar que, en este último caso, el límite encontrado puede no ser tal obedeciendo en realidad a una limitación del método de resolución del problema numérico.

Paso 8: Determinar λ (carga asociada a la última configuración estable hallada)

Si la estructura es inestable, debe determinarse cuál fue el nivel de carga aplicado para el que pudo encontrarse una solución equilibrada. Esto puede hacerse ya que el análisis incremental permite conocer la situación de la estructura para cada escalón de carga aplicado.

Cabe aclarar que el análisis de 2°OG/2°OM puede no arrojar ningún resultado a partir del cual implementar la metodología presentada. En ese caso puede optarse por ir simplificando el modelo de a poco, intentando primero hacer un análisis de 2°OG/1°OM, y descartar así algún error al definir las rótulas, o un análisis de 1°OG/1°OM, para descartar alguna inestabilidad numérica debido a una asignación desacertada de secciones. Si aún así se sigue sin obtener resultados, es posible que el modelo posea problemas mayores, como ser falta de vínculos externos o un error grosero en la definición de la incidencia de las barras.

Paso 9: Adoptar β (con $0,00 < \beta < 1,00$)

La adopción de este factor responde a que, muchas veces, la última configuración de equilibrio encontrada resulta muy difícil de analizar debido a que los efectos de 2°O –tanto geométricos como de material– “ensucian” la salida. Por ese motivo, resulta conveniente alejarse un poco de la situación límite –adoptando un valor de β menor a 1,00– para tratar de descubrir, en relación con la inestabilidad, cuál es la barra que la inicia o cuál es el mecanismo que la produce. A partir de esta información puede evaluarse cuál es la medida a tomar más efectiva.

Paso 10: Tomar las solicitaciones del paso en que se aplica la fracción β de la carga λ

Al aplicar la fracción β de la carga λ , la estructura es estable y el programa de cálculo puede generar vistas de la estructura deformada y obtener diagramas de esfuerzos característicos.

Esta situación abre dos alternativas. La primera consiste en observar la deformada e identificar así cuál es el origen de la inestabilidad, requiriendo esta alternativa la activa intervención del profesional. La segunda consiste en encontrar el origen de la inestabilidad a través de la evaluación del factor de utilización de cada barra, útil en programas que poseen un módulo para la verificación automática.

Paso 11: Verificar las barras en forma individual

Aplicando la segunda de las dos alternativas mencionadas previamente y considerando las solicitaciones obtenidas en el punto anterior, se realiza una verificación individual de cada barra.

Esta verificación se realiza atendiendo a lo indicado en los Capítulos D a K de la

norma ANSI/AISC 360-10, debiendo formalmente considerarse los valores nominales de fluencia y rigidez y el factor K de longitud efectiva que corresponda. Sin embargo, por una cuestión de simplicidad, puede optarse por utilizar los valores de fluencia y rigidez reducidos y el factor K de longitud efectiva igual a 1,00. Esta simplificación puede hacerse ya que esta verificación se hace con el solo propósito de identificar las barras asociadas al mecanismo de falla. La verificación formal de la estructura se hace en forma directa mediante el análisis del paso 6 y la evaluación del paso 7.

Paso 12: Buscar las barras con $FU > 0,90\beta$

Atendiendo a que con FU se hace referencia al factor de utilización, se buscan las barras que poseen un FU elevado. El factor 0,90 responde a tener en cuenta la variación no lineal de FU respecto de las cargas aplicadas.

Paso 13: ¿Hay barras con $FU > 0,90\beta$?

Esta pregunta tiene dos posibles respuestas: una negativa, que lleva al paso 14 y una afirmativa, que lleva al paso 15.

Paso 14: Aumentar β

En el caso de darse la respuesta negativa en el punto anterior, significa que los fenómenos que se buscan no han aparecido bajo esa fracción β de carga. Lo que debe hacerse es aumentar β , para analizar la situación de la estructura más cerca de su límite de carga, y retomar el análisis desde el paso 10.

Paso 15: Redimensionar esas barras para $FU < 0,80\beta$

Una vez identificadas las barras más solicitadas de la estructura, se redimensionan las mismas de forma tal que las nuevas secciones presenten valores de FU menores a $0,80\beta$ (valor sugerido) y retomar el análisis desde el paso 6.

De igual forma que en el punto 12, el factor 0,80 responde al crecimiento no lineal de FU respecto de las cargas aplicadas.

Paso 16: Buscar barras con $P_u > 0,75 A_g F_y$

Hecha la corrida en 2ºOG/2ºOM y resultando estable bajo las cargas definidas por las combinaciones resistentes, debe determinarse si hay barras con esfuerzos axiales superiores a $0,75 A_g F_y$, para asegurar que no haya secciones demasiado comprimidas que puedan por ello limitar su comportamiento dúctil.

Paso 17: ¿Hay barras con $P_u > 0,75 A_g F_y$?

La respuesta a este punto admite sólo dos posibilidades. Si hay barras con esfuerzos axiales mayores a los admitidos, debe procederse según el paso 18. De lo contrario, proceder según se indica en el paso 19.

Paso 18: Aumentar las dimensiones de las barras afectadas

Siendo que se busca evitar que haya barras con solicitaciones axiales elevadas, una alternativa consiste en aumentar las dimensiones –el área en particular– de las barras afectadas. Hechas las modificaciones en el modelo debe proseguirse el análisis de acuerdo con lo indicado en el paso 6.

Paso 19: Analizar en 2°OG/2°OM para combinaciones f uncionales

Si luego del paso 17 no se encuentran barras con esfuerzos axiales demasiado elevados, se considera que la estructura satisface los criterios de resistencia y estabilidad exigidos por la norma. Sin embargo, debe estudiarse el comportamiento de la estructura bajo cargas funcionales.

Paso 20: Buscar secciones plastificadas más del 10%

Idealmente, una estructura analizada considerando 2°OM no debería presentar rótulas bajo cargas de servicio, ya que podrían verse afectados aspectos como la funcionalidad y la durabilidad. Sin embargo, considerando que las cargas de servicio son 0,67 de las cargas últimas y aceptando que, para secciones doble T, el momento M_r es el 0,61 de M_p , puede admitirse una plastificación de hasta el 10% de la sección (criterio sugerido).

Paso 21: ¿Hay secciones plastificadas más del 10%?

Luego de estudiar los resultados puede determinarse la existencia de secciones que posean más del 10% de su sección plastificada. De haberlas, debe proseguirse en el paso 22. De lo contrario, sigue el paso 23.

Paso 22: Aumentar de las dimensiones de las barras que las contienen

La solución propuesta para mejorar la situación de las barras plastificadas en exceso bajo cargas de servicio consiste, sencillamente, en aumentar las dimensiones de las barras afectadas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que esta estrategia no necesariamente conduce a una solución debido a que, al aumentar las dimensiones aumenta no sólo la resistencia –que es lo buscado– sino también la rigidez, que puede llegar a atraer más carga hacia la sección y, por ese motivo, no ver mejorada su situación. En todo caso deberán hacerse distintas pruebas hasta

lograr dar con una sección que satisfaga todos los criterios.

Ya que el cambio de sección modifica el comportamiento estructural del conjunto –que es precisamente lo que este método evalúa– debe volver a analizarse de acuerdo con el paso 6.

Paso 23: Verificar deformaciones

Este punto está orientado a la determinación de flechas admisibles de acuerdo con criterios de uso y compararlas con las halladas en el análisis hecho para combinaciones funcionales.

Paso 24: ¿Verifican las deformaciones?

Como resultado de la verificación surgen dos alternativas: que no verifique, con lo cual se va al paso 25, o que si lo haga, con lo cual se va al paso 26.

Paso 25: Aumentar las dimensiones de las barras afectadas

En el caso de no verificar deformaciones, es posible que deban aumentarse las dimensiones de las barras afectadas, aunque también es posible que esta situación descubra la necesidad de implementar algún cambio más importante en el diseño. En todo caso, será el profesional actuante el encargado de determinar cuál es la mejor solución. Implementados los cambios debe retomarse el análisis por el paso 6.

Paso 26: Verificar desplazamientos

La verificación de desplazamientos está orientada a controlar la flexibilidad de la estructura frente a desplazamientos horizontales. Si bien es cierto que el método aplicado no posee limitaciones en cuanto a su aplicabilidad –cosa que sí tiene el resto de los métodos “alternativos” del Apéndice 7 de la norma ANSI/AISC 360-10– siempre es necesario controlar este aspecto del funcionamiento estructural, ya que es recomendable evitar las estructuras demasiado flexibles. En ese sentido, resulta un llamado de atención que la razón entre los desplazamientos en 2ºOG y los desplazamientos en 1ºOG sean mayores a 1,70.

Paso 27: ¿Verifican los desplazamientos?

En caso de no verificar, el procedimiento continúa en el paso 28. Si verifica, se llega al final del diseño. La estructura cumple con los requisitos reglamentarios en lo que hace a resistencia, equilibrio y servicio.

Paso 28: Aumentar las dimensiones de las barras que aportan rigidez frente a desplazamientos horizontales

El hecho de no satisfacer la verificación de desplazamientos horizontales habla de que, posiblemente, se esté frente a una estructura excesivamente flexible. Para remediar este problema debe otorgársele una mayor rigidez al conjunto. Lo más sencillo es observar la deformada de la estructura para la combinación de cargas que evidencie la falencia y reforzar aquel sector de la estructura en el cual se observa una concentración de deformaciones. Aunque una alternativa siempre posible es aumentar el tamaño de todas las barras de la estructura, debe tenerse presente que aumentar la rigidez de una barra que, al ser evaluada no registra deformaciones excesivas, poco aportará para mejorar el aspecto en cuestión. Hechos los cambios debe retomarse el análisis por el paso 6.

EVALUACIÓN DEL MÉTODO

La evaluación de la confiabilidad del método propuesto se realizó tomando como *benchmark* una estructura la cual fue construida a escala real y luego ensayada a rotura (Figuras 2 y 3).

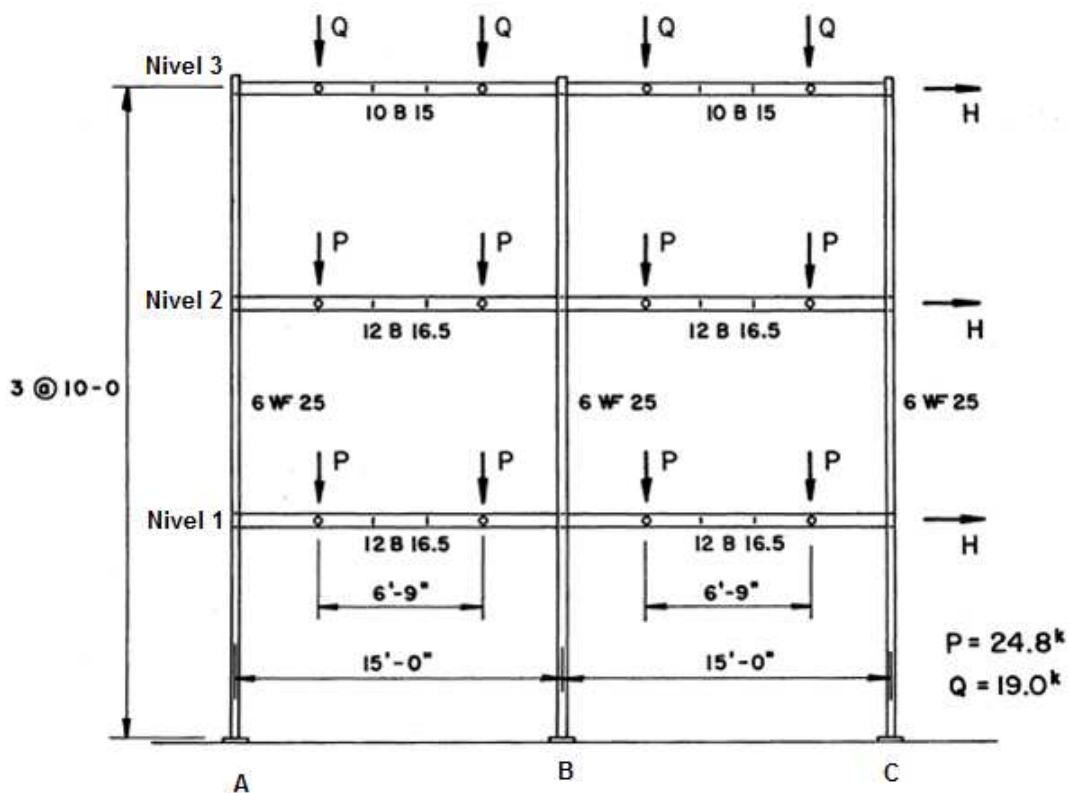


Figura 2. Esquema estructural de la estructura ensayada. Longitudes en pulgadas y pies, fuerzas en kips (Yarimci, 1966)

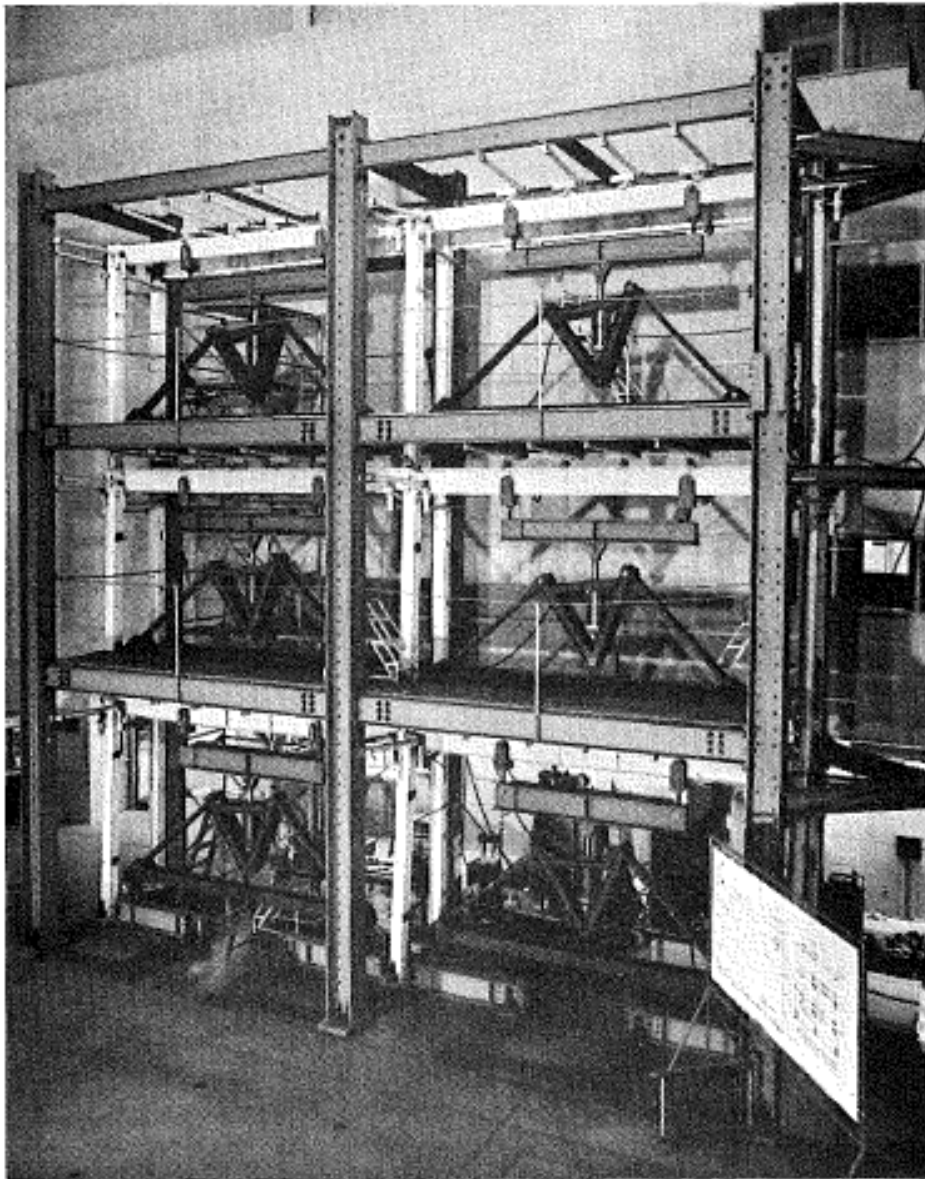


Figura 3. Vista de la estructura ensayada, en blanco. A ambos lados, en gris, los marcos auxiliares de apoyo a equipos e instrumentos (Yarimci, 1966)

Así, se aplicó el método propuesto para determinar la capacidad de carga de dicha estructura, comparar los resultados y extraer conclusiones.

Se consideró que las cargas de colapso determinadas por ensayo corresponden a la resistencia nominal del marco aporricado. Ahora bien, siendo que la norma ANSI/AISC 360-10 establece un factor de resistencia ϕ para estados límite asociados a flexión y compresión de 0,90, puede asumirse que la estructura posee una capacidad de carga disponible equivalente al 90% de la carga de colapso. De esta forma, si aplicamos al modelo computacional una carga equivalente al 89% de

la carga de colapso, el resultado obtenido debería indicar que la aplicación de dicha carga es posible. Por otro lado, si aplicamos al modelo computacional una carga equivalente al 91% de la carga de colapso, el resultado obtenido debería indicar que la aplicación de dicha carga no es posible.

La introducción de las cargas en el modelo computacional se realizó replicando lo hecho en el ensayo. Así, primero se introdujeron la totalidad de las cargas verticales y luego, manteniendo a éstas en forma constante, se introdujeron progresivamente las cargas horizontales. Realizado el análisis, el método propuesto encontró configuraciones equilibradas para el 90% de la carga vertical y el 92% de la carga horizontal de colapso. Como puede observarse, lo ajustado de los resultados esperados con los obtenidos es notable.

Por último, cabe señalar que el método K concluyó que el pórtico no era capaz de soportar siquiera las cargas verticales del ensayo.

CONCLUSIONES

El método propuesto es verdaderamente un método directo: los requisitos vinculados a la resistencia y la estabilidad quedan satisfechos simplemente al encontrar una configuración equilibrada bajo el nivel de carga requerido, sin necesidad de verificaciones adicionales.

Asimismo, la necesidad de calibrar el modelo queda compensada por la desaparición de las instancias de:

- Determinar las resistencias disponibles;
- Comprobar que las resistencias disponibles sean iguales o mayores que las resistencias requeridas.

Cabe mencionar que el método propuesto es capaz de detectar y evaluar solo los estados límite modelados. Los estados límite no modelados deben ser evaluados en forma indirecta de acuerdo a los criterios generales establecidos por la norma. De acuerdo a la metodología propuesta, la plastificación de las secciones, las deformaciones y los desplazamientos se evalúan en forma indirecta. A estos tres estados límite evaluados en forma indirecta deben frecuentemente agregárseles el corte (si es que la modelación de las rótulas no permite la incorporación explícita de este estado límite en el modelo) y las uniones.

La capacidad que posee el método propuesto de predecir en forma ajustada la resistencia disponible en una estructura permite aplicarlo ventajosamente en situaciones donde la resistencia disponible es limitada y su aumento es complicado, antieconómico o directamente imposible, como frecuentemente ocurre en el caso de estructuras existentes. En dichos casos, la aplicación de otro método, más conservador, podría llevar a la conclusión de que una estructura no verifica cuando, en realidad, sí lo hace.

BIBLIOGRAFÍA

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

CHOI, Se-Hyu y KIM, Seung-Eock, Optimal design of steel frame using practical nonlinear inelastic analysis, *Engineering Structures* 24, 1189-1201, 2002.

MODUGNO, Jennifer, Application of the 13th edition AISC Direct Analysis Method to heavy industry industrial structures, MS Thesis, Georgia Institute of Technology, 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.

YARIMCI, E., Incremental inelastic analysis of framed structures and some experimental verifications, PhD. Dissertation, Department of Civil Engineering, Lehigh University, Bethlehem, PA, USA, 1966.