

## **PREQUALIFIED BEAM-TO-COLUMN RIGID CONNECTIONS OF AISC-358-27 STANDARD**

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

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

Received: April 2025. Accepted: September 2025. Published: October 2025

### **ABSTRACT**

This paper presents an overview and analysis of the evolution of prequalified structural steel column connections in the preliminary draft of Specification AISC-358-27, based on the recent update by the AISC's Connection Prequalification Review Panel (CPRP). The characteristics and limitations of each of the eleven types of prequalified connections are defined. The connections are classified according to where they are made (workshop or field), according to their constructability (structural design and manufacturing) and economy. The advantages and disadvantages of each are mentioned in terms of their feasibility for use in Latin American countries. Finally, the author's experience in conducting experimental laboratory tests to prequalify alternative connections in high seismicity zones in Mexico City (Transition Zone and Lake Zone) is discussed.

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

## **CONEXIONES RÍGIDAS TRABE-COLUMNA PRECALIFICADAS DEL ANTEPROYECTO DE LA ESPECIFICACIÓN AISC 358-27**

### **RESUMEN**

En este trabajo se presenta una visión panorámica y un análisis de la evolución de las conexiones precalificadas trabe columna de acero estructural del anteproyecto de la Especificación AISC-358-27 con base en la actualización reciente del comité CPRP (*Connection Prequalification Review Panel*) del AISC. Se definen las características y limitaciones de cada uno de los once tipos de conexiones precalificadas. Se clasifican las conexiones de acuerdo con el lugar donde se realizan (taller o campo), de acuerdo con su constructibilidad (diseño estructural y fabricación) y economía. Se mencionan las ventajas y desventajas de cada una de ellas en función de su factibilidad de uso en los países de América Latina. Finalmente, se comenta la experiencia del autor adquirida en la ejecución de pruebas experimentales de laboratorio para precalificar conexiones alternas en zonas de alta sismicidad de la Ciudad de México (zona de transición y del lago).

**Palabras clave:** Especificación AISC-358-27, Pruebas experimentales, Conexiones precalificadas, Conexión rígida trabe-columna, prueba experimental.

## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, en los últimos 30 años se han realizado numerosas investigaciones experimentales y analíticas sobre el comportamiento sísmico de las conexiones rígidas trabe-columna de acero estructural, sujetas a acciones sísmicas intensas mediante un protocolo cíclico de calificación para demostrar que cumplen con los requisitos de: resistencia, ductilidad, capacidad de absorción de energía, ángulo de distorsión y desplazamientos laterales. Esto ha permitido al comité CPRP establecer los procedimientos de calificación e inclusión en las especificaciones de diseño de estructuras de acero de varios países localizados en zonas de alto peligro sísmico.

El comportamiento de las conexiones trabe-columna ante demandas sísmicas intensas es muy complejo y, en muchos casos, es difícil de describir. Por esta razón, es necesario realizar ensayos experimentales en laboratorio a escala real de especímenes de prueba, o bien efectuar simulaciones numéricas con la teoría del elemento finito con modelos matemáticos con el uso de programas de computadora especializados y reconocidos por la ingeniería estructural mundial para predecir su performance (comportamiento, desempeño o rendimiento sísmico) a bajo costo.

De acuerdo con el que escribe, los principales objetivos de los estudios experimentales en ingeniería sísmica estriban en: 1) Comprobar teorías relacionadas con la rama indicada; 2) Estudiar estructuras complejas; 3) Definir parámetros experimentales que se complementen con una teoría existente; y 4) Explorar zonas de interés de una conexión trabe-columna donde se desarrollan concentraciones de esfuerzos significativos.

El comportamiento satisfactorio de una conexión trabe-columna se logra dimensionando los miembros estructurales (trabe, columna, tornillos de alta resistencia, soldadura de demanda crítica o de filete, etc.), de manera que se garantice que la formación de las articulaciones plásticas ocurra en la viga, a cierta distancia medida desde la cara de la columna.

Para ello, además de la filosofía de diseño sísmico de columna fuerte-viga débil, la conexión debe diseñarse con una resistencia superior que la viga. Esto puede lograrse de dos maneras:

1. Reforzando localmente la sección transversal de la viga en la conexión, de manera que dicha sección sea efectivamente más resistente que el resto de la viga.
2. Debilitando la sección transversal de viga en la zona protegida, para privilegiar la formación de una articulación plástica en dicha región.

## 2. ANÁLISIS DE LAS CONEXIONES TRABE-COLUMNA PRECALIFICADAS DEL ANTEPROYECTO DE LA ESPECIFICACIÓN AISC 358-27

Una conexión trabe-columna precalificada es aquella que ha sido sometida a un número suficiente de pruebas experimentales de laboratorio y que ha demostrado un comportamiento satisfactorio histerético ante demandas sísmicas intensas inducidas por un actuador hidráulico.

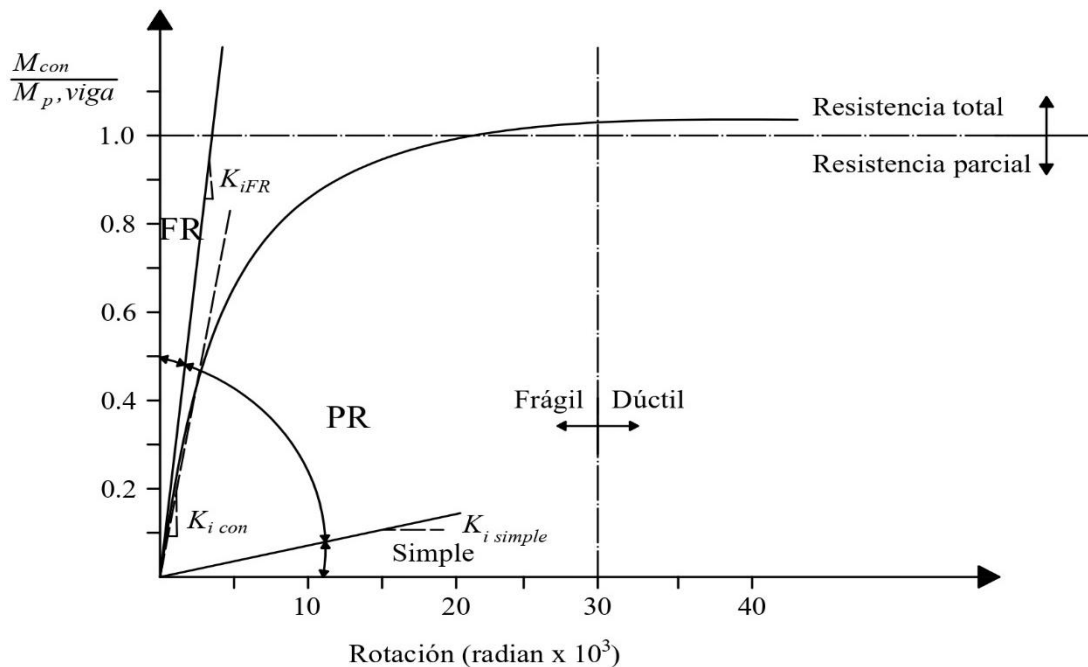
Forma parte de un programa de pruebas de laboratorio exhaustivas y ha sido evaluada por un comité de especialistas en la materia, antes de su precalificación por parte del Comité Revisor de Precalificación de Conexiones (CPRP, por sus siglas en inglés). Las conexiones trabe-columna rígidas presentadas en este artículo fueron precalificadas por dicho panel, conocido como *Connection Prequalification Review Panel* del AISC, actualmente encabezado por el Dr. James Swanson, profesor e investigador de la Universidad de Cincinnati.

Estas conexiones se emplean en sistemas estructurales constituidos por marcos resistentes a momento especiales (SMF, por sus siglas en inglés), que son marcos rígidos de ductilidad elevada,

y en marcos intermedios (IMF) de ductilidad media, de acuerdo con las limitaciones estipuladas en el anteproyecto de la norma AISC 358-27. Según su rigidez, la mayoría de las conexiones precalificadas se consideran totalmente restringidas (*fully restrained*, Tipo FR) para fines de diseño sísmico, con excepción de la conexión Simpson Strong-Tie.

Conviene que las configuraciones de las conexiones trabe columna que se pretenden precalificar haga que las articulaciones plásticas se formen lejos de la cara de la columna, donde la respuesta depende menos de la mano de obra y de los materiales con que están fabricadas las trabes y las columnas. Por ello, la relación entre demanda y resistencia debe ser máxima en una sección interior de la trabe, lo que se logra reforzando localmente la conexión y el extremo de la viga, o reduciendo localmente su sección transversal como en el caso de la conexión de viga con sección reducida (RBS).

Con base en la calificación de las conexiones rígidas trabe-columna, éstas se clasifican en tres tipos: no calificadas, calificadas y precalificadas. Las primeras son aquellas que no han sido aprobadas mediante pruebas experimentales de laboratorio; las segundas han sido aprobadas después de las pruebas de laboratorio; y las terceras han sido aprobadas y avaladas por un comité técnico revisor de algún organismo internacional, como el AISC.



**Figura 1.** Momento flexionante versus rotación de conexiones trabe-columna. Imagen propia.

De acuerdo con el autor, las conexiones trabe-columna precalificadas se clasifican en dos grupos: convencionales e innovadoras.

## 2.1 Conexiones convencionales

En este tipo de conexiones, los estados límite de falla que pueden alcanzarse incluyen: fluencia en las secciones de mayor demanda por flexión en las zonas protegidas de las trabes (donde se forman las articulaciones plásticas); pandeo local de patines o del alma de la trabe o de la columna; fractura de las soldaduras de penetración completa de patines de viga contra patines de columnas (soldaduras de demanda crítica); fractura de los tornillos de alta resistencia ASTM de las placas de conexión adosadas a los patines de la viga (conexión BFB); fractura de los tornillos del

mismo tipo de la placa vertical simple a cortante; bloque de cortante por tensión y cortante combinados en las placas atornilladas de la conexión BFP, o en las placas de cortante convencionales; plastificación por cortante de la zona del panel de la columna, etc.

## 2.2 Conexiones innovadoras (conexión con placa fusible)

En este tipo de conexiones no se permite ningún tipo de daño en las placas de conexión atornilladas. La energía inducida por un sismo intenso se disipa por deslizamiento de los tornillos de alta resistencia ASTM que trabajan a fricción y que se colocan en agujeros ovalados.

El anteproyecto de la Especificación AISC 358-27 contienen disposiciones para el diseño y construcción de conexiones trabe columna precalificadas, que forman parte de sistemas estructurales sismorresistentes de edificios de acero estructural en los que las fuerzas sísmicas de diseño resultantes de los movimientos del suelo producidos por los temblores intensos, se han determinado tomando como base varios niveles de disipación de energía en el intervalo inelástico de respuesta.

**Tabla 1.** Clasificación de las conexiones trabe-columna precalificadas de acuerdo con el trabajo.  
Cortesía del Dr. James Swanson, Presidente del Comité CPRP del AISC.

| Soldadura/Tornillos                       | Capítulo    | Nombre de la conexión                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Soldada en campo                          | Capítulo 5  | Conexión con viga de sección reducida<br>Reduced beam section (RBS) moment connection                                                                                                |
|                                           | Capítulo 8  | Conexión con patines y alma soldados<br>Welded unreinforced flange-welded web (WUF-W) moment connection                                                                              |
|                                           | Capítulo 14 | Conexión con alma ranurada<br>Slotted web (SW) moment connection                                                                                                                     |
| Soldada en taller<br>Atornillada en campo | Capítulo 6  | Conexiones con placas de extremo extendidas atornilladas con y sin atiesadores (End-Plate)<br>Bolted unstiffened (BUEEP) and stiffened extended end plate (BSEEP) moment connections |
|                                           | Capítulo 7  | Conexión con cubre placas atornilladas<br>Bolted flange plate (BFP) moment connection                                                                                                |
|                                           | Capítulo 9  | Conexión con ménsulas atornilladas de hierro fundido<br>Cast bolted bracket (CBB) moment connection                                                                                  |
|                                           | Capítulo 13 | Conexión rígida con doble t<br>Double-tee moment connection                                                                                                                          |
| Patentadas                                | Capítulo 10 | Conexión a momento conxtech conxl<br>Conxtech conxl moment connection                                                                                                                |
|                                           | Capítulo 11 | Conexión con placas laterales<br>Sideplate moment connection                                                                                                                         |
|                                           | Capítulo 12 | Conexión a momento con eslabón de fluencia y unión fuerte Simpson<br>Simpson strong-tie yield-link moment connection                                                                 |
|                                           | Capítulo 15 | Conexión a momento de marcos Durafuse<br>Durafuse frames moment connection                                                                                                           |

Los nombres de las conexiones precalificadas en inglés se han tomado del anteproyecto de la Especificación AISC-358-27, y aquellas que han sido adoptadas en la norma mexicana NTC-DCEA-2023 aparecen con su denominación correspondiente en el Capítulo 11, *Conexiones*.

Todas las conexiones precalificadas del anteproyecto de la Especificación AISC 358-27 han sido estudiadas en laboratorio con vigas conectadas en el eje fuerte de la columna. Esta

especificación solo contempla una conexión bidireccional, es decir, conectada por los dos ejes principales de la columna (eje fuerte y eje débil).

Las conexiones completamente de campo, como las de placas extremas extendidas, con o sin cartabones, se basan en las prácticas de diseño y construcción de los países de Asia del Este (Japón, principalmente) y de Europa.

Por otra parte, las conexiones casi totalmente soldadas en campo, con soldaduras de demanda crítica depositadas entre los patines de las trabes y los de las columnas (soldaduras de demanda crítica), fueron ampliamente utilizadas en California antes del sismo de Northridge, ocurrido el 17 de enero de 1994.

También es importante señalar que la distancia de la articulación plástica en la zona protegida de la trabe, medida desde la cara de la columna,  $S_n$ , se toma de acuerdo con los requisitos indicados de cada tipo de conexión del anteproyecto de la Especificación AISC 358-27.

Es importante reiterar que no todas las conexiones precalificadas de uso común en los Estados Unidos de Norteamérica son adecuadas para los países de América Latina. Los perfiles estructurales laminados pesados tipo Jumbo, comúnmente utilizados en trabes y columnas en dicho país, no se producen en esta región. Además, existen diferencias en las prácticas de diseño y construcción de estructuras de acero, así como en los costos de la mano de obra y los materiales.

Asimismo, deben ser consideradas las diferencias sísmicas relevantes: zonas sísmicas, tipos de sismos y los efectos de sitio de los suelos en las grandes ciudades latinoamericanas, en comparación con los Estados Unidos.

Lo que sí es cierto es que, durante muchos años, el desarrollo tecnológico y los avances en la ingeniería sísmica en México y de varios países de Sud América han estado estrechamente vinculados con los del vecino país.

Las conexiones incluidas en esta norma están precalificadas de acuerdo con los requisitos de la Disposición Sísmica de la AISC, cuando se utilizan para conectar elementos que cumplen las limitaciones de las Secciones 2.3.1, 2.3.2 o 2.3.3, según corresponda.

Las trabes y columnas utilizadas en las once conexiones precalificadas del anteproyecto de la AISC 358-22 deben satisfacer una serie de requisitos dimensionales, de peso, de relaciones claro/peralte, de diseño estructural y fabricación (soldaduras de taller o de campo, tornillos de alta resistencia para las conexiones atornilladas).

Los especímenes de prueba de las conexiones trabe-columna deben demostrar una respuesta estable histerética cuando se ejecuten las pruebas en un laboratorio de estructuras grandes evidenciando alta resistencia, rigidez, ductilidad y capacidad de absorción de energía. Las conexiones que no satisfagan los requisitos anteriores no se consideran precalificadas.

Los perfiles estructurales W (denominados IR en México) deben cumplir con las limitaciones de las secciones transversales aplicables a la conexión específica en esta norma.

Los miembros armados con sección transversal doblemente simétrica en forma de I deben cumplir los siguientes requisitos: sus patines y almas deben tener dimensiones de ancho, peralte y espesor similares a los de las secciones laminadas W (IR) que cumplan las limitaciones de las secciones aplicables a la conexión específica del anteproyecto de la norma AISC 358-27 y las almas deberán estar unidas de manera continua a los patines, de acuerdo con los requisitos de las secciones 2.3 o 2.3.2b y los requisitos de las Disposiciones Sísmicas de la AISC, según corresponda.

Por otro lado, los primeros cuatro capítulos de las conexiones precalificadas del anteproyecto de Especificación AISC 358-27 incluyen información general que aplica a todas las conexiones en el resto de la especificación.

Los capítulos del 5 al 15 contienen disposiciones que son específicas para cada una de las once conexiones precalificadas. Están ordenados cronológicamente, es decir, aparecen en la especificación en el orden en que fueron introducidas.

La conexión trabe-columna con viga de sección reducida fue la primera en ser precalificada e incluida en la norma indicada. La segunda en ser incorporada fueron las conexiones con placas extremas extendidas, y así sucesivamente.

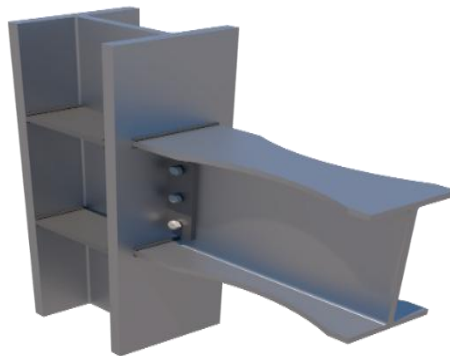
Algunas de las conexiones de AISC 358-27 están patentadas, lo que significa que, para utilizarlas, es necesario obtener una licencia del propietario y coordinarse con el titular de la patente.

### **3. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LAS CONEXIONES PRECALIFICADAS**

El autor realiza un análisis breve de las conexiones precalificadas del anteproyecto de la especificación AISC 358-27, desde el punto de vista de eficiencia, constructibilidad y economía razonable.

#### **CAPÍTULO 5. CONEXIONES TRABE-COLUMNA CON VIGA DE SECCIÓN REDUCIDA. REDUCED BEAM SECTION (RBS) MOMEN CONNECTION**

En la conexión rígida trabe-columna con viga de sección reducida se cortan intencionalmente los patines superior e inferior de la viga para reducir el área de estos elementos planos, con un radio circular en una zona adyacente de la conexión viga-columna.



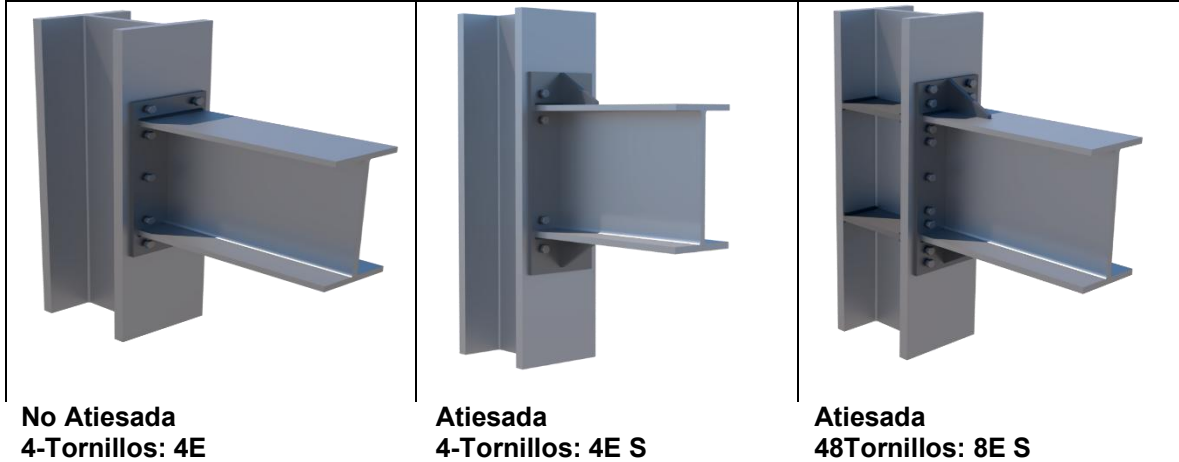
**Figura 2.** Conexión trabe-columna con viga de sección reducida. Imagen propia.

El objetivo principal de los cortes en los patines es propiciar que la fluencia por flexión (plastificación) y la formación de las articulaciones plásticas ocurran principalmente dentro de la sección reducida de la viga, que se conoce como zona protegida.

Por lo tanto, los cortes reducen la capacidad a momento plástico resistente en las zonas protegidas. Esta conexión fue desarrollada para garantizar una mayor confiabilidad de las conexiones entre vigas de acero y columnas. La noción que subyace a la conexión es proteger las soldaduras de demanda crítica (soldaduras de penetración completa) que se depositan en los bordes de los patines de las vigas contra los patines de la columna mediante un "fusible" dúctil intencionado.

## CAPITULO 6. CONEXIONES TRABE-COLUMNA CON PLACA DE EXTREMO EXTENDIDA CON O SIN CARTABONES. BOLTED UNSTIFFENED (BUEEP) AND STIFFENED EXTENDED END PLATE (BSEEP) MOMENT CONNECTIONS

La conexión trabe-columna consiste en una placa de acero vertical y extendida (de mayor peralte que la trabe) que se suelda en el extremo de la viga y, posteriormente se atornilla al patín de la columna.



**Figura 3.** Conexiones trabe columna con placas de extremo extendidas. Imágenes propias.

Se utiliza principalmente para unir una trabe a una columna o para hacer el empalme de dos tramos de vigas. La conexión de tipo BSEP consiste en soldar, en taller, la viga a una placa, ubicada en el extremo de la viga, usando para ello soldadura de penetración completa, para la unión de los patines de la viga a la placa, y soldadura de filete para unir el alma de la viga a la placa. La placa extrema extendida se atornilla posteriormente en campo a los patines de la columna.



**Figura 4.** Conexión trabe-columna con placas extremas de uso común en México. Imagen propia.

La soldadura de penetración completa que une los patines de la viga a la placa extrema extendida se deposita sin necesidad de hacer agujeros de acceso para soldar. Para la unión entre los patines de la trabe y los patines de la columna, se disponen atiesadores verticales o cartabones entre la placa extrema extendida y la parte superior e inferior de los patines de la viga.

Los atiesadores o cartabones se sueldan por medio de soldadura de penetración completa al patín de la viga y a la placa extrema. Este tipo de conexión es válida para su uso en marcos de ductilidad alta ( $Q = 4$ ) y de ductilidad media ( $Q = 3$ ).

1. Placa de extremo extendida de acero estructural ASTM A36.
2. Soldadura de penetración completa entre los patines de la viga y la placa de extremo extendida.
3. Alma de la viga soldada a la placa de extremo con soldadura de filete.
4. Tornillos de alta resistencia ASTM A325 (Grupo A) o A490 (Grupo B) entre la placa de extremo extendida y el patín de la columna.
5. Ubicación de los tornillos de alta resistencia ASTM de acuerdo con el diseño de la placa de extremo extendida.
6. Placas de continuidad (atiesadores horizontales en la columna) y placas de refuerzo en la zona del panel de la columna, si se requieren.
7. Atiesadores de la placa de extremo.
8. Soldadura de penetración completa para unir los atiesadores o cartabones de sección variable a la placa de extremo extendida y a los patines de la viga.
9. Placas de relleno (cuñas) en caso necesario.

Se tienen tres configuraciones posibles: 1) conexión con cuatro tornillos en cada lecho, superior e inferior de la placa vertical extendida sin cartabón (4E); 2) la conexión con cuatro tornillos colocados en la placa con cartabón (4E-S); y 3) ocho tornillos en cada lecho de la placa extendida con atiesador (8E-S).

En los dos primeros tipos de conexiones (4E y 4E-S) se emplean cuatro tornillos de alta resistencia ASTM A490; en el tercer tipo (8E-S) consta de dos hileras de dos pernos para cada patín: una hilera está por encima de los patines en la parte extendida de la placa extrema y la otra localizada abajo de los patines.

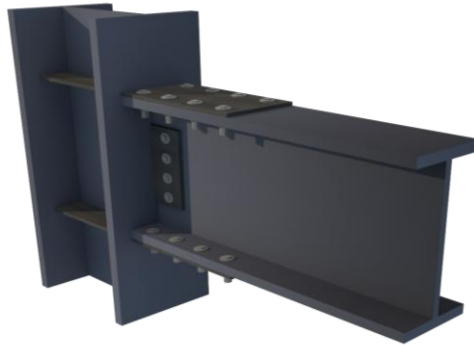
La conexión con ocho tornillos con atiesador (8E-S) requiere de cuatro hileras en cada patín. Dos hileras en la parte superior del patín en la parte extendida de la placa extrema y dos hileras por debajo del patín inferior. En las partes extendidas de la placa extrema se suelda un cartabón de sección variable (triangular), que se coloca en el centro de los patines de la columna y de la trabe. En la siguiente figura se muestran las configuraciones típicas de los tres tipos de conexiones de placas extremas extendidas.

Las resistencias a flexión de la placa extrema y del patín de la columna se determinan con un análisis de líneas de flujo, utilizando el método del equilibrio o el de los mecanismos. Este último es el recomendado para placas de acero y se basa en el principio del trabajo virtual, igualando el trabajo producido por la fuerza exterior, durante un pequeño desplazamiento del mecanismo de colapso, con el trabajo interno desarrollado a lo largo de las líneas de flujo.

## **CAPITULO 7. CONEXIÓN CON CUBREPLACAS ATORNILLADAS A PATINES DE VIGA. BOLTED FLANGE PLATE (BFP) MOMENT CONNECTION**

La conexión de tipo BFP de la Figura 5 consiste en el uso de dos placas rectangulares a momento que se sueldan al patín de la columna y que se atornillan a los patines de la trabe con tornillos de alta resistencia ASTM A325 (NMX-H-124) para transmitir el momento flexionante de la viga a la columna.

Los bordes de las placas adosadas a los patines se sueldan al patín de la columna con soldadura de penetración completa (SPC). Posteriormente, las placas se atornillan a los patines de la viga que también requieren agujeros estándar hechos en taller. El alma de la viga se conecta al patín de la columna con una placa vertical de cortante simple, utilizando tornillos de alta resistencia del tipo indicado anteriormente y que se introducen en agujeros alargados cortos en una sola hilera vertical. La conexión de la placa de cortante con el alma de la viga trabaja a cortante simple. No se requiere soldadura de campo. Este tipo de conexión es válida para usarse en sistemas estructurales a base de marcos a momento especiales (SMF) y en marcos a momento ordinarios (OMF).



**Figura 5.** Conexión trabe-columna con cubreplacas atornilladas a vigas. Imagen propia.

La zona protegida de la conexión consiste de las placas adosadas atornilladas a los patines de la viga y una parte de ella que se comprenda entre la cara de la columna y una distancia igual a un peralte de la viga,  $d$ , más allá de los tornillos más alejados de la cara interior de la columna. La fluencia inicial y la formación de la articulación plástica ocurren en la viga en la zona cercana de los extremos de las placas atornilladas de los patines.

Debe revisarse la necesidad de colocar placas de continuidad o atiesadores horizontales en el alma de la columna, denominada zona del panel

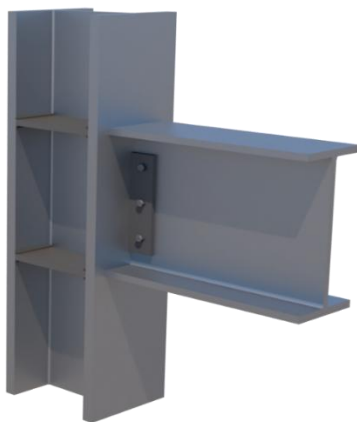
Durante el montaje, las trabes se apoyan directamente en la placa de conexión inferior, lo que permite que la viga se alinee, mientras se conecta el alma de la trabe con la placa de cortante al patín de la columna. En la placa superior horizontal de conexión se prevé una holgura de 5.0 mm (3/16") para acomodar la trabe, posteriormente se introduce una placa de relleno (lana) para compensar este espacio.

## **CAPÍTULO 8 CONEXIÓN CON PATINES Y ALMA SOLDADOS. WELDED UNREINFORCED FLANGE-WELDED WEB (WUF-W) MOMENT CONNECTION**

Se trata de una conexión sencilla y directa totalmente soldada en campo, que requiere un diseño estructural mínimo. Se usa comúnmente en México como una alternativa de las conexiones con placas de extremo extendidas atornilladas cien por ciento en campo.

Los patines de la trabe se sueldan directamente a los patines de la columna por medio de una junta soldada de campo en Te hecha con soldaduras de demanda crítica (SDC), denominadas también como soldaduras de penetración completa (SPC).

En este tipo de conexión no está previsto colocar un refuerzo en los patines de la trabe (placas, cartabones o atiesadores, ménsulas, ángulos de asiento, etc.). Por esta razón se denomina Patines sin refuerzo (unreinforced flange) directamente soldados al patín de la columna. La unión está precalificada para su uso en sistemas de OMF y SMF. Sus características principales se muestran en la Figura 6.



**Figura 6.** Conexión trabe-columna con patines y alma soldados. Imagen propia.

La rotación inelástica de la conexión se desarrolla principalmente por fluencia o plastificación de la viga por flexión excesiva en la zona adyacente a la cara interior de la columna.

La ruptura de la conexión está controlada por medio de requisitos especiales de detallado, asociados con las soldaduras de demanda crítica SDC (anteriormente denominadas soldaduras de penetración completa) que unen los patines de la viga con el de la columna, las soldaduras de filete que unen el alma de la viga con el patín de la columna y la forma y el acabado de los agujeros de acceso para soldar, que tienen un papel muy importante en el comportamiento sísmico de este tipo de conexión.

En la prueba efectuada por el autor en el año 2022, se observó una fractura frágil en el agujero de acceso para soldar del patín inferior de la viga como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Desprendimiento de pintura y fractura del agujero de acceso para soldar al final de la prueba experimental. Imagen propia.

El alma de la trabe se suelda a los patines de la columna con soldaduras de penetración completa de campo. La placa de cortante simple que resiste la fuerza cortante vertical se suelda al alma de la viga con soldaduras de filete de campo. En la conexión original la placa es trapezoidal (sección variable) y la de uso común en México es rectangular.

En esta placa se colocan tornillos de alta resistencia ASTM A325 (NMX-H-124) de montaje, que se pueden remover una vez que se depositan las soldaduras o pueden dejarse en la placa. En este tipo de conexión el alma de la viga se conecta con soldadura de filete a una plancha de corte la que a su vez se conecta con soldadura de penetración completa al ala de la columna.

1. Soldadura de penetración completa (SPC) entre la placa de cortante y el patín de la columna.
2. Agujero de acceso para soldar.
3. Soldadura de penetración completa entre el alma de la viga y el patín de la columna.
4. Espesor de la placa de conexión de cortante debe ser igual al espesor del alma de la viga.
5. Existencia de soldadura a ambos lados de la placa de cortante.
6. Soldadura de filete entre la placa de cortante y el alma de la viga.
7. Tornillos de alta resistencia ASTM A325 de montaje.
8. Placas de continuidad de los patines de la trabe y placas dobles en la zona del panel de la columna.

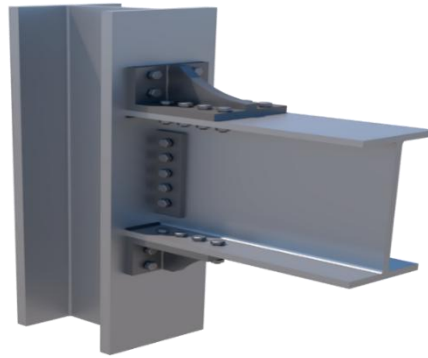
La rotación inelástica se desarrolla principalmente por fluencia por flexión de la viga en la zona adyacente a la cara de la columna.

La zona protegida consiste de la parte de la viga que se mide desde la cara interior de la columna y una distancia de un peralte de la viga,  $d$ . La articulación plástica se forma en la cara de la columna.

La ruptura de la conexión está controlada por medio de un detallado especial asociado con las soldaduras de demanda crítica que unen los patines de la trabe a los de la columna, las soldaduras que unen el alma de la viga al patín de la columna y la forma y el detallado y acabado de los agujeros de acceso para depositar las soldaduras de demanda crítica entre patines de viga y de la columna.

## **CAPÍTULO 9: CONEXIÓN TRABE-COLUMNA CON MÉNSULAS ATORNILLADAS DE ACERO FUNDIDO (CBB). CAST BOLTED BRACKET (CBB) MOMENT CONNECTION**

En cada patín de la viga se conecta una ménsula de acero fundido de alta resistencia, que tiene una geometría especial y que se atornilla a los patines de la trabe y la columna como se muestra en la Figura 8. Las ménsulas también se pueden soldar a los patines de la viga.



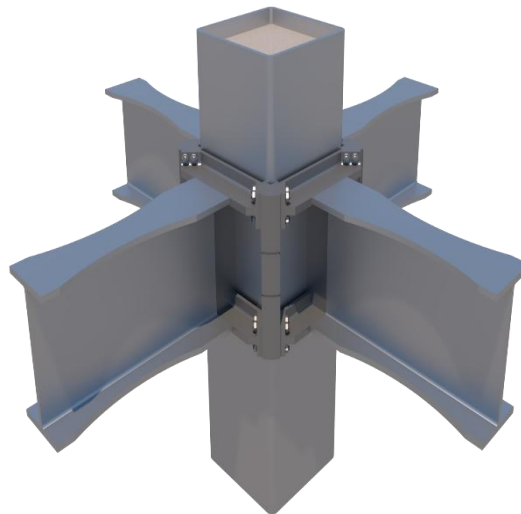
**Figura 8.** Conexión trabe-columna con ménsulas atornilladas de acero colado (CBB). Imagen propia.

La configuración de la ménsula se diseña para que desarrolle el momento máximo probable en la articulación plástica de la viga conectada. e espera que la articulación plástica y la fluencia en la zona protegida de la viga ocurra principalmente en el extremo de las ménsulas más allá de la cara de la columna. La zona protegida consiste en la parte de la viga entre la cara de la columna y un peralte de la viga,  $d$ , más allá del extremo de las ménsulas lo más alejado de la cara de la columna.

No se ha utilizado en América Latina por razones de costo.

#### **CAPÍTULO 10. CONEXIÓN RÍGIDA CONXTECH CONXL (PATENTADA).**

Requiere de piezas especiales (collares) que se unen en las esquinas de la columna HSS y que reciben las vigas en las dos direcciones. Es una alternativa de la unión de Viga de Sección Reducida RBS (hueso de perro). Las columnas son secciones estructurales laminadas huecas cuadradas HSS.



**Figura 9.** Conexión trabe-columna CONXTECH CONXL. Imagen propia.

Cada nudo ConXL contiene: 4 collares que se conectan en las esquinas de las columnas HSS, las columnas pueden rellenarse con concreto, los cortes de los patines de la viga son opcionales.

Para conexiones trabe columna con vigas de sección reducida RBS la zona protegida consiste de una parte de la conexión y de la viga entre la cara de la columna y el extremo más alejado de la sección de viga reducida.

Para vigas sin seccion reducidas, la zona protegida consiste en la porción de la conexión y la viga que se extiende desde la cara de la columna una distancia  $d$  desde la cara exterior del patín con collar, donde  $d$  es el peralte de la viga.

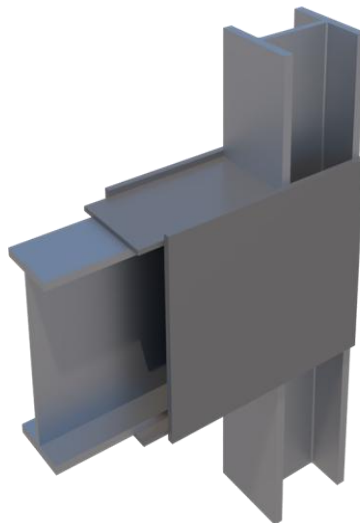
Para conexiones trabe columna con vigas de sección reducida RBS, la zona protegida consiste de una parte de la conexión y de la viga comprendida entre la cara de la columna y el extremo más alejado de la sección de viga reducida RBS.

Para vigas sin secciones reducidas, la zona protegida consiste de la porción de la conexión y la viga que se extiende desde la cara de la columna una distancia  $d$  medida desde la cara exterior del patín con collar, donde  $d$  es el peralte de la viga.

En América Latina no se utiliza por razones principalmente de costo. La conexión hueso de perro, con la incorporación de collares y vaciado de concreto reforzado (hormigón armado), no se recomienda para América Latina.

## **CAPÍTULO 11: CONEXIÓN TRABE-COLUMNA CON PLACAS LATERALES SIDEPLATE MOMENT CONNECTION**

La conexión requiere el uso de placas laterales paralelas de grandes dimensiones y pesadas que se extienden a cada lado de la zona del panel de la columna. En esta unión las columnas se fabrican con perfiles W y HSS.



**Figura 10.** Conexión trabe-columna con placas laterales. Imagen propia.

Las cubreplacas se sueldan a los patines de la trabe y a las placas laterales. Se proporciona una holgura entre la cara de la columna y el extremo de la trabe. Se reducen o eliminan completamente las soldaduras de penetración completa (SPC). Se tienen dos alternativas

disponibles: Conexión soldada o atornillada en campo, aunque se prefiere la atornillada cien por ciento en el sitio de la obra. Es una conexión trabe columna que ofrece retos interesantes debido a las diferentes dimensiones, especialmente anchos de las columnas y de las vigas.

La conexión se diseña para desarrollar el momento máximo probable en la zona protegida de la viga conectada. Se pretende que la articulación plástica ocurra principalmente en la trabe más allá de los extremos de las placas laterales fuera de la cara de la columna, con el desarrollo de fluencia limitada en algunos de los elementos de la conexión.

## **CAPÍTULO 12: CONEXIÓN A MOMENTO CON ESLABÓN DE FLUENCIA DE UNIÓN FUERTE SIMPSON. SIMPSON STRONG-TIE YIELD-LINK MOMENT CONNECTION**

Este tipo de conexión contiene diversas piezas especiales que le permiten disipar gran cantidad de energía inducida por sismos intensos. Las placas de conexión se reducen intencionalmente para obligar que se formen las articulaciones plásticas en las zonas protegidas. Tiene la ventaja de que las placas pueden sustituirse con facilidad en caso de daño.

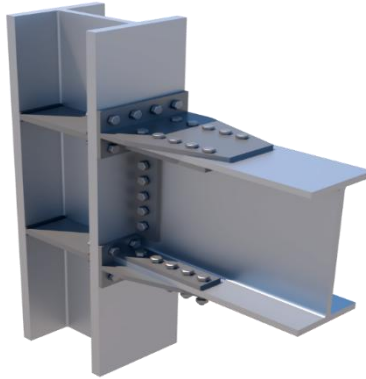


**Figura 11.** Conexión con eslabón de fluencia y placa de extremo extendida.

Los agujeros de las placas de cortante son ranuras, ya sean verticales u horizontales. En la conexión se colocan tornillos que restringen el pandeo de las almas de las Tes que se instalan en los dos patines de la viga y que funcionan como eslabones.

## **CAPÍTULO 13: CONEXIÓN TRABE-COLUMNA CON DOBLE TE. DOUBLE-TEE MOMENT CONNECTION**

La conexión típica de la construcción remachada sirvió de base para diseñar las conexiones con placas extremas extendidas atornilladas. Por las Tes se transmite el momento flexionante de las vigas, descompuesto en dos fuerzas de tensión y compresión. La fuerza cortante pasa por la placa vertical colocada en el alma de la viga. La fuerza de compresión pasa del patín de la Te al de la columna por contacto directo. El patín de la otra Te se flexiona al transmitir la tensión, que pasa a la columna por los tornillos de alta resistencia ASTM, también sujetos a tensión.



**Figura 12.** Conexión trabe-columna con dos Tes atornilladas a patines de la trabe y de la columna. Imagen propia.

#### **CAPÍTULO 14: CONEXIÓN TRABE-COLUMNA CON ALMA RANURADA. SLOTTED WEB (SW) MOMENT CONNECTION**

Similar a la WUF-W pero requiere realizar dos ranuras especiales que se hacen el alma de la viga y que son paralelas y adyacentes a cada patín de la misma. No se recomienda en nuestro medio, porque la geometría de las ranuras es muy compleja y difíciles de hacer en taller.



**Figura 13.** Conexión trabe-columna con almas de vigas ranuradas. Imagen propia.

Se espera que el comportamiento inelástico ocurra por medio de fluencia y pandeo de los patines de la viga en la zona de la ranura acompañada por fluencia del alma en la zona cercana al extremo de la placa de cortante vertical simple.

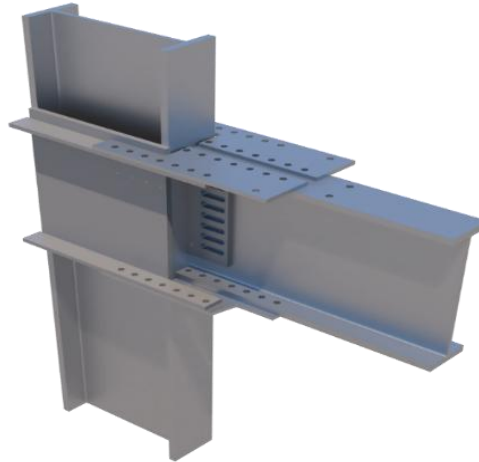
La zona protegida de esta conexión consiste de:

1. Una zona del alma de la viga medida desde la cara interior de la columna al extremo de las ranuras más la mitad del peralte de la viga,  $d$ , más allá del extremo de las ranuras.
2. El patín de la viga medido desde la cara interior de la columna a los extremos de las ranuras más la mitad del ancho del patín de la viga,  $b_f$ .

Se espera que la articulación plástica se forme en el extremo de la placa de cortante.

## CAPÍTULO 15: C CONEXIÓN A MOMENTO DE MARCOS DURAFUSE. DURAFUSE FRAMES MOMENT CONNECTION

Desarrollada por el Dr. Paul Richards, esta conexión tiene una placa fusible reparable (RSF: *Replaceable Shear Fuse*) en el patín inferior de la viga que evita daños severos en la trabe y columna. Es 100% atornillada en campo.



**Figura 14.** Conexión trabe-columna Durafuse. Imagen propia.

Las características generales de esta conexión innovadora, libre de daño, son las siguientes: Los elementos de unión se sueldan en taller a la columna, la conexión es totalmente atornillada en campo (las placas superiores e inferiores se atornillan en campo a la viga), las placas superiores definen el punto de rotación, una de las placa inferiores actúa como un fusible disipador de energía, la viga y la columna se diseñan para mantenerse elásticas sin daño durante la aplicación de las demandas sísmicas intensas.

Se colocan cuatro placas externas de continuidad que se extienden más allá de la cara de la columna y se sueldan a las cubreplacas de la columna o a las caras laterales de ésta.

Los patines de la viga se unen a las placas externas de continuidad por medio de las placas superiores y la placa fusible.

La placa fusible se diseña de manera que ciertas partes de la placa exhibe fluencia por cortante cuando la conexión está sometida a cargas sísmicas severas.

La placa fusible se atornilla en el sitio de modo que puede removerse y remplazarse si se daña después de la ocurrencia de un sismo intenso.

Las placas superiores se diseñan para que alcancen la fluencia mínima de manera que no necesitan repararse después de que ocurra un temblor fuerte.

La mayoría de las placas de la conexión se diseñan de manera que la trabe permanezca esencialmente elástica. La columna tiene una placa de cortante simple que contiene agujeros horizontales alargados largos y que se suelda a la cara de la columna con soldaduras de filete.

El alma de la viga tiene agujeros estándar, se une a la placa de cortante simple con tornillos de alta resistencia pretensionados ASTM. Los patines de la viga y las placas de continuidad externas

tienen agujeros estándar, mientras que las placas superiores y la placa fusible tiene agujeros sobredimensionados.

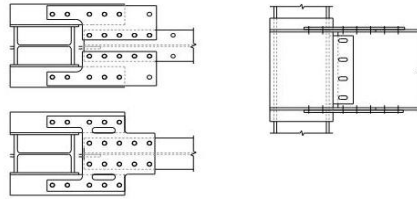
El autor recibió en el año 2024 una autorización del Dr. Paul Richards, innovador de la conexión para adaptarla al contexto de la práctica profesional mexicana.

En la Tabla 2 se resumen los numerosos estados límite de falla de los tornillos de alta resistencia, viga, placa de cortante, columna, placa fusible, barra, placa superior, cubreplacas, soldaduras, etc., con las resistencias de diseño para cada modo de falla, las demandas y las relaciones demanda/capacidad.

Los perfiles utilizados en la conexión son: Trabe 1R533x91.6 (W21x62) y columna H356x125.1 (W14x84). La conexión tuvo una relación demanda capacidad general de 0.98.

**Tabla 2.** Resumen de los estados límite de la conexión trabe-columna Durafuse (DF101). Diseño estructural efectuado conjuntamente con el Dr. Paul Richards.

**Column: W14X68 - Beam: W21X62**



| Limit State #                     | Limit State Type | Limit State Name                         | Capacity                       | Demand                        | D/C  |
|-----------------------------------|------------------|------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------|
| 1                                 | Bolt             | Flange Bolt Shear                        | $\phi R_n = 189$ kips          | $R_u = 186$ kips              | 0.98 |
| 2                                 |                  | Web Bolt Shear                           | $\phi R_n = 37.8$ kips         | $R_u = 23.5$ kips             | 0.62 |
| 3                                 |                  | Bolt Slip                                | $R_n = 166$ kips               | $R_u = 332$ kips              | 0.50 |
| 4                                 |                  | Beam Flange Block Shear                  | $\phi R_n = 436$ kips          | $R_u = 332$ kips              | 0.76 |
| 5                                 |                  | Beam Plastic Hinge                       | $\phi M_{pb} = 7200$ k-in      | $M_2 = 6253$ k-in             | 0.87 |
| 6-1                               |                  | Beam Local Buckling Check - 1            | $\lambda_p = 9.15$             | $\lambda_{flange} = 6.7$      | OK   |
| 6-2                               |                  | Beam Local Buckling Check - 2            | $\lambda_p = 90.55$            | $\lambda_{web} = 46.9$        | OK   |
| 7                                 | Beam             | Beam Shear                               | $\phi V_n = 252$ kips          | $V_u = 94$ kips               | 0.37 |
| 8                                 |                  | Shear Tab Net Section Rupture            | $\phi V_n = 48.7$ ksi          | $V_u = 15.1$ ksi              | 0.31 |
| 9                                 | Column           | Strong Column-Weak Beam                  | $\Sigma M^*_{pc} = 12760$ k-in | $\Sigma M^*_{pb} = 7491$ k-in | 0.59 |
| 10                                |                  | Column Width-Thickness Check             | $\lambda_{hd} = 7.22$          | $\lambda_{flange} = 6.97$     | OK   |
| 11                                | Fuse Plate       | Fuse Yielding                            | $\phi R_n = 84$ kips           | $R_u = 0$ kips                | 0.00 |
| 12                                |                  | Fuse Plate Fracture through Fuse         | $\phi R_n = 82$ kips           | $R_u = 0$ kips                | 0.00 |
| 13                                |                  | Fuse Plate Net Section Shear Rupture     | $\phi R_n = 490$ kips          | $R_u = 332$ kips              | 0.68 |
| 14-1                              |                  | Fuse Plate Net Section Tensile Rupture-1 | $\phi P_n = 310$ kips          | $P_u = 133$ kips              | 0.43 |
| 14-2                              | Top Plate        | Fuse Plate Net Section Tensile Rupture-2 | $\phi P_n = 137$ kips          | $P_u = 133$ kips              | 0.97 |
| 15-1                              |                  | Top Plate Net Section Rupture-1          | $\phi R_n = 212$ kips          | $R_u = 186$ kips              | 0.88 |
| 15-2                              | Bar              | Top Plate Net Section Rupture-2          | $\phi P_n = 76$ kips           | $P_u = 74$ kips               | 0.98 |
| 16-1                              |                  | Bar Block Shear-1                        | $\phi P_n = 133$ kips          | $P_u = 111$ kips              | 0.84 |
| 16-2                              |                  | Bar Block Shear-2                        | $\phi P_n = 152$ kips          | $P_u = 149$ kips              | 0.98 |
| 16-3                              |                  | Bar Block Shear-3                        | $\phi P_n = 237$ kips          | $P_u = 186$ kips              | 0.79 |
| 16-4                              |                  | Bar Block Shear-4                        | $\phi R_n = 170$ kips          | $R_u = 149$ kips              | 0.88 |
| 16-5                              |                  | Bar Block Shear-5                        | $\phi R_n = 219$ kips          | $R_u = 186$ kips              | 0.85 |
| 17                                | Cover Plate      | Bar Shear Along Weld                     | $\phi R_n = 270$ kips          | $R_u = 186$ kips              | 0.98 |
| 18                                |                  | Cover Plate Yielding                     | $\phi R_n = 216$ kips          | $R_u = 166$ kips              | 0.77 |
| 19                                |                  | Cover Plate Local Buckling Check         | $T_1 = 0.5$ in                 | $T_{req} = 0.3592$ in         | OK   |
| 20                                | Weld             | Bar-to-Cover Plate Weld Tearing          | $\phi r_n = 27.8$ k/in         | $r_u = 27.0$ k/in             | 0.97 |
| 21                                |                  | Cover Plate-to-Flange Weld Tearing       | $\phi r_n = 20.8$ k/in         | $r_u = 13.2$ k/in             | 0.64 |
| 22                                |                  | Shear Tab Weld Failure                   | $\phi R_n = 290$ kips          | $R_u = 273$ kips              | 0.94 |
| 23                                |                  | Bridge Plate-to-Cover Plate Weld Failure | N/A                            | N/A                           | N/A  |
| 24                                | Misc. Plate      | Bridge Plate-to-Flange Weld Failure      | N/A                            | N/A                           | N/A  |
| 25                                |                  | Shear Tab-to-Bridge Plate Weld Failure   | N/A                            | N/A                           | N/A  |
| 26                                | Misc. Check      | Shear Plate Shear Failure                | N/A                            | N/A                           | N/A  |
| 27                                |                  | Bridge Plate Tension Failure             | N/A                            | N/A                           | N/A  |
| KS                                | Misc. Check      | Connection Stiffness Check               | $K_S = 4878466$ k-in           | $K_{req} = 1928500$ k-in      | OK   |
| PZ                                |                  | Rigid Panel Zone Assumption Check        | $\beta_{PZ} = 7164970$ k-in    | $K_{req} = 6428333$ k-in      | OK   |
| Controlling Demand-Capacity Ratio |                  |                                          |                                |                               | 0.98 |

La conexión debe ser capaz de desarrollar la resistencia a flexión de la trabe. Es decir, las vigas deben desarrollar deformaciones plásticas importantes (fluencia por flexión) y la conexión debe alcanzar el momento máximo esperado,  $M_{pr}$ , en las zonas donde se forman las articulaciones plásticas en ambos extremos de ella (zonas protegidas).

Los resultados experimentales deben demostrar que los especímenes de prueba pueden desarrollar una rotación inelástica no menor de 0.03 o 0.04 radianes para que califiquen.

El momento plástico resistente cuando los especímenes desarrollan 0.04 radianes debe ser el 80% del momento plástico de la trabe,  $M_p = F_y Z_x$ .

Las trabes son la primera línea de defensa (vigas débiles), las columnas son más fuertes que ellas y las conexiones son infalibles.

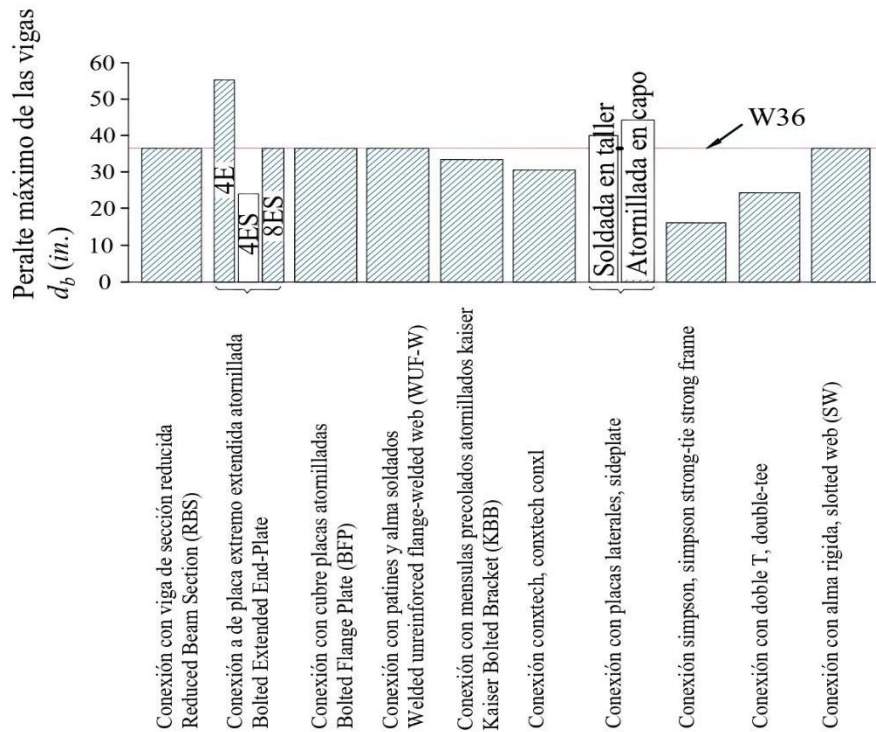
Las vigas se plastifican y las columnas permanecen elásticas. Las columnas exhiben poco daño y las trabes son los elementos de sacrificio.

1. Lazos histeréticos amplios y estables con gran disipación de energía.
2. Comportamiento con deterioro de capacidad de disipación de energía.
3. Comportamiento con deterioro de la resistencia.

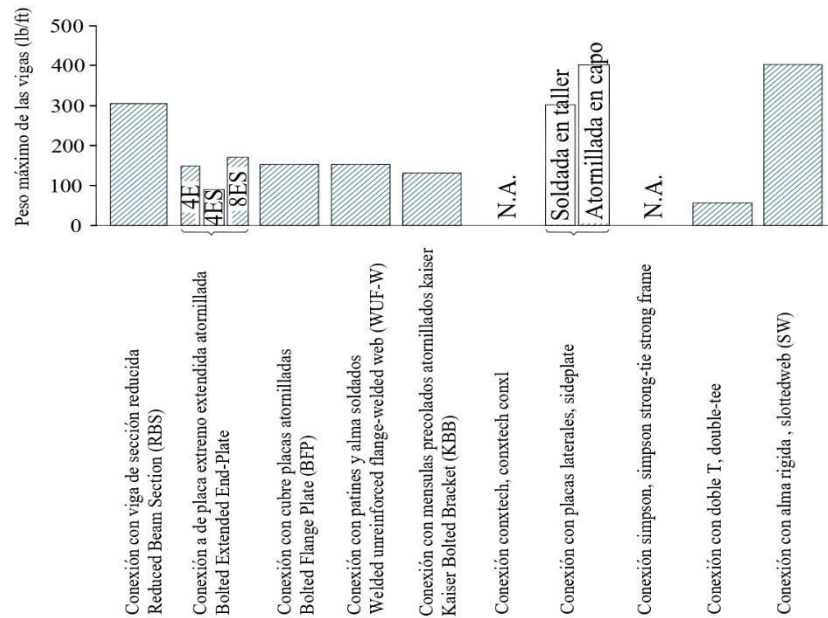
Las conexiones inteligentes deben ser capaces de soportar sin ningún daño las demandas de rotación ocasionadas por sismos intensos (conexiones libres de daño).

Nunca deben diseñarse con resistencias menores que la de los miembros que unen (trabes y columnas). Se diseñan con la capacidad máxima de la viga (momento máximo probable).

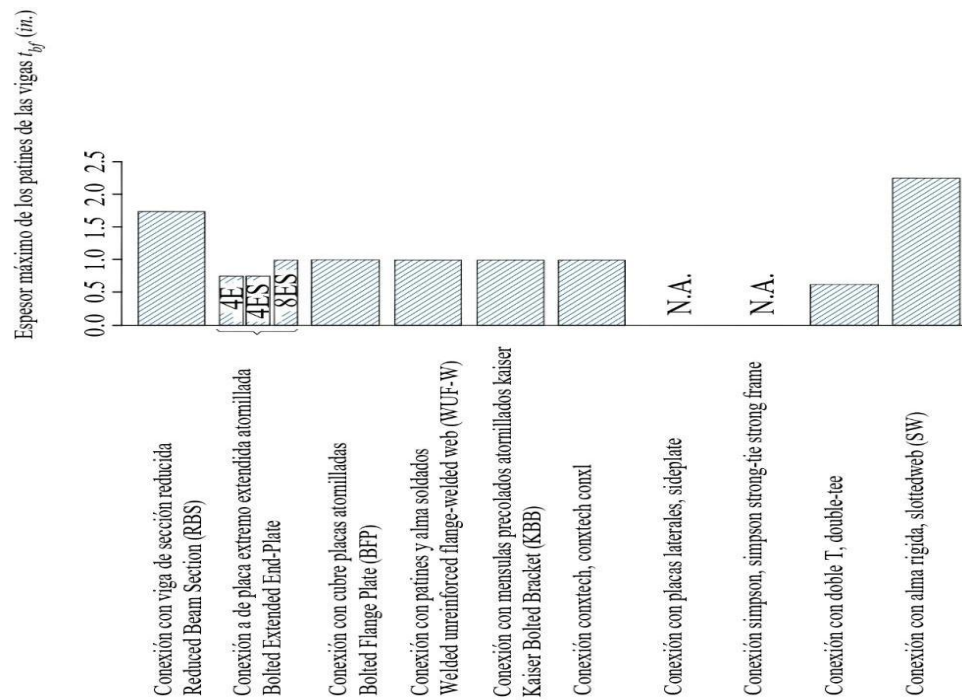
Fluencia por flexión (articulaciones plásticas en la zona protegida) y pandeo local de patines de la trabe y fractura de patines de conexiones trabe (I) - columna HSS. Los daños en las conexiones ocurren en la trabe y no en la columna. Los requisitos de las conexiones calificadas obligan al estructurista a proponer una configuración predeterminada. De no cumplir con las limitaciones de dimensiones, pesos, relaciones claro/peralte, la unión propuesta no se considera precalificada.



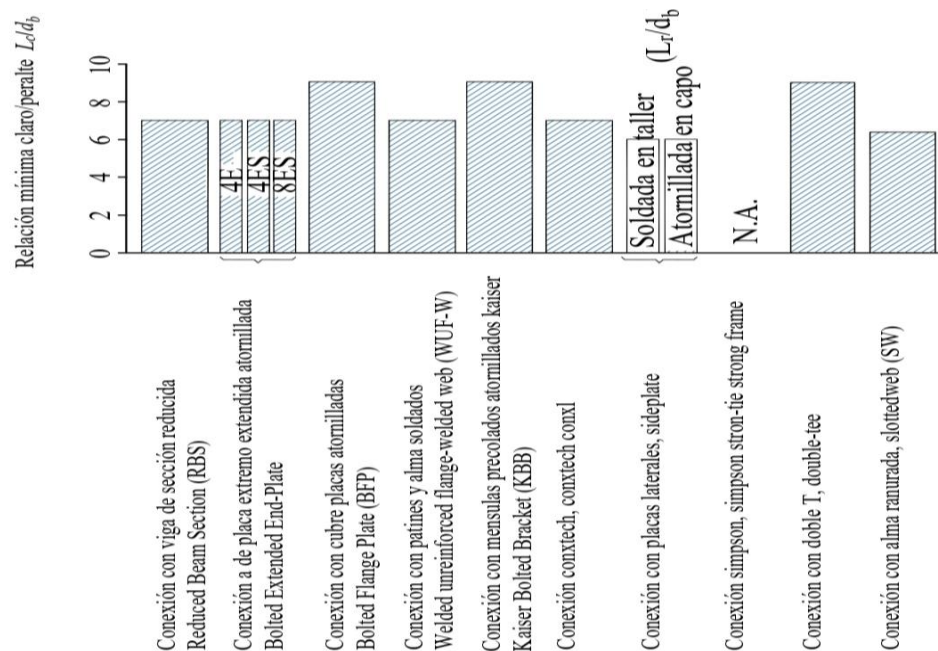
**Figura 15.** Peralte máximo de las vigas  $d_b$  (in). Imagen cortesía del Dr. Chia Ming Uang, Profesor investigador Universidad de San Diego, La Jolla, California.



**Figura 16.** Peso máximo de las vigas (lb/ft). Imagen cortesía del Dr. Chia Ming Uang, Profesor investigador Universidad de San Diego, La Jolla, California.



**Figura 17.** Espesor máximo de los patines de las vigas,  $t_{bf}$  (in) de las conexiones trabe-columna precalificadas. Imagen cortesía del Dr. Chia Ming Uang, Profesor investigador Universidad de San Diego, La Jolla, California.



**Figura 18.** Relación mínima claro/peralte,  $L_b/d_b$ . Imagen cortesía del Dr. Chia Ming Uang, Profesor investigador Universidad de San Diego, La Jolla, California.

#### 4. EXPERIENCIA DEL AUTOR EN PRUEBAS EXPERIMENTALES

Derivado de la primera etapa del proyecto de investigación doctoral denominado “Metodología para la evaluación del comportamiento sísmico de conexiones trabe-columna de acero estructural en zonas de alta sismicidad” que está desarrollando el autor se presentan los resultados obtenidos del ensaye del prototipo de una conexión trabe-columna de acero para marcos rígidos de ductilidad elevada MRDE diseñada para la zona del lago de la Ciudad de México, denominada CTC-1.

La Figura 16 muestra el espécimen CTC-1 diseñado y fabricado con base en las condiciones de una estructura real de un edificio de acero ubicado en zonas de alta sismicidad de la Ciudad de México, estructurado a base de marcos rígidos de ductilidad media ( $Q = 3$ ) y alta ( $Q = 4$ ).

Los materiales, los perfiles laminados estructurales, la conexión trabe-columna, el detallado de la misma satisfacen los requisitos estipulados en el Capítulo 11 CONEXIONES de la norma NTC-DCEA-2023 y de las especificaciones internacionales (AISC 341-22, AISC 358-22, AISC 360-22, etc.). Las longitudes de la columna por arriba y por debajo de la conexión corresponde a la ubicación de los puntos de inflexión del diagrama de momento flexionante ocasionado por las acciones accidentales (sismo principalmente) en el sistema estructural a base de marcos rígidos de ductilidad media ( $Q = 3$ ) y alta ( $Q = 4$ ).



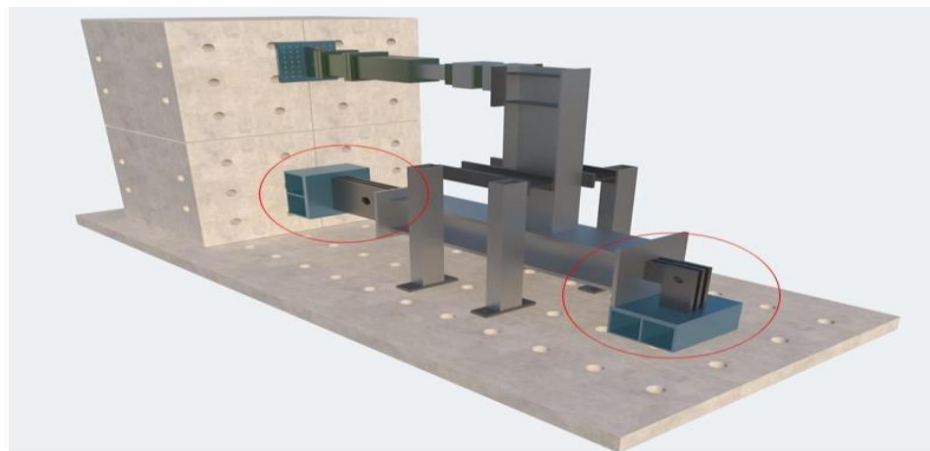
**Figura 19.** Fabricación de especímenes trabe-columna en taller certificado BAYSA. Imagen propia.

El diseño se ha hecho conforme a las recomendaciones de la norma AISC 358-22. Adicionalmente, se ha cumplido con el Capítulo 11, *Conexiones*, de la Norma Técnicas Complementarias de Diseño y Construcción de Estructuras de Acero para el Distrito Federal, NTC-DCEA-2023, siguiendo el criterio de “columna fuerte-viga débil”, el cual busca que la falla se presente en la viga, de forma tal que se puedan alcanzar altos niveles de disipación de energía durante la aplicación de cargas sísmicas intensas.

El montaje de los especímenes trabe-columna en un laboratorio de estructuras para la ejecución de las pruebas experimentales puede realizarse de varias maneras. La Figura 17 ilustra el prototipo en forma de Te invertida (trabe conectada en un solo lado de la columna).

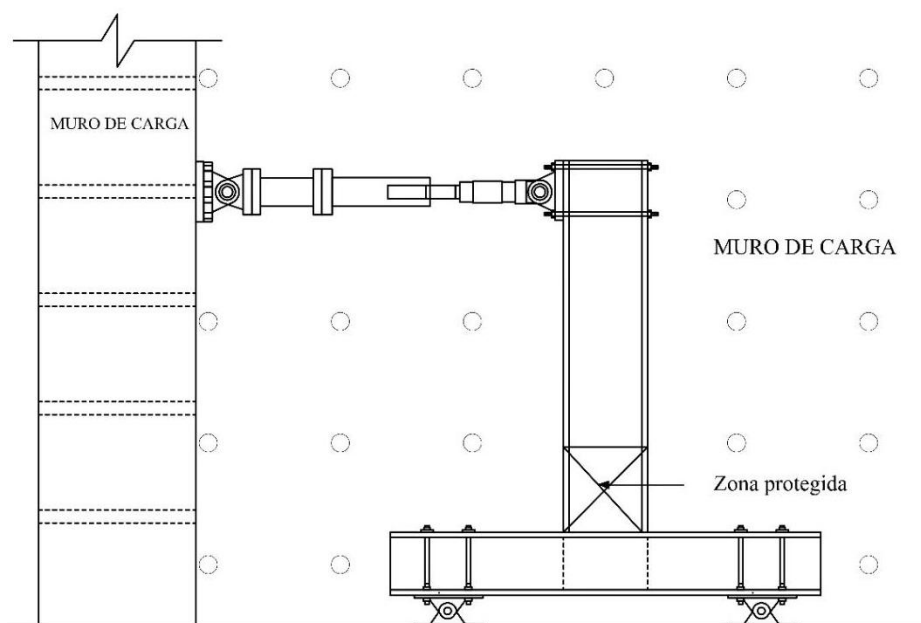
La columna está acostada, libremente apoyada en sus dos extremos por medio de articulaciones tipo rótulas y la trabe está conectada rigidamente a ella con soldaduras de demanda crítica y una placa vertical simple, para que la junta pueda resistir las cargas laterales cíclicas reversibles impuestas por el actuador hidráulico.

Se observa que las rótulas se conectan en un extremo a la losa de piso y la otra al muro de reacción. El autor considera que es conveniente apoyar ambos extremos a la losa de piso para evitar “ruido” en los resultados de las pruebas debido a la asimetría de dichos apoyos.



**Figura 20.** Montaje de prototipos trabe columna en el laboratorio de estructuras grandes del CENAPRED, Ciudad de México. Imagen propia.

La Figura 21 muestra el mismo prototipo que el de la figura anterior, con la diferencia de que los dos apoyos articulados de la columna acostada están unidos a la losa de piso de la estructura de reacción.



**Figura 21.** Montaje de prototipo trabe-columna. Imagen cortesía del Ing. Mauricio Vaca, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Consejo de Posgrado UCE, Ecuador.

Durante el montaje del espécimen se tuvo cuidado especial en las dimensiones de la estructura de reacción para lograr la precisión requerida. La estructura amarilla, a base de marcos planos unidos con tirantes de la Figura 19 proporciona soporte lateral en el espécimen para evitar el pandeo lateral por flexotorsión de la viga.





Figura 24. Instrumentación local de prototipo trabe-columna. Imagen propia.

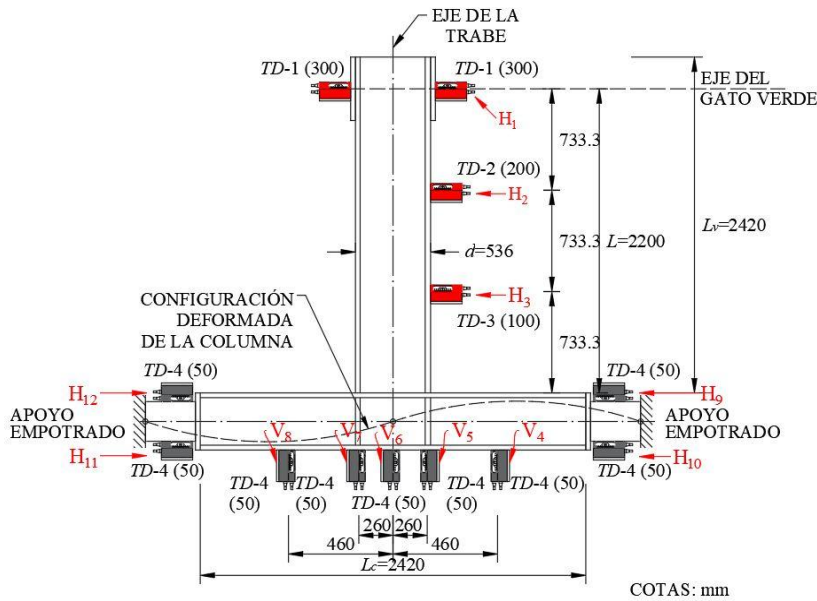


Figura 25. Colocación de galgas extensométricas y transductores de desplazamiento en el espécimen CTC-1. Imagen propia.

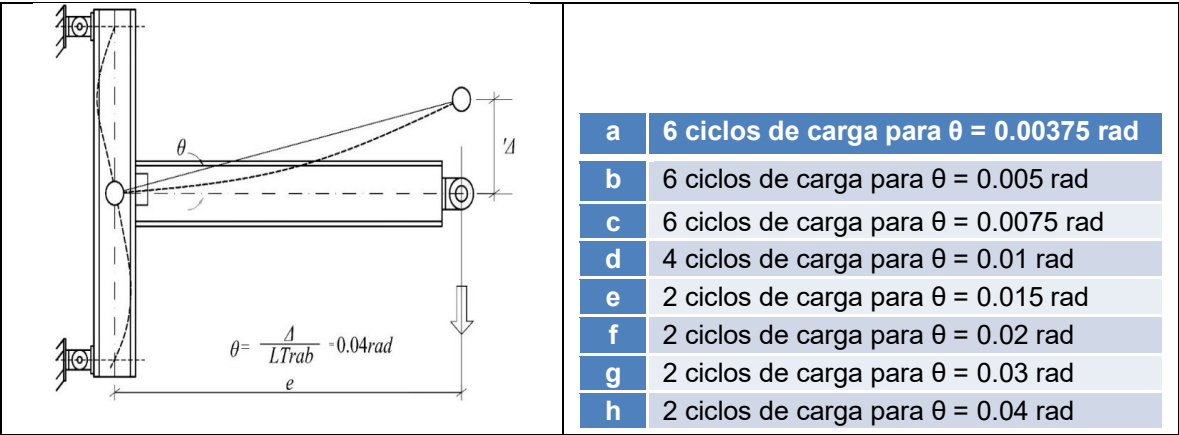


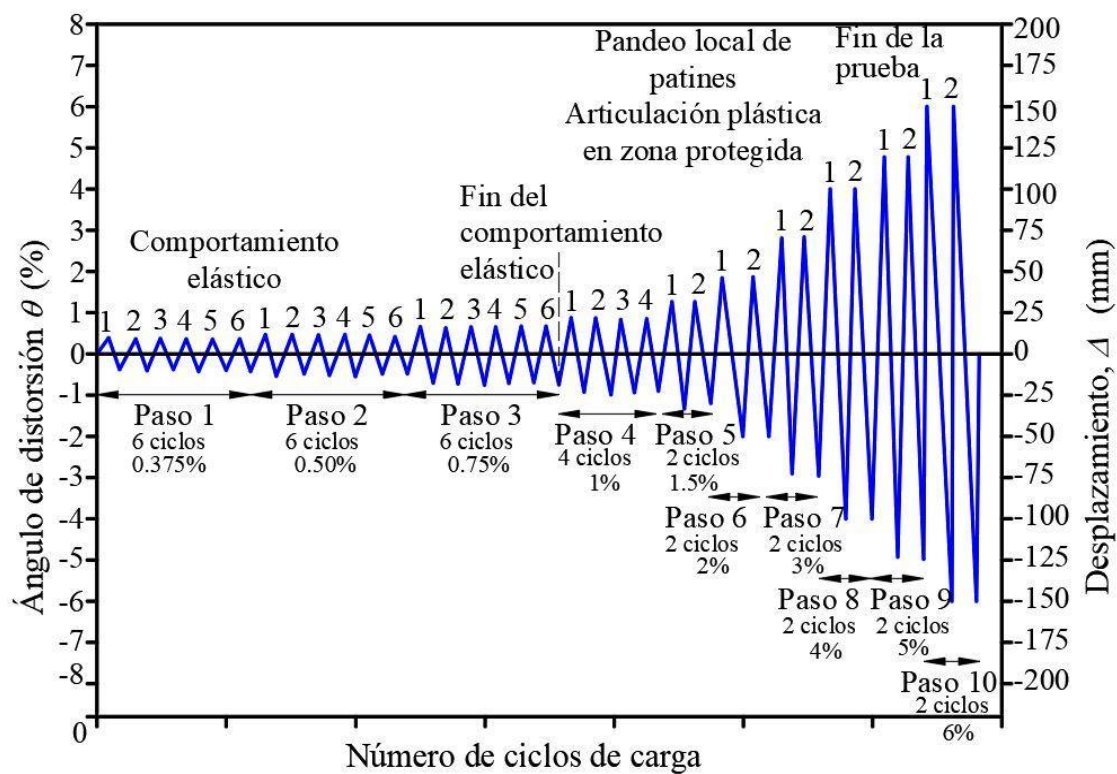
Figura 26. Rotación angular esperada del espécimen CTC-1.

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos de la prueba en la última etapa de aplicación de la carga lateral cíclica reversible inducida al espécimen CTC-1.

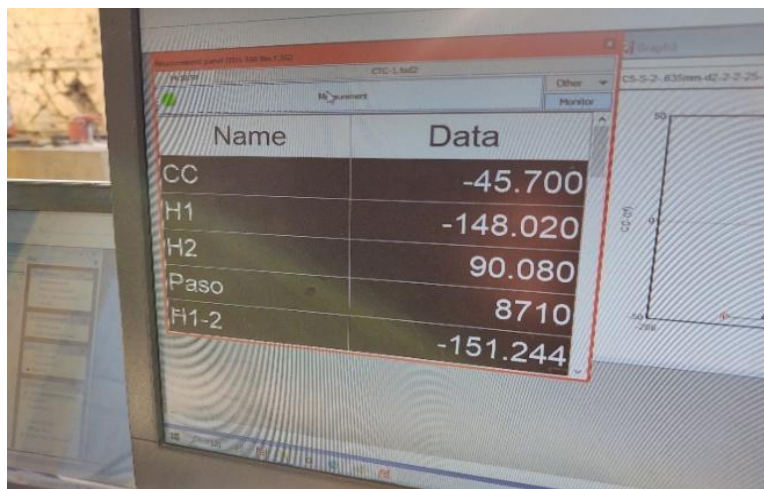
**Tabla 3.** Bitácora de datos recolectados durante la ejecución de la prueba experimental. Figura propia.

| Paso | Número de ciclos de carga | Rotación $\theta$ (radianes) | Carga cíclica reversible P (t) | Desplazamiento en el extremo de la trabe $\Delta$ (mm) | Comentarios                                                                                                                                                         |
|------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7    | 1                         | 0.03                         | 37.325                         | 73.62                                                  | Pico. Inicio de pandeo local de patines de la trabe.                                                                                                                |
|      |                           | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | -0.03                        | 40                             | -73.62                                                 | Pico. Se interrumpe la prueba experimental. Paso = 6782.                                                                                                            |
|      | 2                         | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | 0.03                         | 38.1                           | 73.62                                                  |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | -0.03                        | 40.55                          | -73.62                                                 | Se perciben fisuras en las soldaduras de filete del apoyo fijo de la columna adyacente al muro de reacción.                                                         |
| 8    | 1                         | 0                            | 0                              | 0                                                      | No hay evidencias de daños severos en las partes de la conexión CTC-1.                                                                                              |
|      |                           | 0.04                         | 40.05                          | 98.16                                                  |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | -0.04                        | 42.825                         | -98.16                                                 | Se hace evidente el desprendimiento de pintura en los patines de la trabe. Paso = 8079.                                                                             |
|      | 2                         | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | 0.04                         | 40.92                          | 98.16                                                  |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | -0.04                        | 43.35                          | -98.16                                                 | Durante las pruebas experimentales la bomba se calentó y se interrumperon los ensayos en dos ocasiones.                                                             |
| 9    | 1                         | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | 0.05                         | 42                             | 122.7                                                  | Se advierte fractura severa en el agujero de acceso para soldar en el patin inferior de la viga. Paso = 8079.                                                       |
|      |                           | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | -0.05                        | 45.175                         | -122.7                                                 | Se produce fractura en una de las soldaduras de filete horizontal que unen las placas del apoyo fijo de la columna adyacente al muro de reacción.                   |
|      | 2                         | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | 0.05                         | 42.525                         | 122.7                                                  | Por razones de seguridad se apoyó el modelo con la grúa.                                                                                                            |
|      |                           | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | -0.05                        | 45.375                         | -122.7                                                 |                                                                                                                                                                     |
| 10   | 1                         | 0                            | 0                              | 0                                                      |                                                                                                                                                                     |
|      |                           | 0.06                         | 44.125                         | 147.24                                                 | Fin de la prueba debido a la fractura de las soldaduras de filete en rótula adyacente a muro de reacción. Paso = 8476.                                              |
|      |                           | 0                            | 0                              | 0                                                      | La fractura del agujero se hizo más grande: Ancho igual a 4.0 mm y largo 2 cm.                                                                                      |
|      |                           | -0.06                        | 45.9                           | -147.24                                                | Se advierte distorsión en la zona del panel de la columna. La carga reversible es de 45.90 t, con un desplazamiento de 147.24 mm y una distorsión del 6 por ciento. |

De acuerdo con el Dr. James Swanson, los resultados de la prueba experimental muestra que la conexión alcanzó dos ciclos al 4% de rotación y casi un ciclo completo al 6% de rotación antes de que se interrumpiera la prueba, lo cual es bastante bueno.

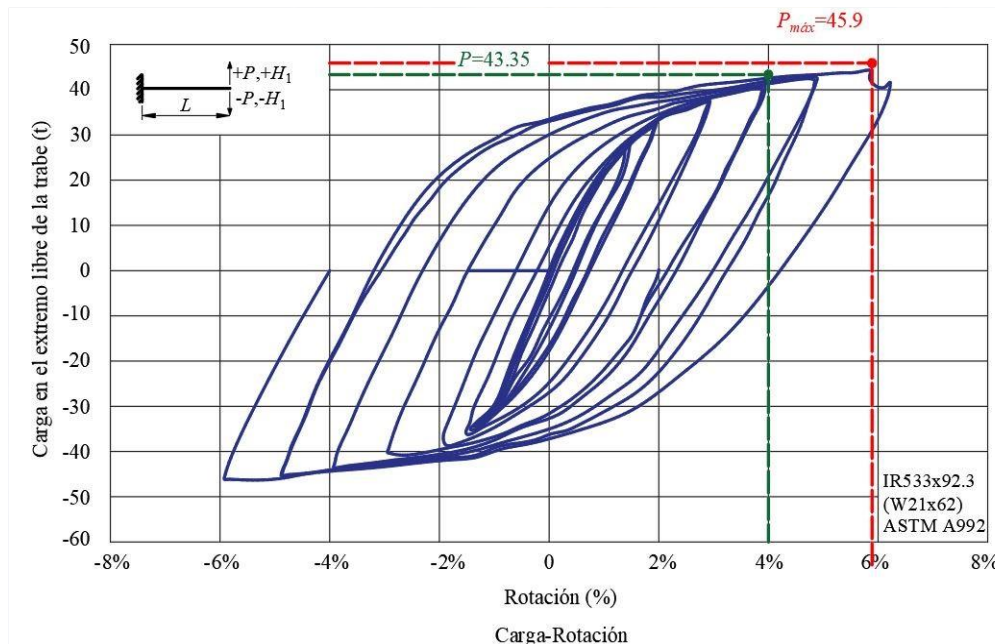


**Figura 27.** Protocolo de carga en función del comportamiento y de los daños esperados en los especímenes trabe-columna de prueba. Imagen propia.



**Figura 28.** Fin de la prueba experimental del prototipo CTC-1. Imagen propia.

La prueba se interrumpió por la fractura de las soldaduras de filete del apoyo empotrado de la columna A (muro de reacción). El espécimen CTC-1 desarrolló buena disipación de energía hasta una rotación de 0.04 radianes. Los lazos histeréticos de la curva momento rotación son estables, con amplia ductilidad, sin pérdida de resistencia y rigidez.



**Figura 29.** Carga lateral cíclica reversible versus desplazamiento lateral del extremo libre de la trabe. Imagen propia.

Las curvas de histéresis de la Figura 29 muestran rotaciones del 6%. El espécimen al final del ensaye tuvo daño moderado. Parece ser que hubo otra fuente de disipación de energía impartida en la conexión: los apoyos fijos de la columna A y B.

De acuerdo con la revisión efectuada por el Maestro Jesús Iglesias Jiménez, dos veces Premio Nacional de Ingeniería otorgados por el Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM), los resultados observados durante la primera prueba de laboratorio del espécimen CTC-1 son muy relevantes.

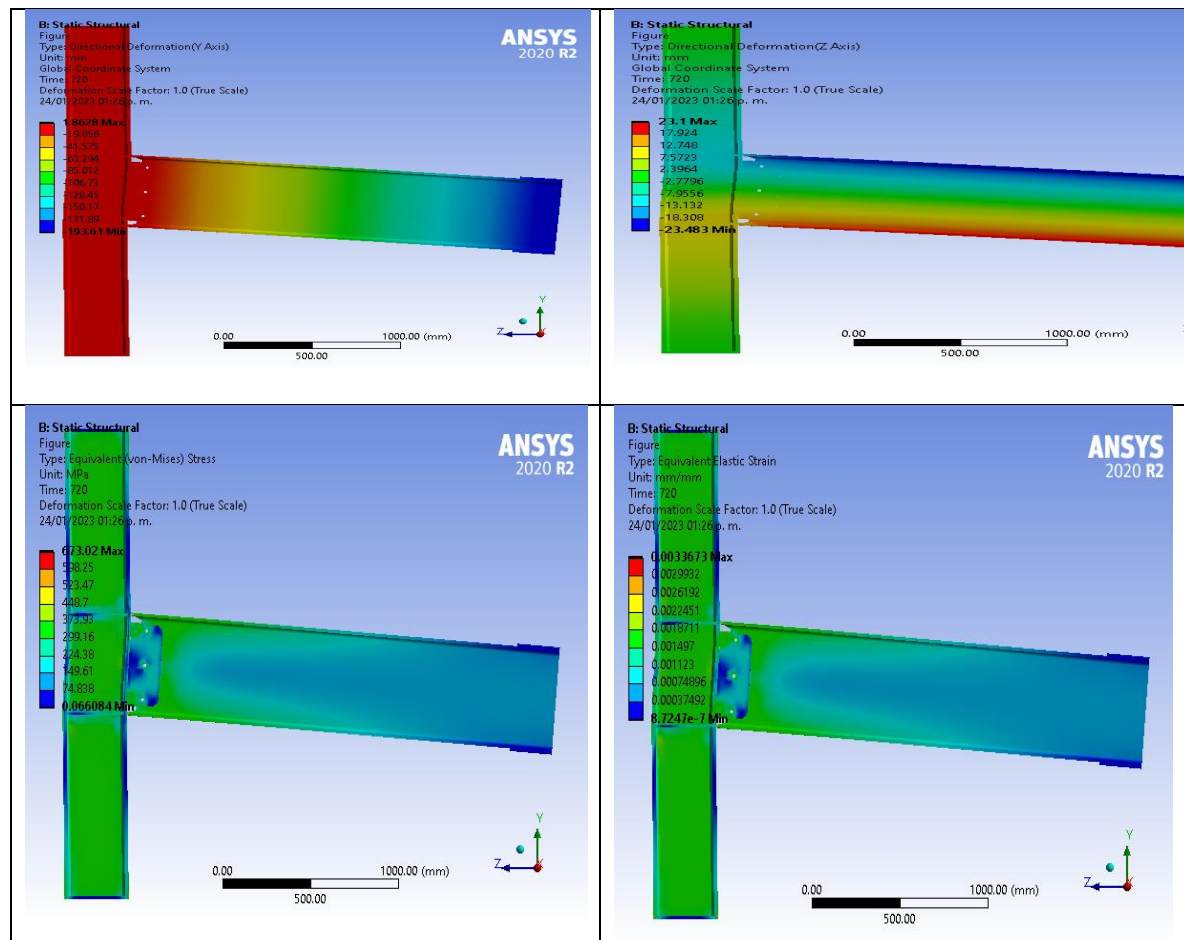
En primer lugar, la mayor disipación de energía ocurrió en la zona del panel de la columna y no en la zona protegida de la viga. Es decir, no se cumplió el criterio de “columna fuerte - viga débil”, aun cuando se haya cumplido el criterio de aceptación por disipación de energía de la norma NTC-DCEA-2023.

Por otra parte, se presentó una fractura prematura en el agujero de acceso de la soldadura en el patín inferior de la trabe que, al menos en esta ocasión, no produjo un modo de falla severo. Estos dos resultados ponen en tela de juicio el objetivo conceptual del anteproyecto de la norma NTC-DCEA-2023.

## 5. PROGRAMAS DE COMPUTADORA DE USO COMÚN PARA EL DISEÑO DE CONEXIONES PRECALIFICADAS TRABE-COLUMNNA

Actualmente se dispone de un gran número de programas de computadora para modelar, analizar y diseñar conexiones trabe-columna precalificadas, que se basan en la teoría de elementos finitos (FEM). Entre estas herramientas se encuentran: ANSYS R20, IdeaStatica, SAP2000V25, Abaqus, Robot, entre otras.

## 5.1 Aplicación del programa ANSYS R20

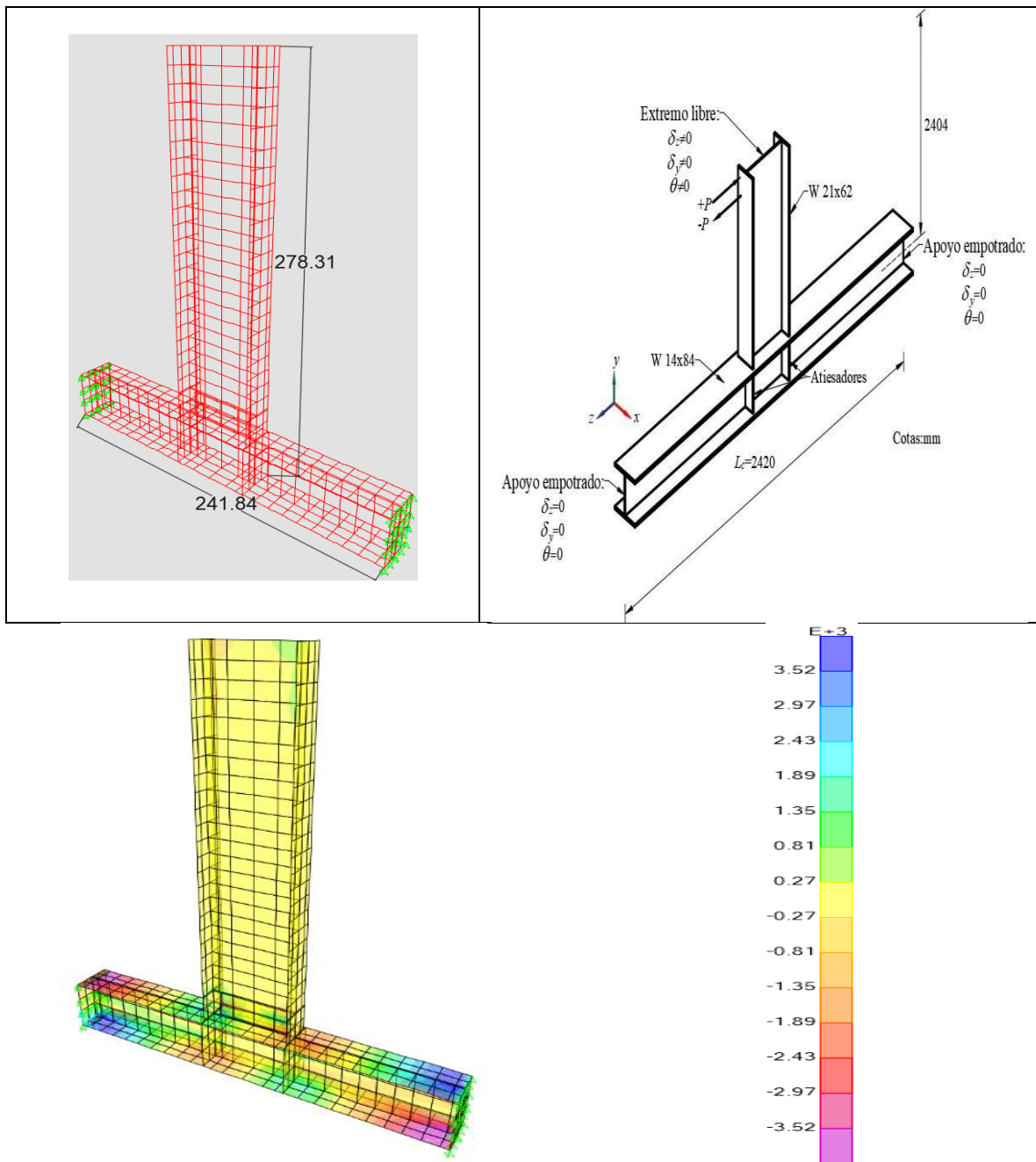


**Figura 30.** Resultados de la simulación numérica realizada con el programa ANSYS R20. Imagen propia.

Se logró un mallado refinado con una calidad de 0.744. El mallado es más denso en la zona de interés (conexión). La figura anterior muestra que al final de la prueba, los esfuerzos máximos ocurren en el panel de la columna y en las soldaduras de demanda crítica.

## 5.2 Resultados del programa SAP2000V25

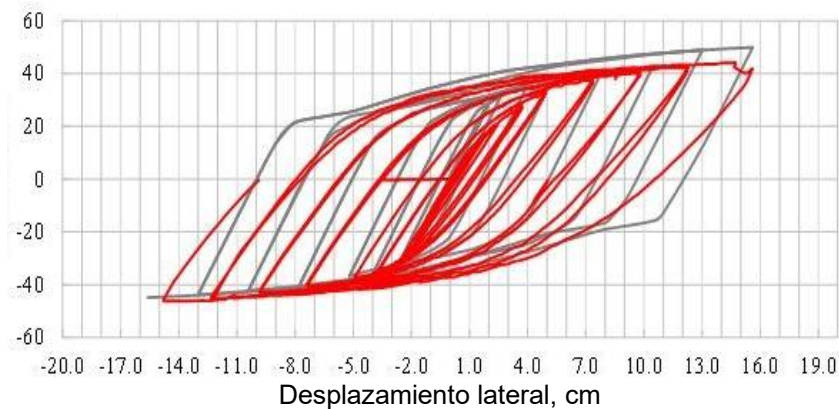
Se modeló el espécimen CTC-1 con el programa SAP2000v25 y se obtuvieron los siguientes resultados.



**Figura 31.** Modelado de conexión propuesta por el autor con el programa SAP2000v25. Grados de libertad, figura superior derecha. Imagen propia.

En la Figura 29 se muestra la correlación del modelo AENL-SAP2000 (gris) con la prueba experimental (rojo). La correlación indica que hay una diferencia entre las pendientes de los lazos histeréticos de las dos curvas de histéresis.

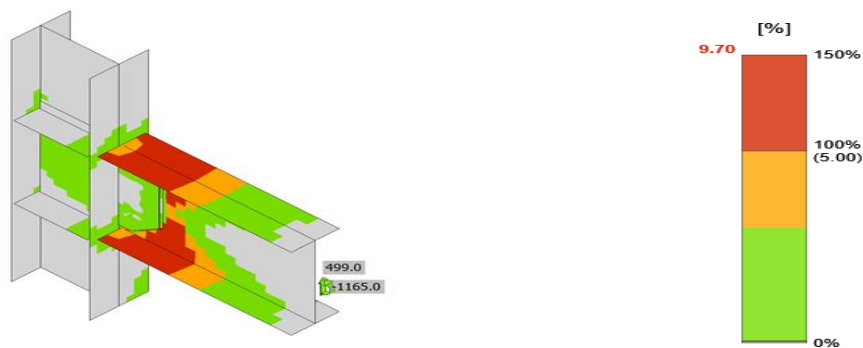
De acuerdo con el Dr. Eduardo Miranda Mijares, Profesor de la Universidad de Stanford, California, la curva gris del SAP2000 captura relativamente bien los siguientes aspectos: Resistencia en flexión y el endurecimiento por deformación.



**Figura 32.** Superposición curva histerética carga reversible versus desplazamientos versus curva SAP2000. Imagen propia.

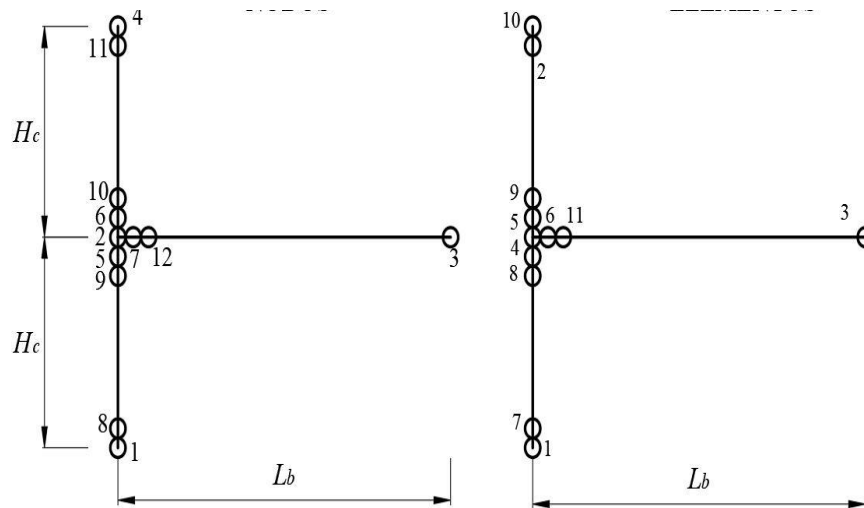
Pero no así los otros aspectos que se indican a continuación: Rigidez. El modelo de SAP2000 es mucho más rígido que la curva experimental y el efecto Bauschinger. El modelo SAP2000 tiene mucho menor efecto que la curva experimental. Consecuentemente, se recomienda ajustar los parámetros del modelo numérico para capturar mejor los cuatro aspectos y acercarlo a los resultados de las pruebas experimentales.

### 5.3 Uso del programa IdeaStatica

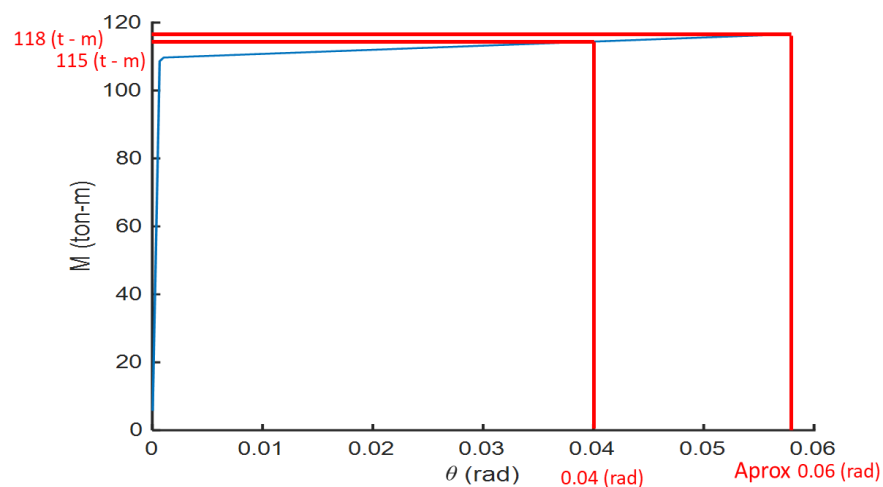


**Figura 33.** Modelado de conexión trabe-columna propuesta por el autor con el programa IdeaStatica. Imagen propia.

#### 5.4 Aplicación del programa OpenSees

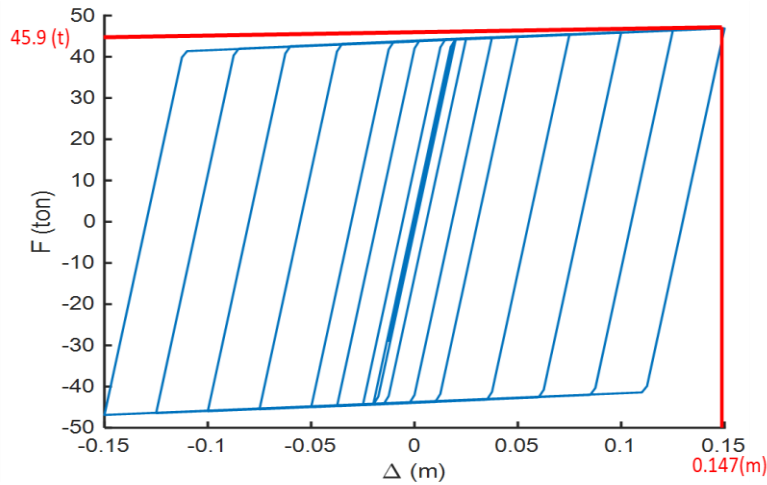


**Figura 34.** Numeración de barras y elementos OpenSees en el espécimen CTC-1. Imagen propia.



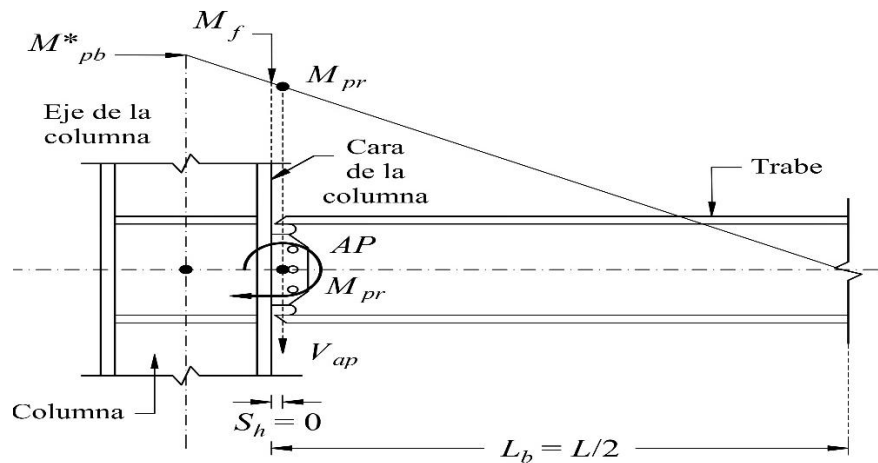
**Figura 35.** Curva Momento vs rotación del espécimen CTC-1 determinada con el programa Opensees. Imagen propia.

La curva 35.  $M-\theta$  indica que para una rotación de 0.04 rad., asociada a un desplazamiento de 98.2 mm y una carga lateral de 43.35 t (Paso 8), el momento resistente de la conexión es de 115 t-m, mayor que el 80% del momento plástico de la trabe desarrollado en la cara de la columna ( $0.8M_p = 66.4$  t-m).

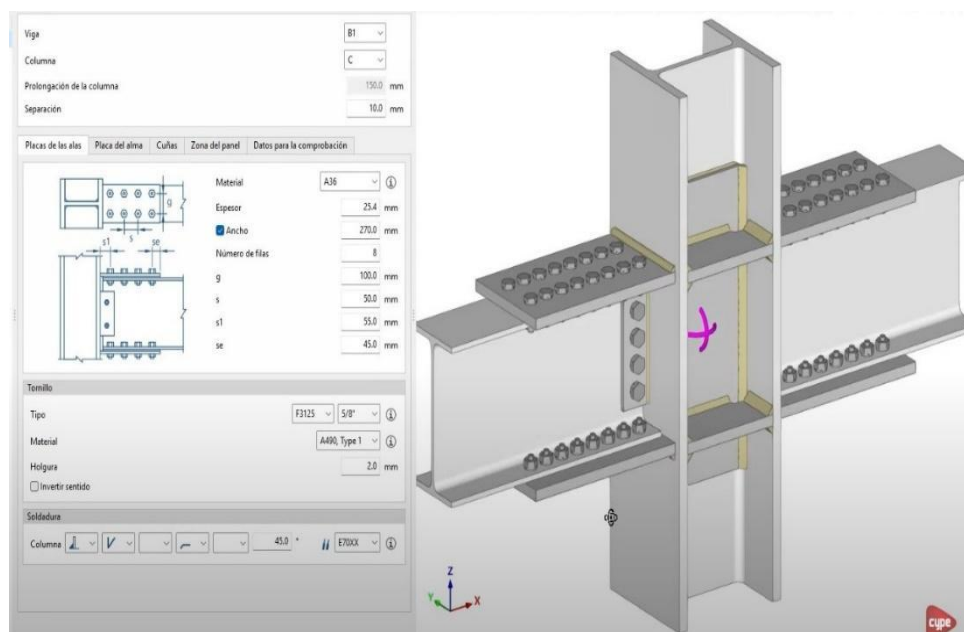


**Figura 36.** Gráfica Carga lateral aplicada en el extremo libre de la viga contra desplazamiento obtenida con el programa OpenSees. Imagen propia.

En la curva de la Figura 33,  $F$ -  $\Delta$ , se observa la carga de falla,  $P = 45.9$  t, asociada a una rotación de 0.06 rad. El desplazamiento del extremo libre de la viga es de 14.7 mm. Los parámetros del modelo matemático OpenSees deben ajustarse a los resultados obtenidos de las pruebas experimentales para representar las condiciones reales. Los resultados generados con OpenSees demuestran un comportamiento satisfactorio bajo demandas cíclicas intensas con buena disipación de energía. Los lazos histeréticos son muy estables, con elevada ductilidad, sin pérdida de resistencia y rigidez lo que es característico de las conexiones diseñadas con requisitos estrictos apegados a las normas de diseño (NTC-DCEA-2023, AISC 358-22, AISC-341-22, etc.).



**Figura 37.** Ilustración de los momentos  $M^*_{pb}$ ,  $M_f$  y  $M_{pr}$  de una conexión trabe-columna prefabricada. Imagen cortesía del Dr. Chia Ming Uang, Profesor investigador Universidad de San Diego, La Jolla, California.



**Figura 38.** Diseño de conexiones precalificadas con CYPE Connect y StruBIM Steel. Motor de diseño: programa Opensees. Imagen cortesía del Ing. Luis Fernando Castellón Terán.

Los resultados obtenidos de las pruebas experimentales se comparan con los de los modelos analíticos ANSYS, SAP2000, OpenSees y CYPE Connect y StruBIM Steel para confirmar su correlación y consistencia.

## 6. REFLEXIONES Y RECOMENDACIONES:

### 1. Adaptabilidad técnica de las conexiones precalificadas al contexto latinoamericano

**Amplio respaldo experimental y analítico.** Las conexiones precalificadas incluidas en el anteproyecto de la Especificación AISC 358-27 ofrecen soluciones con desempeño sísmico comprobado que pueden ser algunas, no todas, adaptadas al diseño en zonas de alta sismicidad en América Latina.

**Compatibilidad con normas locales.** Aunque el anteproyecto de la norma AISC 358-27 está basado en el código estadounidense (ASCE 7, AISC 341, etc.), puede armonizarse con normas latinoamericanas como el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México (RCDF), la NTC-Chile, o la Norma Técnica Colombiana (NSR-10), Ecuador (NEC), mediante ajustes en factores sísmicos, diseño por capacidad y criterios de ductilidad.

### 2. Factibilidad constructiva y económica

**Disponibilidad de perfiles y materiales.** La implementación es viable en regiones donde se dispone de perfiles laminados tipo I (o equivalentes IS) y tornillos de alta resistencia ASTM A325 (Grupo A) o A490 (Grupo B), aunque en algunos países podría requerirse importar ciertos insumos o establecer acuerdos de fabricación local.

**Exigencias de calidad en fabricación y montaje:** La correcta adecuación y aplicación de estas conexiones precalificadas, particularmente las más complejas, requiere niveles

avanzados en ingeniería estructural y sísmica, control de calidad, soldadura certificada y experiencia técnica que no siempre están disponibles en todos los países de la región. Esto podría limitar su uso a zonas urbanas o a empresas especializadas.

### 3. Consideraciones sísmicas y de desempeño

**Desempeño confiable en zonas de alta sismicidad:** Las conexiones precalificadas AISC 358-27 han sido desarrolladas para soportar grandes demandas de deformación inelástica, lo cual es fundamental en zonas de alta sismicidad como Chile, Colombia, Ecuador, México, Venezuela y otros países de Centroamérica.

**Reducción de incertidumbre en el diseño:** El anteproyecto de la Especificación AISC 358-27 proporciona modelos de comportamiento y criterios de aceptación validados, lo que puede reducir la necesidad de ensayos experimentales adicionales, siempre que se cumplan estrictamente los requisitos de fabricación y detalle.

### 4. Requisitos de validación y homologación

**Necesidad de ensayos de verificación en el contexto local:** Aunque son “precalificadas”, algunos países podrían exigir pruebas experimentales de laboratorio adicionales o validaciones bajo condiciones locales (sismicidad, geotécnicas, etc.), antes de su aprobación en proyectos de infraestructura urbana estratégicos.

**Transferencia de conocimiento e ingeniería:** Para su adopción general, se requiere capacitar a los ingenieros estructurales, soldadores y supervisores, así como generar manuales y documentación técnica adaptada al idioma y a la normativa local.

### 5. Propuesta estratégica para su implementación

**Proyectos piloto y normativa regional:** Se recomienda impulsar proyectos piloto en universidades o asociaciones técnicas de ingenieros estructuristas para validar su aplicación y eventualmente generar guías o normas técnicas regionales de diseño y construcción que faciliten su uso.

**Evaluación costo-beneficio por tipo de obra:** Su uso puede ser altamente competitivo en edificios de mediana y gran altura, hospitales, infraestructura crítica y edificaciones industriales, donde el desempeño sísmico es prioritario.

## 7. CONCLUSIONES

El anteproyecto de la Especificación AISC 358-27 representa una herramienta robusta y altamente confiable para el diseño sismorresistente de conexiones rígidas trabe-columna de acero estructural y para impulsar la resiliencia sísmica en los países de la región.

Las conexiones rígidas trabe columna precalificadas por el comité CPRP del AISC deben ser evaluadas con especial cuidado para su utilización en nuestro medio, en vista de que las características de los sismos, prácticas de diseño y construcción, disponibilidad de materiales, costos de los materiales y de la mano de obra son diferentes a los de países de América Latina. En nuestra región existe la necesidad de abrir nuevas líneas de investigación en temas relacionados con el

comportamiento sísmico de las estructuras y conexiones de acero estructural, ya que estos estudios a la fecha en varios países de América Latina han sido incipientes.

## 8. AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento profundo a las siguientes personas que retroalimentan su proyecto de investigación doctoral:

Dr. Chia Ming Uang, Profesor Investigador de la Universidad de San Diego, La Jolla, California; el Dr. Michael D. Engelhardt, Profesor Emérito de la Universidad de Texas en Austin; Dr. James Swanson, Profesor Investigador de la Universidad de Cincinnati y presidente del comité CPRP del AISC; M.I. Jesús Iglesias Jiménez, dos Veces Premio Nacional de Ingeniería por el CICM; Dr. Ulises Mena Hernández, investigador del INEEL; Ing. Arnaldo Gutiérrez Rodríguez, exprofesor de la Universidad Católica Andrés Bello, de Venezuela e Ing. Luis Fernando Castellón Terán, Director General de Cameyo.

Al equipo de trabajo del CRDIC:

Mariel Santillán; Erika Paola Sánchez Mora; Alejandra Sánchez; Flor Violetta Rubio; Luis Gabriel López Alcaraz, Denilson Julian Aburto Zavala.

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

## 9. REFERENCIAS

Uang, C.-L. (2020, June 23). An overview of prequalified seismic moment connections in AISC 358 [Webinar]. SEAOSD.

Swanson, J. A. (2024, May 13, 15, 20, 21, 22, & 27). *Design of rigid connections and structural systems of steel buildings* [Virtual course]. Centro Regional de Desarrollo en Ingeniería Civil.

American Institute of Steel Construction. (2022a). *AISC 360-22: Specification for structural steel buildings*.

American Institute of Steel Construction. (2022b). *AISC 341-22: Seismic provisions for structural steel buildings*.

American Institute of Steel Construction. (2022c). *AISC 358-22: Prequalified connections for SMFs and IMFs for seismic applications*.