

# **PREQUALIFIED BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS OF CHAPTER 11 OF THE NTC-DCEA-2023 STANDARD**

**Héctor Soto Rodríguez<sup>(1)</sup>**

(1) Director General del Centro Regional de Desarrollo en Ingeniería Civil, México,  
[hectorsotomor@gmail.com](mailto:hectorsotomor@gmail.com)

Received: February, 2025; Accepted: April, 2025;  
Published: May, 2025

## **ABSTRACT**

This article addresses the topic of prequalified beam-to-column moment connections in steel buildings, focusing on the specifications of the Technical Design and Construction Code for Steel Structures of Mexico City (NTC-DCEA-2023). It analyzes the importance of these connections in ensuring adequate seismic performance in high-seismicity zones such as Mexico City.

An analysis is presented of the prequalified beam-to-column moment connections included in Chapter 11 of the NTC-DCEA-2023, which are based on the AISC 358-22 Specification. The article explains the reasons why certain connections from the AISC standard were excluded and describes their general characteristics, including their advantages and disadvantages in Mexican professional practice.

Additionally, a comparison is made between design and construction practices in Mexico and other countries, such as Japan and the United States. The importance of conducting full-scale experimental testing and adapting connections to local conditions is emphasized.

Finally, construction companies in the steel structures sector are encouraged to participate in research aimed at innovating more efficient and resilient connections for the future. The article is based on the author's research project on the evaluation of the seismic behavior of structural steel beam-to-column connections in high-seismicity zones.

**Keywords:** AISC 358-22 Specification, Experimental tests, NTC-DCEA-2023, Prequalified connections, Rigid beam-column connection.

## CONEXIONES TRABE-COLUMNA PRECALIFICADAS DEL CAPÍTULO 11 DE LA NORMA NTC-DCEA-2023

### RESUMEN

El presente artículo aborda el tema de las conexiones rígidas trabe-columna precalificadas de edificios de acero, enfocándose en el Capítulo 11 de la Norma Técnica Complementaria de Diseño y Construcción de Estructuras de Acero de la Ciudad de México (NTC-DCEA-2023). Se analiza la importancia del uso de estas conexiones para garantizar un comportamiento sísmico adecuado en zonas de alta sismicidad de la Ciudad de México, particularmente en la zona del lago y de transición.

Se presenta un análisis crítico de las conexiones rígidas trabe-columna precalificadas incluidas en el Capítulo 11 de la NTC-DCEA-2023, las cuales están basadas en la Especificación AISC 358-22 y anteproyecto AISC-358-27. En el artículo se exponen las razones por las cuales ciertas conexiones del estándar AISC fueron excluidas y se describen sus características generales, incluyendo sus ventajas y desventajas en la práctica profesional mexicana.

Además, se hace una comparación entre las prácticas profesionales de diseño y de construcción de las conexiones rígidas trabe-columna de acero estructural en México y de otros países, como Japón y Estados Unidos.

Se enfatiza la importancia de ampliar las líneas de investigación en el tema del comportamiento sísmico de las conexiones rígidas trabe-columna de acero estructural innovadoras y resilientes por medio de pruebas experimentales en laboratorios de estructuras a escala real tomando en cuenta las condiciones locales de los países latinoamericanos para precalificarlas y aumentar su número conforme a las prácticas de diseño y construcción que prevalecen en América Latina.

Finalmente, se invita a las empresas del sector de la construcción de estructuras de acero de la región a participar en investigaciones experimentales para innovar conexiones más eficientes y resilientes para el futuro inmediato. El artículo se basa en un proyecto de investigación del autor sobre la evaluación del comportamiento sísmico de conexiones trabe-columna de acero estructural en zonas de alta sismicidad.

**Palabras clave:** Conexión rígida trabe-columna, Conexiones precalificadas, Especificación AISC-358-22, NTC-DCEA, pruebas experimentales.

### 1. INTRODUCCIÓN

En un mundo disruptivo actual, en el que los fenómenos naturales, particularmente los sismos y los huracanes, son cada vez más frecuentes, el papel de los ingenieros civiles especializados en la ingeniería sísmica es fundamental para reducir el impacto de estas amenazas en la infraestructura urbana de las grandes ciudades.

En los últimos años, el impacto sísmico a nivel mundial ha aumentado de manera dramática. El 10% de las grandes ciudades del mundo se encuentran en zonas preponderantemente sísmicas, con riesgo sísmico apreciable, la Ciudad de México entre éstas.

Con el fin de garantizar la seguridad estructural y la resiliencia sísmica en zonas de alta sismicidad en los países de América Latina, México incluido, se requiere diseñar y construir edificios de acero con sistemas estructurales capaces de desarrollar altos niveles de ductilidad por comportamiento inelástico y una adecuada capacidad de absorción de energía.

En el caso particular de México, alrededor de tres cuartas partes del territorio nacional están sujetas a un riesgo sísmico elevado. La zona sísmica de la Costa del Pacífico Sur, a lo largo de ésta (Brecha de Guerrero), es una de las zonas más activas del mundo, lo que provoca que se originen temblores de magnitud elevada que ocasionan daños estructurales cuantiosos en las edificaciones de la Ciudad de México, a una distancia de más de 400 km.

El presente artículo tiene como objetivo analizar las conexiones rígidas trabe-columna precalificadas incluidas en el Capítulo 11 de la Norma Técnica Complementaria de Diseño y Construcción de Estructuras de Acero de la Ciudad de México (NTC-DCEA-2023), las cuales se basan en la Especificación AISC 358-22 (AISC-358-27).

En la Ciudad de México, los edificios de acero han mostrado un comportamiento sísmico satisfactorio en general durante los sismos históricos. La mejora observada en el diseño, la fabricación, el montaje y la supervisión de los edificios de acero, principalmente en las zonas del lago y de transición, presenta un área de oportunidad para impulsar la teoría de la resiliencia sísmica de las estructuras de acero en los próximos años.

El comportamiento sísmico de los edificios se refiere a la manera en que una estructura responde a las fuerzas generadas por un temblor intenso o moderado, incluyendo su capacidad para absorber y disipar la energía que induce un temblor sin colapsar ni sufrir daños graves que comprometan su integridad estructural. Consecuentemente, la resiliencia sísmica es un enfoque innovador en la ingeniería estructural que va más allá de las propiedades de una estructura que definen su respuesta sísmica (ductilidad, capacidad de absorción de energía, resistencia, rigidez, amortiguamiento, etc.) con la finalidad de que las estructuras se recuperen bajo condiciones extremas (sismos, o huracanes de alto impacto que afectan la infraestructura urbana).

Las estructuras metálicas son fabricadas con acero estructural de alta resistencia, un material muy dúctil que puede utilizarse para construir edificios que satisfacen las condiciones anteriores. Consecuentemente, el acero es muy conveniente para edificaciones resistentes a temblores intensos, como quedó demostrado tras el sismo de septiembre de 2017 en la Ciudad de México.

No obstante, la ductilidad intrínseca del acero no se conserva necesariamente en la estructura terminada, por lo que deben tomarse precauciones especiales durante la construcción de un edificio de acero para evitar la pérdida de esta propiedad.

## **2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LAS NORMAS Y PRÁCTICAS**

### **2.1 Impacto de los sismos de Northridge (1994) y Kobe (1995)**

Se ha constatado que los sismos de Northridge, California (1994) y Kobe, Japón (1995), marcaron un punto de inflexión en la ingeniería sísmica mundial de los edificios de acero. Estos eventos dejaron una huella profunda en el campo del conocimiento de las estructuras de acero, impulsando una revisión profunda de las prácticas de diseño y construcción de vigas. Tras ambos sismos, se pudo observar el comportamiento insatisfactorio de las conexiones rígidas trabe-columna soldadas de acero estructural. Se evidenciaron numerosos daños de las SPC (Soldaduras de Penetración Completa) del patín inferior de las vigas, causados por un mecanismo súbito de fractura frágil que no se había observado anteriormente (Soto Rodríguez, 2024b).

Los sismos indicados impulsaron una transformación profunda en las prácticas de diseño sísmico de estructuras de acero en el mundo, con un enfoque más estricto en la seguridad, comportamiento y confiabilidad de las conexiones estructurales.

La importancia y las enseñanzas derivadas de estos eventos en la evolución de las normas de diseño por sismo estriba en los siguientes avances (Soto Rodríguez, 2024b):

1. **Identificación de conexiones rígidas trabe-columna soldadas vulnerables:** Ambos sismos revelaron que muchas conexiones rígidas de este tipo, especialmente en marcos resistentes a momento (marcos rígidos), sufrieron fracturas frágiles en la zona de la conexión, incluso sin alcanzar su resistencia teórica esperada.
2. **Revisión de códigos y estándares de diseño sísmico:** Como resultado de los graves daños, se inició una revisión exhaustiva de las normas de diseño sísmico, como el AISC Seismic Provisions y el FEMA 350, incorporando nuevos requisitos de diseño, detallado, inspección y aseguramiento de calidad de las soldaduras de penetración completa (SPC) para garantizar un comportamiento dúctil y confiable.
3. **Desarrollo de nuevas configuraciones de conexiones:** Se promovió la innovación y el diseño de conexiones trabe columna precalificadas con mejor comportamiento sísmico, lo que dio origen a las uniones con viga de sección reducida (RBS: Reduced Beam Section, en inglés) y la conexión con placas extremas extendidas con y sin cartabones (End-Plate).
4. **Énfasis en el desempeño estructural:** Se fortaleció el enfoque de diseño basado en desempeño (Performance-Based Design), priorizando no solamente la resistencia, sino también la capacidad de deformación y disipación de energía de las estructuras de edificios de acero.

A raíz de estos eventos, se realizaron avances tecnológicos a nivel mundial principalmente desde 1994 al año 2000.

Además, en los últimos 25 años se han logrado avances importantes en los criterios de diseño sísmico de edificios de acero, particularmente en el diseño y construcción de las conexiones trabe-columna soldadas precalificadas, sistemas de aislamiento sísmico, amortiguadores de masa sintonizados, y sistemas con amortiguamiento suplementario viscoelástico, por mencionar algunos. Estas últimas tecnologías de protección sísmica permiten que las estructuras se independicen o se integren a los sistemas estructurales tradicionales para disipar la energía sísmica inducida por los temblores intensos de manera controlada.

Se han realizado cuantiosas investigaciones experimentales y analíticas por diversos grupos de investigación en Estados Unidos, América Latina, Europa y Asia, sobre el performance (comportamiento, desempeño o rendimiento sísmico) de las conexiones rígidas trabe-columna de acero estructural sujetas a cargas laterales cíclicas reversibles (Soto, 2023).

La base del presente artículo consistió en una revisión exhaustiva, a nivel mundial, de los estudios experimentales (estado del conocimiento o del arte) realizados en laboratorios de estructuras grandes de varios centros de investigación del mundo, relacionados con el performance sísmico de los diversos tipos de conexiones rígidas trabe-columna de acero estructural que pertenecen a sistemas estructurales constituidos por marcos rígidos dúctiles, con la finalidad de identificar el nivel de conocimiento sobre este tipo de conexiones en México y orientar los objetivos hacia aquellos que no se han estudiado en el país, considerando las condiciones particulares de peligro sísmico y suelo blando, como la Ciudad de México (Soto Rodríguez, 2023).

### 3. NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS EN MÉXICO

#### 3.1 NTC-DCEM-1987

En su Inciso 5.8.2 'Resistencia de la conexión' de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas, se estipulan las condiciones necesarias para lograr un diseño correcto de las conexiones rígidas trabe columna de acero estructural. Estas condiciones deben ser satisfechas por una conexión para que su resistencia sea adecuada. También se establece, por ejemplo, que los patines de la trabe deben ser soldados directamente a tope por medio de soldaduras de penetración completa (SPC) a los patines de la columna. El alma de la viga debe estar unida a la columna o a una placa vertical de cortante soldada a ella, por medio de soldaduras capaces de resistir el 50% de la parte del momento plástico de la viga correspondiente al alma. Además, se incluye un requisito geométrico importante: el módulo de sección plástico de los patines de la viga ( $Z_x$ ) debe ser mayor que el 70% del módulo de sección plástico de la sección completa de la misma.

#### 3.2 NTC-DCEM-2004

La edición de 2004, en su Inciso 5.1.5 aborda el fenómeno de desgarramiento laminar (*Lamellar Tearing*) que se hizo evidente tras los sismos mencionados en la década de 1990, en las conexiones trabe-columna soldadas de campo. Se dan recomendaciones generales y medidas para reducir a un mínimo la posibilidad de fallas por desgarramiento laminar.

Esta falla, asociada a fracturas frágiles en placas gruesas de acero (especialmente en juntas y conexiones soldadas), ocurre cuando los esfuerzos inducidos por la soldadura o por las fuerzas aplicadas causan una separación a lo largo de la dirección de laminación de los perfiles de acero. Es más común en materiales que contienen inclusiones no metálicas o imperfecciones en su estructura interna. La fractura frágil tiende a presentarse con mayor frecuencia en las estructuras y conexiones soldadas que en las atornilladas, debido a una combinación de factores, como defectos en la aplicación de las soldaduras de demanda crítica, esfuerzos residuales elevados y la continuidad de las placas de acero, lo cual favorece la propagación de fracturas entre diferentes elementos estructurales.

Las soldaduras de penetración completa, cuando se ejecutan en placas o perfiles laminados diseñados para transmitir fuerzas en la dirección perpendicular al grueso, deben ejecutarse con cuidado especial; de lo contrario, pueden provocar desgarramiento laminar. Aunque la resistencia perpendicular al espesor del acero estructural suele ser similar a la resistencia en las direcciones longitudinal y transversal, la capacidad de deformación en esa dirección suele ser sólo ligeramente superior a la correspondiente al límite de elasticidad.

El desgarramiento laminar se presenta en placas con altas restricciones, debido a la pérdida de cohesión entre inclusiones microscópicas no metálicas y el material circundante. Esto se debe a la incapacidad del metal base de admitir las deformaciones impuestas por las contracciones de la soldadura en la dirección normal al grueso de la placa. Aunque puede presentarse en materiales de cualquier grueso, es mucho más frecuente en placas gruesas, ya que en ellas se depositan soldaduras de mayor tamaño que, al enfriarse, experimentan contracciones más significativas. La experiencia práctica profesional indica que este tipo de falla es poco común en materiales con espesores inferiores de 20 mm (3/4") a 25 mm (1"). Sin embargo, existen casos documentados en metales más delgados.

A partir del sismo de Northridge de 1994 se observaron avances en los criterios de diseño sísmico de edificios de acero y particularmente en el diseño y construcción de las conexiones trabe-columna soldadas. Actualmente, en Estados Unidos y en muchos otros países situados en zonas de

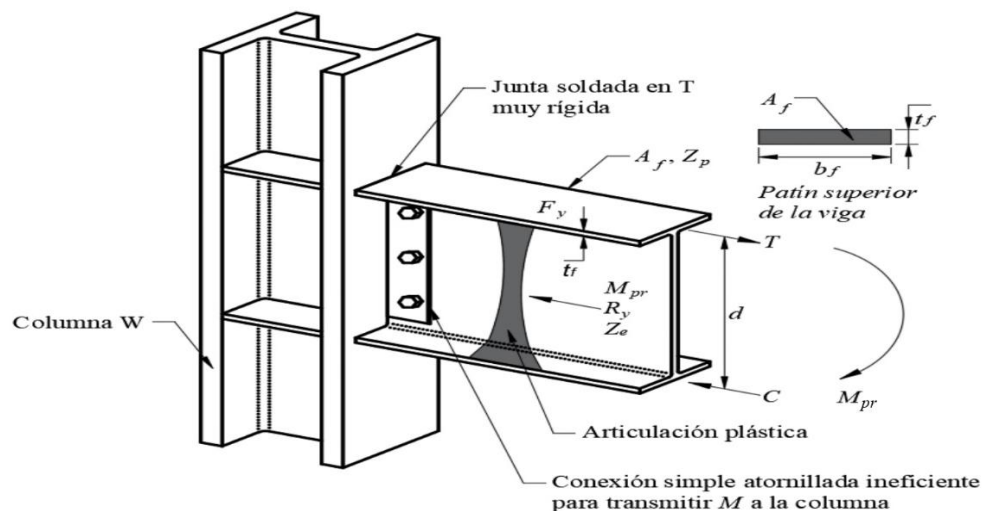
alta sismicidad, los requisitos de diseño de los sistemas estructurales en los que se pretende obtener una ductilidad alta son muy estrictos.

Entre los aspectos más relevantes incluidos en la norma se encuentra la necesidad de realizar pruebas de tenacidad en las SPC. En particular, el Inciso 5.8.2.2 'Juntas soldadas' establece lo siguiente: Si en algún entrepiso de la estructura las conexiones rígidas -de las que depende la resistencia ante fuerzas sísmicas- representan menos del 50% de las conexiones entre vigas y columnas, entonces todas las soldaduras de penetración completa en dicho entrepiso deberán realizarse utilizando un metal de aportación con una tenacidad no menor que 27.5 Joules (2.75 kg-m), medida a una temperatura de 244 K ( $-29^{\circ}\text{C}$ ), determinada por medio de un ensaye Charpy en V.

### 3.3 NTC-DCEA-2020

La norma NTC-DCEA-2020 mantiene una estructura muy similar a la de 2004 en lo referente al diseño estructural de conexiones soldadas y atornilladas de estructuras de acero. Sin embargo, esta versión desarrolla criterios relacionados con la ductilidad, el comportamiento sísmico y el diseño por capacidad.

En el Capítulo 12, titulado Estructuras Dúctiles, se definen los requisitos que deben cumplir los marcos rígidos de ductilidad media ( $Q = 3$ ) y alta ( $Q = 4$ ). Se indican las ecuaciones para determinar el momento máximo probable en la articulación plástica. Un concepto fundamental en esta sección es la filosofía de diseño de 'columna fuerte y viga débil', que permite garantizar que, durante un evento sísmico, las articulaciones plásticas (zonas de deformación inelástica) se formen en las vigas y no en las columnas, que son las que soportan el peso de toda la estructura, como se ilustra en la Figura 1.



**Figura 1.** Formación de una articulación plástica en la zona protegida de la trabe.  
Imagen propia.

Además, se recomienda que la junta se plastifique parcialmente para disminuir la demanda de ductilidad en los extremos de las trabes. Se considera también que, en la mayoría de las vigas laminadas, el endurecimiento por deformación permite que el momento plástico total se transmita a través de los patines. Dichos patines se sueldan a tope a los patines de la columna mediante soldaduras de penetración completa.

### 3.4 NTC-DCEA-2023

El contenido de la Norma Técnica Complementaria de Diseño y Construcción de Estructuras de Acero de la Ciudad de México 2023 (NTC-DCEA-2023) es muy similar al de la norma anterior, NTC-DCEA-2020. Incorpora sin embargo algunas modificaciones importantes. La más significativa es la inclusión de un conjunto de nueve conexiones rígidas trabe-columna precalificadas conforme a la Especificación AISC 358-22 (*Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, en español: Conexiones Precalificadas para Marcos a Momento de Acero Especiales e Intermedios para Aplicaciones Sísmicas) (Soto, 2025a).

Estas conexiones precalificadas, descritas en el Capítulo 11, exigen configuraciones predeterminadas para el estructurista. Si no se cumplen las limitaciones paramétricas, tamaños de perfiles en trabes y columna, tipos de conectores (tornillos o soldaduras) la unión propuesta no se considera precalificada. El uso de conexiones precalificadas pretende simplificar el proceso de diseño a los ingenieros diseñadores estructurales, sin la necesidad de desarrollar estudios experimentales o analíticos. Consecuentemente, se alcanza el momento máximo esperado, que es el momento plástico resistente,  $M_p$ , también mostrado en la Figura 1.

## 4. ANÁLISIS DE LAS CONEXIONES TRABE-COLUMNA PRECALIFICADAS SEGÚN NTC-DCEA-2023

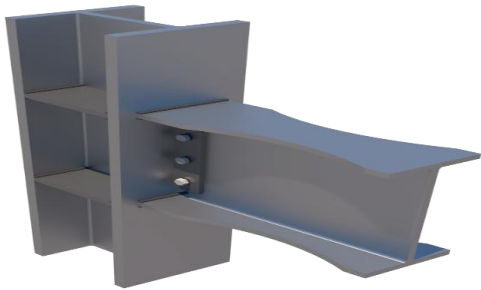
Por primera ocasión, la Norma Técnica Complementaria de Diseño y Construcción de Estructuras de Acero de la Ciudad de México (NTC-DCEA-2023) incluye, en su capítulo 11 'Conexiones', nueve uniones rígidas trabe-columna precalificadas conforme a la especificación AISC 358-22 (*Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications*, o Conexiones precalificadas para marcos a momento de acero especiales e intermedios para aplicaciones sísmicas, que se muestran en la Figura 2 (Soto, 2025a).

De las 11 conexiones precalificadas presentadas en la norma AISC 358-22, el Comité Técnico de Actualización de la NTC-DCEA-2023 excluyó siete conexiones trabe-columna, debido a su complejidad, alto costo y a las patentes que dificultan su implementación en la práctica profesional mexicana (Soto, 2025a).

Las conexiones del capítulo 11 de la NTC-DCEA-2023 son:

1. Conexión con viga de sección reducida (RBS), en el capítulo 5 de la norma AISC 358-22.
2. Conexiones de placa de extremo extendida (*end-plate*), que incluye: a) cuatro tornillos sin cartabones; b) cuatro tornillos con cartabones; c) ocho tornillos con cartabones. Estas tres conexiones se incluyen en el capítulo 6 de la norma AISC 358-22.
3. Conexión con cubreplacas atornilladas (BFP), en el capítulo 7 de la AISC 358-22.
4. Conexión con patines y alma soldada (WUF-W), en el capítulo 8 de la AISC 358-22.
5. Conexión entre vigas IR y columna hueca OR. Se incluyen tres conexiones que fueron precalificadas por medio de pruebas efectuadas en Japón y en México.

En la Figura 2 se muestran las conexiones rígidas trabe-columna de la NTC-DCEA-2023, las cuales presentan adaptaciones mínimas respecto a las especificaciones de la AISC 358-22 y anteproyecto AISC-358-27.



Conexión con viga de sección reducida



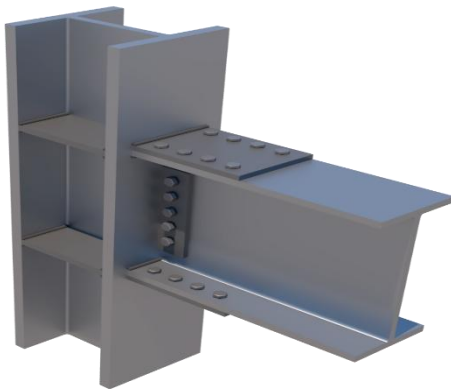
Conexión con cuatro tornillos sin cartabón 4E



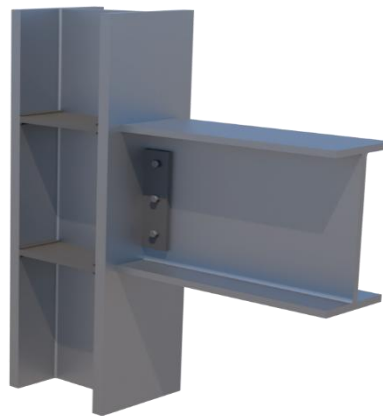
Conexión con cuatro tornillos y cartabón AES



Conexión con ocho tornillos y cartabón

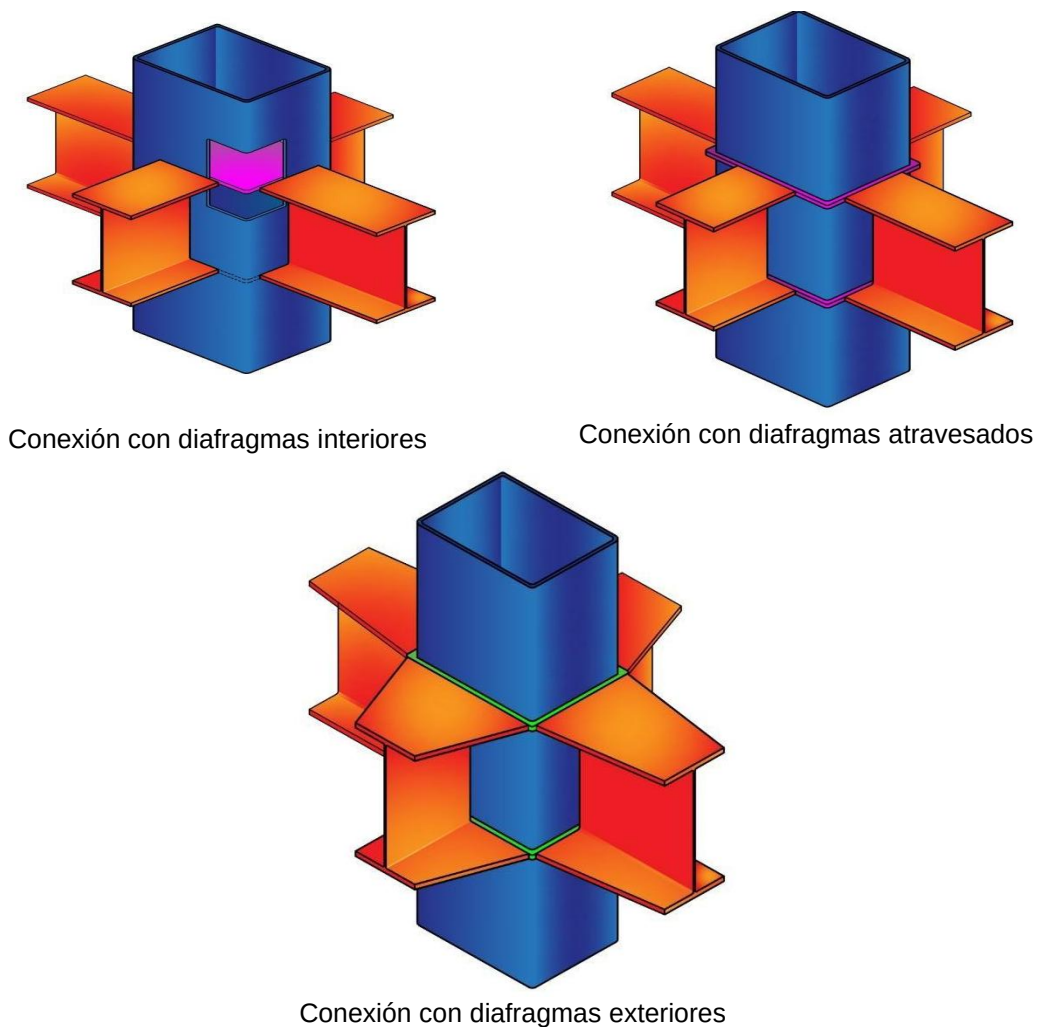


Conexión con cubreplacas atornilladas



Conexión con patines y alma soldada  
La placa de cortante es trapezoidal





**Figura 2.** Conexiones precalificadas adaptadas de la NTC-DCEA-2023.

**Tabla 1** Características adicionales y reflexiones de las conexiones trabe-columna de la NTC-DCEA-2023. Fuente: Soto Rodríguez, 2025a.

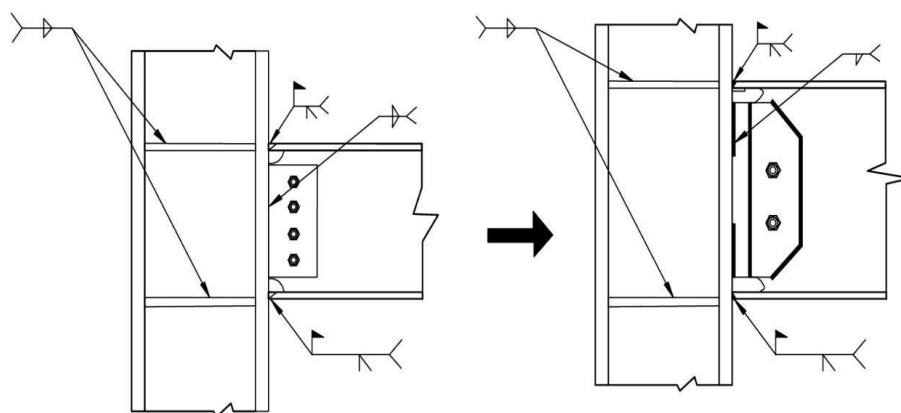
| Conexión                 | Tipos de conectores                                                                                                                                 | Facilidad de fabricación o de montaje                                                                                         | Elementos de refuerzo | Placa de cortante/Agujeros de acceso para soldar                                  |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Viga de sección reducida | Soldaduras de demanda crítica en patines de vigas contra patines de columnas y tornillos ASTM en la placa de cortante para unir el alma de la viga. | Conexión directa, junta soldada en Te, sencilla, excepto que se requiere recortar los patines de la viga con equipo especial. | Carece.               | Vertical, simple atornillada al alma de la viga y soldada al patín de la columna. |
| Conexión de placa        | Totalmente atornillada en campo.                                                                                                                    | Requiere mayor trabajo en taller                                                                                              | Cartabones en dos     | No requiere placa de cortante; la placa                                           |

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| de extremo extendida                  | <p>Estas conexiones han funcionado muy bien en México.</p> <p>Las pruebas experimentales realizadas por el Dr. Tiziano Perea Olvera y el Ing. Fernando González Roser en el CENAPRED demostraron un excelente comportamiento cíclico de estas conexiones.</p>                                                                                                                                        | que se compensa con creces en el montaje por su rapidez de construcción (criterio japonés).                                                                                                                                                                                                                                             | conexiones de este tipo: 4ES y 8ES.                                                                                                                                 | extrema transmite la fuerza cortante. Tampoco necesita agujeros de acceso para soldar. Las pruebas experimentales desarrolladas por el Dr. Thomas Murray demostraron concentraciones de esfuerzos elevados en un espécimen de prueba que tenía agujeros de acceso para soldar. |
| Conexión con cubreplacas atornilladas | <p>Soldaduras de demanda crítica en los extremos de las cubreplacas y patines de la columna.</p> <p>Debe ser biselado el extremo de las cubreplacas en taller.</p> <p>Debe tenerse cuidado con las tolerancias de laminación de las vigas conforme a la norma NMX-B-252 (ASTM A6, ya que estos perfiles podrían estar descalibrados).</p> <p>No es una conexión sencilla, práctica ni económica.</p> | <p>Requiere mayor trabajo de fabricación con relación a las conexiones de sección de viga reducida y la de patines y alma soldados.</p> <p>Se recomienda colocar lianas (cuñas) en los patines inferior y superior de la trabe en campo, para que las cubreplacas se suelden en taller y así reducir el tiempo de montaje en campo.</p> | Requiere elementos de conexión para transmitir el momento flexionante mediante un par de fuerzas que se transmiten por las cubreplacas a los patines de la columna. | Vertical, simple, atornillada al alma de la viga con tornillos de alta resistencia ASTM A325 (NMX-H-124) y soldada al patín de la columna.                                                                                                                                     |
| Conexión con patines y alma soldada   | Soldaduras de demanda crítica en los patines de las trabes y los patines de la columna.                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Conexión directa, junta soldada en Te, sencilla.                                                                                                                                                                                                                                                                                        | No tiene.                                                                                                                                                           | La placa de cortante es de montaje y consta de tres tornillos de alta resistencia ASTM A325 (NMX-H-124). Es de respaldo y se suelda en campo al alma de la viga con soldaduras de filete y al patín de la columna con soldadura de penetración completa.                       |

Las características generales de las primeras seis conexiones se detallan en la Tabla 1.

Las tres últimas conexiones rígidas trabe columna entre columnas OR (HSS) y vigas laminadas IR de la Figura 2 están basadas en las prácticas de diseño y construcción en Japón y fueron precalificadas en México a partir de los resultados de investigación del Dr. Tiziano Perea Olvera y el Dr. Hiram de la Cruz, de la Universidad Autónoma Metropolitana, campus Azcapotzalco.

Se considera que la conexión trabe-columna con patines y alma soldada es una mejora a las prácticas previas a 1994 que tiene las siguientes ventajas, como se ilustra en la Figura 3. 1) Modificación total de la geometría de los agujeros de acceso para depositar las soldaduras de demanda crítica entre los patines de la viga y el de la columna. 2) Cambio de la geometría de la placa de cortante rectangular por una trapezoidal soldada al alma de la viga en campo.



**Figura 3.** Evolución de la conexión trabe-columna pre-Northridge, 1994. Imagen propia.

En la Figura 4 se presenta la conexión rígida trabe-columna totalmente soldada en campo, adaptada de la conexión pre-Northridge de la Figura 3 y comúnmente utilizada en la práctica profesional de diseño y construcción de estructuras de acero en México posterior al sismo del 2017 de la Ciudad de México.



**Figura 4.** Conexiones trabe-columna soldadas de uso común en México. Imagen propia.

Las características de las conexiones trabe columna precalificadas se describen a continuación, mientras que se presentan detalles adicionales en la Tabla 1 (Soto Rodríguez, 2025a):

1. Todas las conexiones trabe-columna de la Figura 2 se clasifican como rígidas (totalmente restringidas) o a momento.
2. Las conexiones de la Figura 2 fueron ensayadas en varios laboratorios de estructuras grandes en universidades de Estados Unidos, evaluando el comportamiento por el eje fuerte de las columnas W (IR en México), es decir, por los patines.
3. Durante las pruebas experimentales, no se tomó en cuenta la contribución de la losa compuesta de concreto reforzado y acero.
4. Las columnas que reciben las trabes pueden ser de secciones laminadas H, trabes fabricadas con tres placas soldadas IS; secciones en cruz IC; secciones en cajón con dos almas o secciones laminadas HR (IR en cajón con almas múltiples).
5. En México y Japón se ha preferido tradicionalmente el uso de la columna de sección en cajón, cuadradas o rectangulares, aunque las secciones laminadas H (IR) o IS ofrezcan mayores ventajas al facilitar las conexiones debido a que están totalmente abiertas.
6. Se aprecia que la conexión WUF-W se adapta fácilmente para que la columna reciba las trabes también por su eje débil por medio de los atiesadores horizontales o placas de continuidad.
7. Se requiere que todas las conexiones cuenten con atiesadores horizontales (placas de continuidad) en el alma de la columna para formar la zona del panel, lo que resiste fuerzas cortantes elevadas.
8. Las conexiones 3 y 4 de la Figura 2 se han usado en el contexto de la práctica profesional en México desde hace muchos años. En la quinta conexión con cubreplacas atornilladas, la placa de cortante es rectangular a diferencia de la conexión de patines y alma soldados (WUF-W, AISC-358-22), que tiene una sección variable trapezoidal.
9. Los nueve tipos de conexiones de la Figura 2 se pueden utilizar en sistemas estructurales de ductilidad media ( $Q = 3$ ) y ductilidad alta ( $Q = 4$ ). Sin embargo, en la práctica real, en algunos casos especiales resulta difícil que los sistemas estructurales desarrollen la ductilidad esperada debido, principalmente, a problemas relacionados con diseños incorrectos, fabricación imprecisa, montaje desordenado y falta de supervisión técnica estricta y oportuna en campo.
10. En cada tipo de conexión rígida trabe columna precalificada deberán revisarse los modos de falla pertinentes asociados con los estados límite correspondientes que indica la norma NTC-DCEA-2023. Por ejemplo: en la trabe: la resistencia en flexión y al cortante, la resistencia de las soldaduras de demanda crítica o de filete en caso de que se propongan en el diseño estructural de la conexión; en los tornillos de alta resistencia ASTM A325 o A490 debe verificarse la resistencia al cortante simple o doble, el aplastamiento de éstos y, en las placas de conexión horizontales a momento atornilladas a los patines de la viga, en las placas extremas extendidas de las conexiones atornilladas en campo y en las placas de cortante simple, debe revisarse la fluencia por cortante, fractura por cortante, la ruptura en bloque de cortante y tensión, etc.
11. En todas las conexiones deberá cumplirse el requisito de columnas fuertes y vigas débiles (ver el Inciso 11.9.9.3.5 del capítulo 11 CONEXIONES de la norma NTC-DCEA-2020 para una explicación más detallada).
12. No todas las conexiones precalificadas de Estados Unidos, y países de Europa y Asia se consideran convenientes para la práctica de diseño y construcción de América Latina.

Se observa que la conexión sencilla, patines y alma soldados de fácil diseño, es de uso común en nuestro medio actualmente. Las SPC depositadas en patines de trabe contra patín de columna (junta soldada en T), no se diseñan de manera específica, ya que son más resistentes que el metal base. Estas soldaduras se denominan soldaduras de demanda crítica (SDC).

Se detectó que las conexiones de vigas de sección reducida RBS, también conocidas como conexiones tipo "dogbone", surgieron como respuesta a los problemas observados en el diseño de conexiones rígidas después del terremoto de Northridge de 1994. Este concepto fue desarrollado por investigadores y diseñadores en la década de 1990 para mejorar el desempeño sísmico de las conexiones trabe-columna en edificios de acero estructural. No obstante, existe evidencia de que la idea de esta conexión fue propuesta originalmente por el físico francés Robert Plumier (Soto Rodríguez, 2024a).

Plumier demostró que al reducir intencionadamente el área de la sección transversal de los patines de la viga cerca de la conexión con la columna, era posible controlar dónde ocurriría la articulación plástica durante un sismo intenso.

Esto permitiría que el daño se concentrara en la zona recortada de la viga, en lugar de en la conexión soldada, mejorando así el comportamiento sísmico del sistema estructural a base de marcos rígidos. Su concepto se convirtió en una solución clave para mejorar el performance sísmico de las estructuras de acero y, años más tarde, fue adoptado en numerosas normas de diseño sísmico a nivel mundial.

En agosto de 1999, Moore, James O. Malley y Michael D. Engelhardt publicaron en Steel Tips, del American Institute of Steel Construction (AISC), los resultados de las pruebas experimentales de laboratorio y el procedimiento de diseño.

Aplicando el concepto de Plumier, la innovación consistió en recortar intencionalmente los patines superior e inferior de la trabe para que la plastificación ocurriera en una zona protegida, fuera de la conexión trabe-columna, mejorando la resistencia, ductilidad y la capacidad de disipación de energía de la estructura (Soto Rodríguez, 2024a).

Si bien, la conexión ha sido ampliamente utilizada en Estados Unidos, no ha sido así en América Latina, ya que el maquinado de los patines de las trabes encarece la conexión. El autor propone realizar un estudio de costo de esta conexión precalificada de la norma NTC-DCEA-2023 para determinar su conveniencia en la práctica profesional de América Latina.

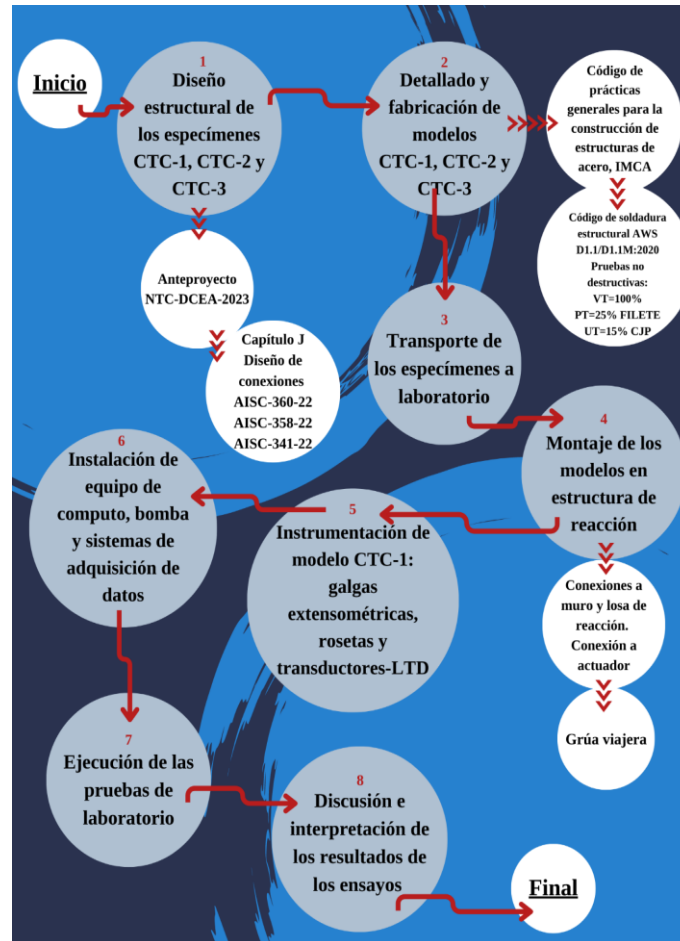
Es evidente que los requisitos del Capítulo 11 sobre conexiones de la NTC-DCEA-2023 obligan al estructurista a proponer una configuración predeterminada. Si no se cumplen las limitaciones paramétricas la unión propuesta no se considera precalificada. El uso de conexiones precalificadas pretende simplificar el proceso de diseño a los ingenieros estructuristas, sin necesidad de desarrollar estudios experimentales (Soto, 2025a).

Como Soto menciona en ese mismo artículo, las principales diferencias de las prácticas profesionales de diseño y construcción de edificios de acero de Estados Unidos y los países de América Latina anteriores y posteriores a los sismos mencionados de Northridge y Kobe son las siguientes: condiciones locales (tipo de sismos diferentes, tipos de suelo que amplifican la respuesta de los suelos y de las estructuras de edificios) disponibilidad comercial de perfiles estructurales laminados, usos de sistemas estructurales de ductilidad media y alta, preferencia de los tipos de conexiones trabe-columna (uniones soldadas versus atornilladas), mano de obra disponible especializada, talleres certificados de fabricación de estructuras metálicas, normas de diseño de estructuras de acero actualizadas, por mencionar las principales), como se muestra en la Figura 5 (2025a).



**Figura 5.** Conexión trabe-columna con cubreplacas atornilladas. Inconveniente para la práctica profesional mexicana. Imagen cortesía: Dr. Michael D. Engelhardt.

Actualmente se recomienda que el diseño de nuevas conexiones rígidas trabe-columna esté respaldado por medio de ensayos con especímenes sometidos a cargas laterales cíclicas reversibles, cuya metodología se ilustra en la Figura 6 (Soto Rodríguez, 2021, Vol. 1).



**Figura 6.** Metodología para la ejecución de pruebas experimentales. Imagen propia.

También se pueden usar simulaciones numéricas con programas de computadora especializados basados en elementos finitos (ANSYS 2021 R-2, ABAQUS, IdeaStatica, Robot, etc.) para corroborar la respuesta experimental de las conexiones trabe-columna ensayadas en un laboratorio de estructuras grandes (Soto, 2025a).

Los sismos pasados Northridge, 1994 y Kobe, 1995 revelaron la complejidad de varios problemas relacionados con las conexiones rígidas trabe-columna soldadas en campo de edificios de acero. De ahí que en las juntas soldadas se requiere atención especial en la concepción, diseño, modelado, detallado y fabricación de las conexiones trabe-columna soldadas. Particularmente, se debe tener cuidado en los siguientes aspectos (Soto Rodríguez, 2024a):

1. La metalurgia del acero estructural
2. La tecnología de la soldadura
3. La mecánica de la fractura frágil
4. El comportamiento sísmico de las conexiones soldadas trabe-columna
5. El desempeño sísmico del sistema estructural
6. Las prácticas relacionadas con el diseño estructural, la fabricación, y la inspección de las juntas soldadas de conexiones trabe-columna.

En este artículo se han revisado los cambios y aspectos más relevantes en la evolución de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero de la Ciudad de México. Esta revisión abarca las ediciones de 1987, 2004 y 2020, hasta llegar a la más reciente, la NTC-DCEA-2023, con especial énfasis en el diseño estructural y el comportamiento sísmico de las conexiones trabe-columna soldadas.

Para entrar en contexto con la norma indicada, es necesario recordar que las articulaciones plásticas son zonas particulares de una estructura de acero en las que las secciones transversales de una trabe o viga desarrollan sus resistencias máximas (momento plástico resistente,  $M_{pr}$ ), se plastifican totalmente y admiten rotaciones plásticas importantes ilimitadas, bajo el momento constante plástico indicado (Soto Rodríguez, 2025b).

Después, preferentemente en la trabe o en la viga ocurre una redistribución de momentos que precede la falla estructural y que requiere que las articulaciones tengan capacidad de rotación adecuada.

Admitidas todas las hipótesis de la teoría plástica simple, la única forma posible de falla de una viga o de un sistema estructural de alta ductilidad, es la correspondiente a la formación de un número suficiente para que la estructura en conjunto, o una parte de ésta, se convierta en un mecanismo de falla, ya que se ha descartado la posibilidad de una falla por inestabilidad de cualquier modo (pandeo local de patines o del alma, pandeo lateral por flexotorsión de las trabes o fracturas frágiles de las soldaduras de demanda crítica o de filete) (Soto, 2025b).

Consecuentemente, en el diseño plástico y diseño por capacidad de estructuras de acero, es importante que desarrollen su resistencia última, caracterizada por un comportamiento inelástico ante demandas sísmicas intensas, asociado a la formación de articulaciones plásticas en zonas protegidas de las trabes (partes del sistema estructural que resisten las acciones sísmicas esperadas durante temblores intensos).

Si bien, las articulaciones plásticas también pueden desarrollarse en las columnas de los marcos rígidos dúctiles, Soto (2025b) asegura que no es conveniente que esto ocurra, ya que puede ocasionar mecanismos de entrepiso con pocas articulaciones y escasa disipación de energía. Por lo tanto, la norma NTC-DCEA-2023 recomienda que las columnas sean más resistentes que las trabes adyacentes, asegurando que la deformación inelástica se concentre en las vigas, que tienen fuerzas axiales mínimas, y que evitan la falla crítica de las columnas, que soportan el peso total del edificio.

En este sentido, si la estructura tiene un grado de hiperestaticidad elevado y el número de articulaciones plásticas asociadas con el mecanismo de colapso es considerable, la energía disipada mediante la formación y rotación de dichas articulaciones es muy importante. En consecuencia, la demanda de capacidad de absorción de energía en regiones elásticas se reduce notablemente.

Aunado a esto, las deformaciones inelásticas en marcos rígidos (resistentes a momento) se obtienen mediante la formación de articulaciones plásticas por flexión excesiva en zonas protegidas de las trabes. Estas articulaciones también pueden desarrollarse en la zona del panel de la columna, que es el tablero formado con los patines de la columna y las placas de continuidad (atiesadores horizontales en la columna).

En el diseño por capacidad, se seleccionan las zonas donde es más conveniente que se formen las articulaciones plásticas, y la estructura se diseña de manera que se desarrollen efectivamente en dichas partes (zonas protegidas).

Cuando aparece un número suficiente de articulaciones plásticas en un marco rígido, la estructura se convierte en un mecanismo que se deforma lateralmente. Este comportamiento implica una significativa disipación de energía (principalmente si el número de miembros involucrados en el mecanismo es grande), así como daños locales importantes en las articulaciones plásticas.

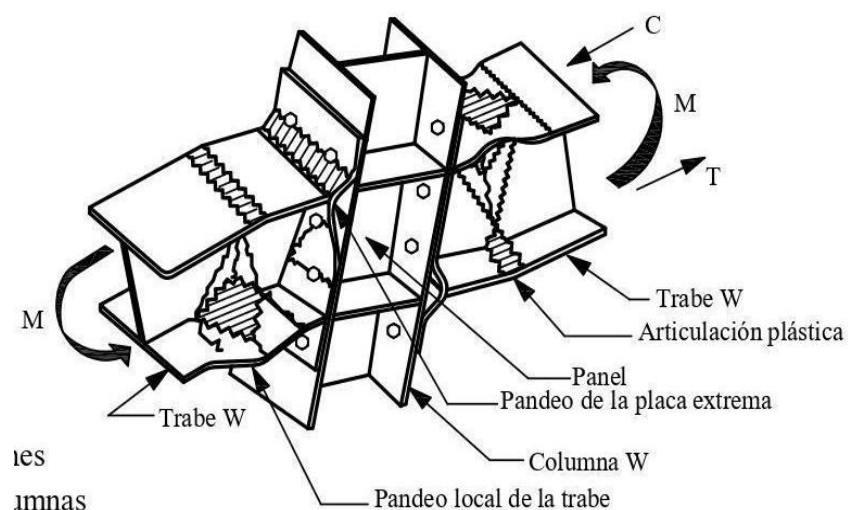
No es conveniente que estas articulaciones se desarrollen en las columnas, pues podrían generarse mecanismos en los que participen pocos miembros estructurales (denominados mecanismos de entrepiso) con poca disipación de energía. Tales mecanismos ocasionan daños locales en miembros estructurales que son críticos para resistir las cargas gravitacionales o verticales (Soto Rodríguez, 2025b).

Añade Soto que es deseable evitar todas aquellas condiciones que propicien un comportamiento no dúctil de las conexiones trabe-columna, como los daños y fallas prematuras de carácter frágil, o la inestabilidad de los elementos de conexión y de los miembros que las conforman.

Cuando las deformaciones se concentran en los extremos de las vigas, como se muestra en la Figura 7, en la cara de las columnas, se producen demandas de deformación inelástica en las soldaduras de penetración completa (SPC) y en las zonas afectadas por el calor HAZ (Heat Affected Zone, en inglés) que las rodean, lo que puede ocasionar fallas de tipo frágil.

Para que las soldaduras de demanda crítica funcionen correctamente se requiere el uso de metal de aportación con propiedades particulares y condiciones especiales de colocación e inspección.





**Figura 7.** Deformaciones inelásticas de una conexión trabe-columna soldada en campo. Imagen del Dr. Reidar Bjorhovde (q.e.p.d.), Universidad de Pittsburgh, Pennsylvania.

Para lograr un comportamiento más confiable, se recomienda diseñar la conexión de manera que la acción inelástica (articulación plástica por flexión excesiva) ocurra a una distancia suficiente de la cara de la columna. Ésta no debe ser menor a la mitad del peralte de la trabe.

Las articulaciones plásticas en los extremos de las trabes generan grandes demandas de deformación a través del grueso del patín de la columna, en el metal de soldadura y en las zonas afectadas por el calor, lo que puede derivar una falla frágil de la conexión (Soto Rodríguez, 2024a).

Por ejemplo, en una zona de una estructura que estuviese sujeta a un estado triaxial de esfuerzos, con los tres esfuerzos principales de magnitudes iguales, no puede presentarse una falla dúctil, pues los esfuerzos cortantes son nulos en todas las direcciones.

Bajo una mentoría con el Maestro Óscar De Buen (q.e.p.d.), se observa que en una estructura de acero real los esfuerzos principales nunca son iguales. No obstante, la contracción irregular y restringida de las soldaduras de penetración completa (SPC), que se depositan entre los patines de la viga y de la columna, y del material base adyacente, durante el enfriamiento desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente, produce esfuerzos residuales de tensión. A lo largo del eje de la soldadura, pueden ser mayores que el límite de fluencia del material, y que son también elevados en las dos direcciones ortogonales. La superposición con los esfuerzos ocasionados por las demandas sísmicas intensas origina estados triaxiales, para los que disminuye drásticamente la relación esfuerzo cortante/esfuerzo axial, que tienden a promover fallas de tipo frágil.

Lo anterior se agrava por las concentraciones de esfuerzos producidas por las discontinuidades en el material, ocasionadas, por ejemplo, por defectos de las soldaduras o por el proceso de laminado, así como por cambios en la dirección en que se transmiten las fuerzas interiores.

La combinación de los efectos indicados puede hacer que sea imposible construir conexiones con los patines de las vigas soldados a tope contra los de las columnas para que no fallen de manera frágil bajo las demandas intensas e instantáneas de un sismo.

Para ello, se recomienda que las conexiones trabe-columna se refuercen con cubreplacas atornilladas adosadas a los patines de la trabe, cartelas o placas laterales, y que todos los miembros del marco sean diseñados para resistir las solicitaciones generadas por la formación de articulaciones plásticas, incluyendo el efecto del endurecimiento por deformación.

La norma NTC-DCEA-2023 establece claramente cuáles son las zonas protegidas de una estructura (vigas, columnas, diagonales de contraventeo y armaduras). Por ejemplo, los extremos de trabes sujetas a deformaciones inelásticas que deben cumplir con varios requisitos específicos.

Estas zonas son específicamente las partes de la estructura que resisten las acciones sísmicas intensas, por lo que se espera que se comporten inelásticamente durante sismos moderados y fuertes.

En particular, los patines superiores de las trabes no deben utilizarse para colocar piezas de apoyo para unir elementos no estructurales. Tampoco se permite colocar pernos conectores de cortantes soldados con cabeza, ni elementos de la lámina acanalada de piso unidos por medio de soldaduras. Asimismo, se prohíben las discontinuidades provocadas por cambios bruscos de sección de las trabes, perforaciones, cortes realizados con arco aire o soplete. También se prohíbe hacer empalmes atornillados o soldados en las zonas protegidas de las vigas.

La filosofía del diseño por capacidad de estructuras dúctiles consiste en que tanto el sistema estructural como sus conexiones sean capaces de concentrar el comportamiento inelástico durante sismos fuertes en las zonas críticas de la estructura (zonas protegidas de las vigas), y que sean capaces de disipar energía de una manera estable. Para ello, se seleccionan ciertos miembros del sistema estructural que resisten las fuerzas horizontales, y se diseñan y detallan para que disipen energía bajo severas deformaciones impuestas al sistema. En las regiones críticas de los miembros seleccionados, se concentra la respuesta inelástica y el resto de la estructura se protege contra las acciones sísmicas que podrían ocasionar su falla, proporcionando una resistencia mayor que la correspondiente al desarrollo de la resistencia máxima posible de las articulaciones plásticas potenciales (Soto, 2025b).

Al respecto, la norma NTC-DCEA-2023 recomienda que el diseño de las estructuras de acero se efectúe de manera que las columnas sean más resistentes que las trabes adyacentes, pues la capacidad de deformación inelástica es mayor en las vigas, que tienen fuerzas axiales mínimas y, además, la falla de una columna es más crítica que la de una viga, debido a que resisten el peso total del edificio (Soto Rodríguez, 2024a).

Este método de diseño se ha incorporado en la mayoría de las normas y códigos de diseño internacionales de edificios de acero.

El procedimiento para calificar una conexión trabe-columna se basa estrictamente en las siguientes condiciones de la NTC-DCEA-2023:

1. La conexión trabe-columna debe admitir un ángulo de distorsión de entrepiso igual a 0.04 radianes. Este valor se exige para marcos rígidos con ductilidad elevada.
2. La resistencia a flexión de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser igual o mayor que el 80% del momento plástico de la trabe cuando la distorsión del entrepiso es de 0.04 radianes.

Las conexiones trabe-columna precalificadas son altamente confiables, ya que han demostrado a través de un programa extenso de ensayos de laboratorio, que pueden absorber una cantidad determinada de energía en cada ciclo para un desplazamiento prescrito. Esto se observa en la estabilidad de los lazos histeréticos de carga-rotación y carga-desplazamiento lateral (Soto, 2025a).

Cuando las conexiones trabe-columna están bien diseñadas y fabricadas, son capaces de resistir cargas cíclicas severas (demandas sísmicas intensas). Su capacidad intrínseca de absorción de energía es elevada, y pueden resistir en condiciones adecuadas de seguridad un número de ciclos de carga aparentemente mayor que el que puede esperarse durante la vida de las estructuras reales (Soto, 2025a).

Para ese nivel, es imprescindible contar con una mano de obra calificada y con una supervisión cuidadosa durante y después del proceso de fabricación de las conexiones. Estos requisitos son de vital importancia; su incumplimiento puede ocasionar fallas de tipo frágil en las conexiones trabe-columna con soldaduras defectuosas, como lo ocurrido en Northridge y Kobe.

Otro tema de gran importancia es la revisión de la zona de panel de la columna. Según Bertero et al. (1972), las fuerzas cortantes en esta zona pueden ocasionar efectos locales debido a la distorsión del tablero del alma de la columna. Las pruebas de laboratorio realizadas hace varios años constataron claramente estos modos de falla.

De acuerdo con el que escribe, los factores principales que pueden ocasionar la falla estructural en los edificios de acero como consecuencia de sismos intensos son: fallas prematuras de tipo frágil; por fractura de las soldaduras de demanda crítica; pandeo local de patines o de almas de traveses o columnas por relaciones ancho-grueso mayores que las admisibles; demandas excesivas de ductilidad en secciones transversales o en miembros estructurales críticos; conexiones trabe-columna y otros detalles mal realizados que propicien las fallas frágiles (tales como aceros con alto contenido de carbono, velocidad de aplicación de las cargas, estructuras de acero sujetas a bajas o altas temperaturas, estados triaxiales de esfuerzos, desgarramiento laminar); efectos de segundo orden,  $P-\Delta$  y  $P-\delta$ ; procedimientos de construcción con supervisión insuficiente, etc.).

En lo que se refiere al refuerzo del alma de la columna en la zona del panel, el Inciso 11.8.7.2 de la norma NTC-DCEA-2023 recomienda el uso de placas adosadas a uno y otro lado del alma, o atiesadores diagonales.

Las placas adosadas al alma y, particularmente las soldaduras depositadas (por ejemplo, de tapón), pueden producir efectos desfavorables. Por lo tanto, se recomienda que, siempre que sea posible, se utilicen columnas de dimensiones suficientes que no requieran la colocación de estas placas.

Existen evidencias de que la fluencia del alma de la columna puede aumentar la resistencia de la conexión trabe-columna para admitir rotaciones plásticas.

No obstante, también existe preocupación de que, si la deformación por cortante es excesiva, se forman quiebres en el patín de la columna, frente a los de la trabe. Esto sugiere que podría ser más conveniente diseñar el alma de la columna en la zona del panel de una manera más conservadora que como se ha hecho hasta ahora.

## 5. CONCLUSIONES

Como conclusión, el comportamiento sísmico de los edificios de acero durante los sismos recientes en México ha sido satisfactorio. Se afirma que las estructuras de acero tienen un futuro prometedor en nuestro país, particularmente en edificios altos o rascacielos de la Ciudad de México.

No obstante, es necesario abrir nuevas líneas de investigación en temas específicos de este tipo de estructuras, ya que, hasta el momento, la investigación experimental en México ha sido incipiente.

Los requisitos de las conexiones calificadas NTC-DCEA-2023 obligan al estructurista a proponer una configuración predeterminada. De no cumplir con los requisitos dimensionales, las limitaciones de peso, los claros de las vigas y columnas, así como el detallado específico de las juntas soldadas y atornilladas, la unión propuesta no se considera precalificada.

Dada la importancia y el costo de los estudios experimentales sobre el comportamiento de las conexiones, se recomienda que las empresas del sector de la construcción de estructuras de acero en México participen activamente en investigaciones y ensayos para innovar conexiones eficientes y resilientes para los edificios que se construirán en el futuro inmediato en zonas de alta sismicidad de la Ciudad de México (zona del lago y de transición).

El presente artículo se basa en el Anexo B: Conexiones Precalificadas de la NTC-DCEA-2023 del proyecto de investigación del autor, denominado Metodología para la evaluación del comportamiento sísmico de conexiones trabe-columna de acero estructural en zonas de alta sismicidad.

## **6. REFLEXIONES Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS**

Con el fin de impulsar la teoría de la resiliencia sísmica de los edificios de acero situados en zonas de alta sismicidad en los países de América Latina, proteger la vida humana, el contenido material de las edificaciones, reducir el costo de reparación de las estructuras dañadas por sismos intensos y permitir una recuperación inmediata y continua de los edificios tras la ocurrencia de sismos intensos futuros, se considera necesario diseñar y construir edificaciones con sistemas estructurales que admitan deformaciones inelásticas significativas, que conduzcan a la formación y rotación de las articulaciones plásticas, y a la distribución de momentos flexionantes, permitiendo a la estructura resistir cargas mayores que las predichas por un análisis elástico convencional.

En zonas de alta sismicidad donde los edificios son vulnerables a los sismos intensos, la teoría de la resiliencia estructural ha desempeñado una función muy importante al incorporar alternativas para mejorar la respuesta sísmica de los edificios de acero, tales como el aislamiento sísmico, los amortiguadores de masa, sistemas con amortiguamiento suplementario viscoelástico y el uso de contraventeos restringidos contra el pandeo de ductilidad elevada. Estas tecnologías le permiten a las estructuras de acero disipar la energía sísmica de manera controlada durante la ocurrencia de temblores intensos.

Conviene diseñar edificios de acero con un alto grado de hiperestaticidad (alta redundancia) a diferencia de la práctica profesional de Estados Unidos, ya que el número de articulaciones plásticas asociadas con el mecanismo de colapso es grande, la cantidad de energía disipada al formarse y girar dichas articulaciones es considerable.

Finalmente, cabe mencionar que las conexiones rígidas trabe-columna de acero estructural deben ser sencillas, fáciles de fabricar (principio de la constructibilidad), eficientes y económicas, conforme a la realidad y condiciones locales de la práctica de diseño y construcción de los países de América Latina.

## **7. AGRADECIMIENTOS**

Dr. Michael D. Engelhardt, Profesor Emérito de la Universidad de Texas en Austin; Maestro Jesús Iglesias Jiménez, Dos veces Premio Nacional por el CICM, Dr. Ulises Mena Hernández, investigador del INEEL; Ing. Arnaldo Gutiérrez Rodríguez, exprofesor de la Universidad Central de Venezuela.

A la memoria del Maestro Óscar de Buen López de Heredia (q.e.p.d.).

## 8. REFERENCIAS

Bertero, V. V., Popov, E. P., & Krawinkler, H. (1972). Beam-Column Subassemblages Under Repeated Loading. *Journal of the Structural Division*, 98(5), 1137–1159. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0003229>

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, México, D.F. diciembre de 1987.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, México, D.F. diciembre de 2004.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, México, D.F. diciembre de 2017.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, México, D.F. diciembre de 2020.

Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, México, D.F. noviembre de 2023.

Soto Rodríguez, H. (2021). *Diseño práctico de conexiones de acero estructural conforme a la especificación ANSI/AISC 360/16* (Vols. 1-2). Centro Regional de Desarrollo en Ingeniería Civil.

Soto Rodríguez, H. (2023, 16 de octubre). Innovaciones mundiales de conexiones trabe-columna de acero estructural para países de alta sismicidad [Conferencia]. *El conocimiento no se detiene*, Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador.

Soto Rodríguez, H. (2024a). *Comportamiento sísmico de conexiones trabe-columna de acero estructural: A más de 39 años de los macrosismos de la CDMX de 1985*. [Conferencia]. Colegio de Ingenieros Civiles de Chiapas.

Soto Rodríguez, H. (2024b, 21 de octubre). Causas de daños en edificios de acero [Conferencia]. *El conocimiento no se detiene*, Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador.

Soto Rodríguez, H. (2025a, enero). Conexiones trabe-columna precalificadas, Capítulo 11 NTC-DCEA-2023. *Artículos Selectos de Estructuras*, 1, 5-24. Centro Regional de Desarrollo en Ingeniería Civil.

Soto Rodríguez, H. (2025b). *Presentaciones del curso Diseño de Conexiones de Acero, Maestría en Ingeniería de Estructuras*. Universidad La Salle Bajío.