



# Sismos en el mundo y evolución del diseño con acero



Proporcionada por el autor

## Reforzar las conexiones trabe-columna de un edificio de acero dañadas severamente por sismos de magnitud moderada es corregir, tarde y a mayor costo, lo que debió hacerse antes y durante cada una de las etapas de diseño, fabricación, ejecución y supervisión de dichas uniones.

**HÉCTOR SOTO RODRÍGUEZ**  
Director general del Centro Regional  
de Desarrollo en Ingeniería Civil.

Los sismos son fenómenos naturales geológicos que causan gran destrucción en intervalos de tiempo muy cortos y en zonas muy extensas. Un 20% de las grandes metrópolis del mundo están ubicadas en zonas de alta sismicidad; el riesgo sísmico en Centroamérica, y en general en América Latina, es elevado. Dos terceras partes de nuestro país se localizan en zonas de riesgo sísmico importante, particularmente la Ciudad de México, que es una metrópoli propensa a sismos que pueden alcanzar magnitudes significativas en la escala de Richter.

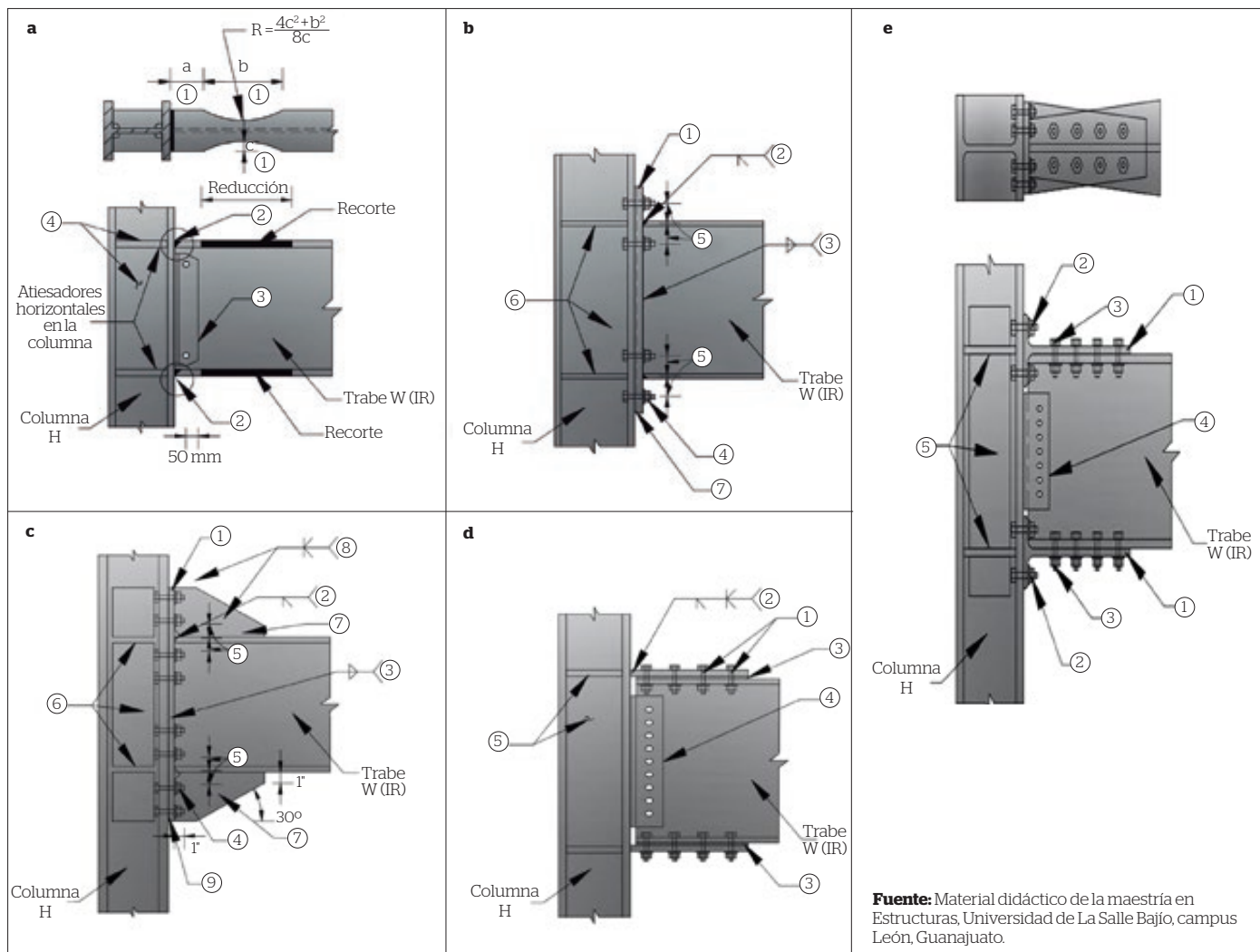
Los temblores de septiembre de 1985 de la Ciudad de México son considerados todavía como una de las más grandes catástrofes del siglo pasado; aquí existen alrededor de 60 edificios altamente vulnerables, en su mayoría de concreto reforzado y de mampostería, catalogados de alto riesgo.

La aceleración del suelo y la intensidad de los sismos son los parámetros de ma-

yor interés para el diseño estructural de los edificios que se construyen en zonas de alta sismicidad. Las propiedades de una estructura de acero que definen su respuesta sísmica son: resistencia, rigidez, ductilidad, redundancia, absorción de energía y amortiguamiento. Existen otras propiedades en edificios de acero que son de suma importancia para evitar la falla frágil y por ende garantizar la seguridad sísmica; se trata de la soldabilidad y la tenacidad, en el caso de que las conexiones trabe-columna de un edificio sean soldadas.

Construir edificios de acero altos o excesivamente irregulares en sitios de riesgo potencial elevado, como la zona de suelo blando de la Ciudad de México, amerita diseños absolutamente seguros, con una concepción estructural ventajosa contra sismos moderados y fuertes y un costo elevado para los inversionistas. El diseño estructural debe ser racional y consistente con las características arquitectónicas del edificio; la responsabilidad del proyectista estructural es muy grande.

Las causas de los daños más importantes a las conexiones soldadas-trabe columna en edificios de acero por temblores moderados se atribuyen a los siguientes puntos específicos:



**FIGURA 1.** Algunas conexiones precalificadas después del sismo de Northridge, California, de 1994.

1. Claro descuido en la ejecución de las soldaduras de penetración completa de conexiones trabe-columna, principalmente del patín inferior de las vigas; este hecho trae como consecuencia soldaduras de baja calidad y con varias deficiencias.
2. Inspección de campo deficiente en el proceso de las soldaduras de penetración completa de uniones trabe-columna.
3. Baja tenacidad (ensayo de Charpy en V) en metal de aportación de soldaduras de penetración completa en juntas soldadas, depositadas en los patines de las

trabes contra el de las columnas, lo cual produce numerosas fallas frágiles.

Aunque en la Ciudad de México no ha habido daños similares a los detectados luego de los sismos de Northridge, California (1994); Kobe, Japón (1995), y Nueva Zelanda (2001 y 2010), el auge reciente en la construcción de edificios altos en varias ciudades importantes de nuestro país obliga a contar con un proceso de diseño, fabricación y supervisión más estricto y a tomar precauciones especiales en la conceptualización, análisis, diseño,

detallado y fabricación de las conexiones rígidas trabe-columna.

### **Conexiones precalificadas trabe-columna en zonas sísmicas**

A raíz de los graves daños que ocasionaron los sismos de Northridge y Kobe, se han desarrollado nuevas conexiones precalificadas trabe-columna para zonas de alta sismicidad en Estados Unidos. Las conexiones precalificadas que cumplen con los requisitos sísmicos y que fueron ensayadas en laboratorios de varias universidades bajo cargas alternadas son las

siguientes; todas excepto la última se encuentran en el documento FEMA 350 (2000) de la Agencia Federal de Manejo de Emergencias estadounidense:

1. Conexión soldada con patines libres (*welded free flange connection*)
2. Conexión con viga de sección reducida o "hueso de perro" (*reduced beam section connection, RBS*) (véase figura 1a)
3. Conexión con placa extrema extendida atornillada, no atiesada (*bolted unstiffened end plate connection, BUPE*) (véase figura 1b)
4. Conexión con placa extrema extendida atornillada atiesada (*bolted unstiffened end plate connection, BUPE*) (véase figura 1c)
5. Conexión con placas atornilladas a los patines de la trabe (*bolted flange connection, BFP*) (véase figura 1d)
6. Conexión con tes atornilladas a los patines de la columna y de la trabe (*double split tee connection, DST*) (véase figura 1e)
7. Conexión CONXL (*CONXL connection*)

Las conexiones trabe-columna precalificadas de uso común en México en zonas de alta sismicidad son la primera y la cuarta. La última es una conexión patentada que requiere el uso de piezas

especiales y que difícilmente se utilizará en nuestro país. En cuanto a la conexión de viga de sección reducida, aunque su comportamiento sísmico fue satisfactorio durante las pruebas realizadas en laboratorio, no tuvo éxito entre los fabricantes en México porque implica reducir intencionalmente los patines de las vigas laminadas IR, lo cual les pareció absurdo.

El Instituto Estadounidense de la Construcción con Acero (AISC, por sus siglas en inglés) estableció un procedimiento de diseño para cada conexión precalificada, basado en los resultados de numerosas pruebas de laboratorio así como en los correspondientes modos de falla de los miembros estructurales y de los elementos de la conexión asociados a los estados límite de resistencia.

Hoy en día hay una gran cantidad de temas especiales y recomendaciones que deben considerarse en el diseño, ejecución y supervisión de las soldaduras de conexiones precalificadas y están contenidas en el documento FEMA 353.

### **Cambios en el diseño y fabricación de estructuras de acero**

El diseño de las conexiones trabe-columna para condiciones sísmicas no se hace ahora para las fuerzas obtenidas en el análisis estructural, sino para las resisten-

cias nominales de los miembros que se emplean en la estructura, con lo cual se evita que las uniones fallen antes de presentarse las deformaciones inelásticas necesarias.

Los marcos rígidos resistentes a cargas laterales que incursionan en el rango de comportamiento inelástico, sin colapso o pérdida de estabilidad, son ideales para zonas sísmicas por la gran cantidad de energía de deformación que disipan las articulaciones plásticas. El sistema estructural puede sufrir el colapso cuando un número suficiente de articulaciones plásticas alcanza la falla.

No conviene que las articulaciones plásticas se formen en las columnas porque pueden formarse mecanismos de entrepiso con pocas articulaciones y fallas con muy poca disipación de energía. Esto ocurre en los denominados entrepisos débiles.

En México, en los casos poco frecuentes en que las condiciones de trabajo puedan provocar fallas de tipo frágil, se recomienda emplear materiales de alta ductilidad capaces de fluir ampliamente en puntos de concentración de esfuerzos a la temperatura de trabajo más baja, o diseñar la estructura de manera que los esfuerzos que se presenten en las zonas críticas sean suficientemente bajos para

**EL DISEÑO DE LAS CONEXIONES TRABE-COLUMNA PARA CONDICIONES SÍSMICAS NO SE HACE AHORA PARA LAS FUERZAS OBTENIDAS EN EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL, SINO PARA LAS RESISTENCIAS NOMINALES DE LOS MIEMBROS QUE SE EMPLEAN EN LA ESTRUCTURA, CON LO CUAL SE EVITA QUE LAS UNIONES FALLEN ANTES DE PRESENTARSE LAS DEFORMACIONES INELÁSTICAS NECESARIAS.**



**FIGURA 2.** Conexiones trabe-columna en zonas sísmicas.

evitar la propagación de las grietas que caracterizan las fallas frágiles.

En la actualidad, el diseño de conexiones trabe-columna se basa en los resultados de ensayos bajo cargas cíclicas que demuestren que la unión puede desarrollar una rotación inelástica no menor de 0.03 radianes.

Las conexiones reales se construirán utilizando materiales, configuraciones, procesos y métodos de control de calidad que se acerquen tanto como sea posible a los empleados en las juntas ensayadas.

Ahora se exige que todas las soldaduras en uniones trabe-columna de edificios de acero estructurados con base en un sistema resistente a fuerzas sísmicas cumplan con lo estipulado en el código AWS D1.8 de la Asociación Estadounidense de Soldadura, cláusula 6.3, en lo referente al ensayo Charpy en V y en los límites de contenido de hidrógeno de los electrodos.

Los agujeros de acceso para soldar que se requieren para permitir la colocación de la placa de respaldo en el patín superior y soldar el patín inferior comple-

to, incluyendo la parte que se une con el alma, deben tener dimensiones adecuadas en el alma de la viga, con cuidado de que no sean mayores que lo necesario.

Es obligatorio identificar de manera clara en los planos estructurales las zonas protegidas en una estructura de acero. Al respecto, el documento AISC 358 define la zona protegida para conexiones precalificadas. En el caso, por ejemplo, de una RBS, es en la parte de la trabe medida desde la cara de la columna hacia la sección interior donde se reducen los patines de la viga. En dicha zona no se permite colocar pernos conectores de cortante ni contraventeos laterales. Puede consultarse la sección 7.4 de las Estipulaciones Sísmicas (Seismic Provisions) del AISC para requisitos adicionales de las zonas protegidas.

### **Recomendaciones para lograr conexiones trabe-columna eficientes**

Algunas recomendaciones para el diseño de las conexiones trabe-columna se describen en las líneas siguientes.

Las conexiones deben ser más fuertes que los miembros que ligan (trabes y columnas), para transmitir todas las acciones que obran en ellas.

Deben ser sencillas, económicas y seguras durante su fabricación en taller y en campo. El requisito de constructibilidad significa la facilidad para fabricar una junta trabe-columna de manera sencilla y económica en taller: Esto requiere que los diseños de las juntas sean simples para conducir a soluciones que al mismo tiempo resulten económicas. Una estructura ligera no necesariamente está relacionada con un menor costo.

El costo de las conexiones representa un porcentaje alto respecto al de la estructura. No se debe fabricar la estructura si no se tienen planos de taller o de detalle completos.

Hay que utilizar juntas y conexiones precalificadas en zonas de alta sismicidad que han sido ensayadas previamente con éxito en laboratorio, de lo contrario el proyectista deberá demostrar por medio de pruebas de laboratorio que la conexión cumple con los requisitos sísmicos y geométricos de una unión precalificada.

En juntas soldadas a tope, se debe precalentar el metal base cuando su grueso sea mayor de 50.0 mm (2 pulgadas) para evitar fallas frágiles.

Diseñar cuidadosamente la geometría de las juntas soldadas en las que se especifican soldaduras de penetración completa (características de la soldadura: tipo de preparación, grueso de las piezas a unir, ángulos de bisel, aberturas de raíz, profundidad de la penetración, posiciones para soldar; tipos de electrodos, etc.).

Asimismo, ahora deben especificarse todas las características del electrodo; en la tabla 1 se muestra un ejemplo.

Indicar las soldaduras de demanda crítica asociadas con la respuesta inelástica de la estructura, de conformidad con el código de soldadura estructural AWS D1.8 DC.

No colocar placa de respaldo en el patín inferior (práctica anómala).

Cuidar las zonas protegidas (no colocar elementos secundarios ni accesorios en ellas).

Evitar columnas de sección transversal cerradas (laminadas o en cajón), ya que dificultan la colocación de los atiesadores horizontales o placas de continuidad y en muchos casos se requiere hacer refuerzos exteriores caros.

### Estructuras de acero en México

Los avances en la ingeniería de las estructuras de acero después de los sismos de 1985 hasta nuestros días se resumen en los siguientes:

1. Producción de nuevos aceros estructurales que mejoran el comportamiento sísmico de las estructuras de


acero (estándar ASTM A992) y que tienen propiedades de resistencia y soldabilidad mejoradas.

2. Mejor conocimiento sobre el comportamiento de las conexiones rígidas trabe-columna y uso de uniones precalificadas (conexión con placa extrema extendida atiesada y unión de patines libres, principalmente).
3. Uso de tornillos de alta resistencia ASTM A325 (NMX-H-124) y A490 (NMS-H-123) versus conexiones soldadas, en especial de campo, toda vez que la tecnología de la soldadura en México ha evolucionado de manera favorable.
4. Incremento en la capacidad de producción automatizada con equipos y procesos de control numérico de gran eficiencia, precisión y ahorro de tiempo para manufacturar grandes volúmenes de estructuras de acero, derivado de soluciones tecnológicas innovadoras.
5. Avance extraordinario de los métodos de análisis y diseño estructural por el uso de los programas de computadora que permiten efectuar análisis de primer y segundo orden (diseño por estabilidad; análisis aproximados de segundo orden, método de longitud efectiva, diseño por análisis inelástico, etc.).
6. Mayor conocimiento del fenómeno sísmico, de las propiedades del suelo de la Ciudad de México y del comportamiento de cimentaciones profundas.
7. Innovación de conexiones trabe-columna precalificadas para estructuras ubicadas en zonas de alta sismicidad.
8. Actualización de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y

Construcción de Estructuras de Acero (NTCEA) y del propio Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México. El Comité Técnico de las NTCEA ha actualizado profundamente esta normatividad. Algunos capítulos se rehicieron del todo, como en el caso de la construcción compuesta.

9. Novedosos sistemas estructurales para edificios localizados en zonas sísmicas que tienen una resistencia adecuada y una ductilidad necesaria para conservarlos durante un número elevado de ciclos severos de inversión de esfuerzos.
10. Empleo de disipadores de energía que aumentan el grado de amortiguamiento de los edificios de acero, absorben la energía transmitida por el sismo o el aislamiento de base estructural-cimentación.
11. Mayor colaboración entre las diferentes ingenierías que participan en el proceso de diseño y construcción de edificios urbanos: arquitecto, diseñador, fabricante, montador y supervisor.

### Actualización profesional

Se hace una invitación al “Curso práctico de diseño de conexiones de acero estructural asistido con programas de computadora ETABS, STAAD Pro y RAM Connection”, que se realizará los días 20 al 22 de julio de 2017 en Monterrey, y al “Seminario práctico de naves industriales” a efectuarse del 3 al 5 de agosto en Puebla; ambos son organizados por el Centro Regional de Desarrollo en Ingeniería Civil. Para mayores detalles puede visitar el sitio [www.crdic.org](http://www.crdic.org) 

**TABLA 1.** Especificaciones del electrodo E70T-1MJH8.

E70	Electrodo de 70, de 4,920 kg/cm <sup>2</sup> y 485 MPa
T	Tubular
1	Desempeño y uso
M	Mezcla de gases
J	Resistencia al impacto de 20 lb/pie a -40 °F
H8	Nivel de hidrógeno, y cumplimiento con los requisitos del ensayo de absorción de humedad para evitar deficiencias y falla de carácter frágil