

Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año

1. Datos generales del Proyecto

Código del proyecto: 21090			
Título del proyecto: Conexión soldada implementando costillas como refuerzo en viga doble t - columna circular compuesta			
Facultad o Instituto Académico: Facultad de Ingeniería			
Departamento o Escuela: Escuela de Ingeniería Mecánica			
Grupo (s) de investigación: Grupo de Investigación en Fatiga y Superficies (GIFS).			
Entidades: Universidad del Valle; Pontificia Universidad Javeriana.			
Palabras claves: Conexiones viga-columna; Estructuras compuestas; Carga cíclica; Mecanismo de plastificación; Marcos especiales resistentes a momentos			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Albio Gutiérrez	110h/semestre	110h/semestre
	Jose Luis Ramírez Duque (Pontificia Universidad Javeriana Cali)	110h/semestre	110h/semestre
Coinvestigadores			
Otros participantes	Cristhian Ramírez, Gilberto Areiza Palma, Ruth E. Cano Buitron, Luis F. Gonzales Escobar	110h/semestre	110h/semestre

2. Resumen ejecutivo:

Es importante señalar que, debido a las afectaciones ocasionadas por la pandemia debido al cierre de la Universidad, y en particular, al cierre del laboratorio Marco de Pruebas para Homologaciones

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

(MaP-H) de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática y de la ausencia de los estudiantes, se solicitó la modificación de los objetivos inicialmente planteados en el proyecto. Esta solicitud fue aprobada el pasado 25 de mayo del 2021 (se adjunta el documento).

Este trabajo presenta los resultados de investigación del comportamiento sísmico de una conexión de viga de acero doble T y columna de tubo relleno de hormigón mediante diafragmas, de acuerdo con las pautas de diseño dadas por las normas AISC 341-16 y AISC 358-16. Se presentan los resultados de un estudio experimental que involucra cargas cíclicas de acuerdo con los estándares FEMA 350 para estructuras resistentes a terremotos. Los modos de falla, desempeño histerético, degradación de resistencia y rigidez, clasificación de rigidez y disipación de energía de esta configuración se estimaron en detalle para investigar el comportamiento sísmico. Los resultados experimentales indican que la viga de acero de doble T y la conexión de la columna de tubo de acero rellena de hormigón con diafragmas exhibe grandes bucles histeréticos, desarrolla ductilidad y capacidad de disipación. Las capacidades de rotación cumplieron con los requisitos de diseño de ductilidad sismorresistente de acuerdo con la normativa vigente. De esta manera, la conexión propuesta es adecuada para ser utilizada en estructuras especiales de pórticos de momento ubicadas en áreas de alta amenaza sísmica. Este estudio experimental permite mejorar el proceso de diseño de este tipo de conexiones.

Planteamiento del problema:

La viga de acero de doble T y conexión de columna tubular de acero con relleno de hormigón hace parte de los marcos estructurales de acero resistentes a momento (SMF, por sus siglas en inglés). A pesar de que este tipo de estructura es utilizada ampliamente en propuestas de aplicaciones arquitectónicas y en varios sectores industriales debido a su capacidad bajo diversas condiciones de carga, no se cuenta con validación experimental que avale su utilización. Adicionalmente, este tipo de conexión no hace parte de las conexiones precalificadas de acuerdo al estándar AISC 358. Por lo tanto, se requieren pruebas específicas de acuerdo a los criterios especificados en AISC 341 y FEMA 350. Adicionalmente, se requiere una investigación encaminada a una mejor comprensión del comportamiento de este tipo de conexiones. Por tanto, en este trabajo se investiga el comportamiento sísmico de esta conexión. Los modos de falla, desempeño histerético, degradación de resistencia y rigidez, clasificación de rigidez y disipación de energía de esta conexión se estimaron en detalle. Adicionalmente, se realiza un estudio numérico basado en el método de los elementos finitos (MEF) que considera su curva de histéresis, el mecanismo de plastificación y la ubicación de las “rótulas plásticas” (*plastic hinges*). Este modelo se ajusta satisfactoriamente a los resultados experimentales.

Objetivo general

Caracterizar el comportamiento inelástico de una conexión en viga doble T – columna circular compuesta ante cargas cíclicas a partir de curvas de histéresis.

Objetivos específicos

- 1) Plantear un modelo numérico basado en estudios previos para la conexión en viga doble T - columna circular compuesta.

- 2) Elaborar un modelo por elementos finitos que permita identificar el comportamiento de una conexión en viga doble T - columna circular compuesta bajo cargas cíclicas.
- 3) Por medio de un ensayo experimental, determinar la curva de histéresis que describa su comportamiento inelástico.
- 4) Verificar por medio de los datos obtenidos si la conexión cumple requisitos sismo resistentes para pórticos en acero de alta ductilidad.
- 5) Comparar los resultados obtenidos experimentalmente, con los obtenidos mediante MEF.

Resultados

Los resultados experimentales indican que la conexión exhibe grandes bucles histéricos, desarrolla ductilidad y capacidad de disipación. Adicionalmente, se observó que las capacidades de rotación cumplieron con los requisitos de diseño de ductilidad para la resistencia a los terremotos de acuerdo con la normativa vigente.

De otro lado, el modelo numérico se ajusta a los resultados experimentales. Adicionalmente, se desarrolló una simplificación numérica a este modelo, basada en la utilización de elementos tipo línea en zonas alejadas a la localización de las de las "rótulas plásticas" (*plastic hinges*). Este modelo simplificado presentó buen ajuste con los resultados experimentales con la ventaja adicional de reducir los tiempos de cómputo en un factor cercano a 360.

Conclusiones

- La conexión propuesta es adecuada para ser utilizada en estructuras especiales de pórticos de momento ubicadas en áreas de alta amenaza sísmica.
- Los resultados experimentales permiten mejorar el proceso de diseño de este tipo de conexiones.
- El modelo numérico basado en el método de los elementos finitos se ajusta a los resultados experimentales.

English:

Problem Statement:

The steel double-tee beam and concrete-filled tubular steel column connection are part of the structural steel moment resistant frames (SMFs). Despite the fact that this type of structure is widely used in architectural application proposals and in various industrial sectors due to its capacity under various load conditions, there is no experimental validation to support its use. Additionally, this type of connection is not part of the prequalified connections according to the AISC 358 standard. Therefore, specific tests are required according to the criteria specified in AISC 341 and FEMA 350. Additionally, an investigation directed to a better understanding of the behavior of these types of connections is required. Therefore, in this work, the seismic behavior of this connection is investigated. The failure modes, hysterical performance, strength and stiffness degradation, stiffness classification and energy dissipation of this connection were estimated in detail. Additionally, a numerical study is carried out based on the finite element method (FEM) that considers its hysteresis curve, the plasticization

mechanism and the location of the “plastic hinges”. This model fits satisfactorily with the experimental results.

General objective: To characterize the inelastic behavior of a double T beam connection - compound circular column under cyclic loads from hysteresis curves.

Specific objectives:

- 1) Create a numerical model based on previous studies for the beam connection double T - compound circular column.
- 2) Elaborate a model by finite elements that allows to identify the behavior of a double T beam connection - compound circular column under cyclical loads.
- 3) By means of an experimental test, determine the hysteresis curve that describes its inelastic behavior.
- 4) Verify by means of the data obtained if the connection meets earthquake resistant requirements for frames in high ductility steel.
- 5) Compare the results obtained experimentally with those obtained by FEM.

Results

Experimental results indicate that the connection exhibits large hysteretic loops, develops ductility and dissipation capacity. Additionally, it was observed that the rotation capacities met the ductility design requirements for earthquake resistance in accordance with current regulations.

On the other hand, the numerical model fits the experimental results. Additionally, a numerical simplification to this model was developed, based on the use of line-type elements in areas far from the location of the “plastic hinges”. This simplified model presented a good fit with the experimental results with the additional advantage of reducing computation times by a factor close to 360.

Conclusions

- The proposed connection is suitable to be used in special moment frame structures located in areas of high seismic threat.
- The experimental results allow to improve the design process of this type of connections.
- The numerical model based on the finite element method is in agreement with the experimental results.

3. Síntesis del proyecto:

A continuación, se realiza la síntesis del proyecto, incluyendo los objetivos, resultados y conclusiones principales. Información detallada, incluyendo referencias, se encuentra en los adjuntos: Artículo 1: Ramírez et al. Seismic Performance of a Double T Steel Beam and Concrete-filled Steel Tubular

Column Connection, Experimental Study; y Artículo 2: Ramírez et al. Seismic Performance of a Double T Steel Beam and Concrete-filled Steel Tubular Column Connection, Numerical Analysis.

Tema

La viga de acero de doble T y conexión de columna tubular de acero con relleno de hormigón hace parte de los marcos estructurales de acero resistentes a momento (SMF, por sus siglas en inglés). A pesar de que este tipo de estructura es utilizada ampliamente en propuestas de aplicaciones arquitectónicas y en varios sectores industriales debido a su capacidad bajo diversas condiciones de carga, no se cuenta con validación experimental que avale su utilización. Por lo tanto, se requieren pruebas específicas de acuerdo con los criterios especificados en AISC 341 y FEMA 350. Adicionalmente, se requiere una investigación encaminada a una mejor comprensión del comportamiento de este tipo de conexiones. Por tanto, en este trabajo se investigó el comportamiento sísmico de esta conexión. Los modos de falla, desempeño histerético, degradación de resistencia y rigidez, clasificación de rigidez y disipación de energía de esta conexión se estimaron en detalle. Adicionalmente, se realizó un estudio numérico basado en el método de los elementos finitos (MEF) que consideró su curva de histéresis, mecanismo de plastificación y la ubicación de las “rótulas plásticas” (*plastic hinges*).

Objetivo general

Caracterizar el comportamiento inelástico de una conexión en viga doble T – columna circular compuesta ante cargas cíclicas a partir de curvas de histéresis.

Objetivos específicos

- 1) Plantear un modelo numérico basado en estudios previos para la conexión en viga doble T - columna circular compuesta.
- 2) Elaborar un modelo por elementos finitos que permita identificar el comportamiento de una conexión en viga doble T - columna circular compuesta bajo cargas cíclicas.
- 3) Por medio de un ensayo experimental, determinar la curva de histéresis que describa su comportamiento inelástico.
- 4) Verificar por medio de los datos obtenidos si la conexión cumple requisitos sismo resistentes para pórticos en acero de alta ductilidad.
- 5) Comparar los resultados obtenidos experimentalmente, con los obtenidos mediante MEF.

Metodología

Procedimiento de diseño de la conexión

Para garantizar la ductilidad en los SMFs, se debe considerar el diseño por capacidad, lo que requiere preparar la columna y los elementos que forman parte de la conexión para resistir las fuerzas máximas que puede desarrollar la viga de acero al entrar en el rango inelástico. Además, el daño debe concentrarse en un lugar específico llamado rotula plástica (AISC, 2016a).

Consideraciones analíticas y experimentales indican que se puede lograr una excelente respuesta estructural si se induce la formación de un mecanismo de columna fuerte - viga débil a través del

diseño. En este mecanismo, las rotulas plásticas en los extremos de las vigas evitan una excesiva ductilidad local mientras que los pilares permanecen en el rango elástico con la excepción de la base de los pilares. Adicionalmente, las columnas están sometidas a cargas axiales variables debido a efectos sísmicos, lo que afecta su resistencia y ductilidad. Además, la falla de una columna puede provocar el colapso total o parcial del edificio. Estas son las principales razones por las que las columnas de los SMFs están protegidas, esto es, por la condición de que permanezcan en el rango elástico. Para lograr este objetivo, es de fundamental importancia aplicar los conceptos de diseño por capacidad. De esta forma se obtendrá una respuesta dúctil en la que la plastificación de las vigas se produce de forma progresiva y el sistema es capaz de desarrollar una respuesta adecuada (AISC, 2016a; Al-Kamal et al., 2017; Hamburger et al., 2009; Zareian et al., 2010). Además, la selección de columnas y vigas para el marco debe cumplir con los requisitos sísmicos de AISC 341-16, sección E3 (AISC, 2016b), que proporciona las especificaciones para SMFs con capacidad especial de disipación de energía.

Los análisis realizados en este trabajo permitieron demostrar que en el diseño se obtiene una fuerte relación columna-viga débil y que se verifica el mecanismo de plastificación según AISC 358 (AISC, 2016). Además, el diseño de pernos, diafragmas, soldaduras y conexión a esfuerzos cortantes también fueron garantizados de acuerdo con AISC 358, AISC 360 y AWS D1.1 (AISC, 2016a, 2016b; AWS, 2020).

Para garantizar lo anterior, se cumplieron varias condiciones en la etapa de diseño. Estas condiciones se describen a continuación:

(1) La sección transversal de la viga y la columna debe cumplir con la relación ancho-espesor requerida para ser clasificada como sísmicamente compacta. Asimismo, se debe asegurar que los patines de las vigas estén ubicados lateralmente para evitar la pérdida de capacidad por pandeo lateral torsional.

(2) Debe cumplirse la jerarquía de columna fuerte-viga débil, que es mayor que la unidad. Además, la suma de los momentos probables en las vigas y columnas debe calcularse a partir de la línea central de la columna y debe considerar la fuerza cortante ubicada en la rótula plástica.

(3) El diámetro y el número de pernos deben obtenerse considerando el estado de esfuerzos cortantes y de aplastamiento en el diafragma y la viga. El diámetro máximo del perno, d_{bmax} , necesario para controlar la falla frágil en el ala de la viga, se determina mediante la siguiente expresión (en pulgadas):

$$d_{bmax} = \frac{b_f}{2} \left(1 - \frac{R_y F_y}{R_t F_u} \right) - \frac{1}{8} \quad (1)$$

donde b_f es la dimensión del ala de la viga; R_y es el factor de sobrecarga, que depende del material de la viga; F_y es la resistencia a la fluencia; y R_t es la relación entre la resistencia a la tracción esperada y la resistencia a la tracción mínima específica F_u . También se debe considerar la magnitud de la fuerza cortante, V , a la que está sometido el grupo de tornillos. Esta fuerza debe incluir el factor

C_{pr} y el momento máximo probable de la viga en el frente de la columna, M_f , que se calcula de la siguiente manera:

$$M_f = C_{pr} R_y Z_x F_y + V S_h \quad (2)$$

donde Z_x es el módulo plástico de la sección de la viga; V es la fuerza cortante en la rótula plástica y S_h es la ubicación de la rótula plástica medida desde el centro de la columna. El factor C_{pr} , que es proporcionado por AISC 358, considera la resistencia máxima probable en la conexión, incluyendo el efecto de endurecimiento por deformación del material, y se calcula de la siguiente manera:

$$C_{pr} = \left(\frac{F_y + F_u}{2 F_y}, 1.2 \right) \quad (3)$$

Además de los requisitos anteriores, los pernos deben pretensarse al menos al 70% del valor de F_u .

(4) La geometría del diafragma debe definirse en función del diámetro de la columna. Más precisamente, el diámetro externo del diafragma, ϕ_e , debe ser igual a 1,5 veces el diámetro de la columna, d_c y la longitud de tangente l_{dg} debe ser igual al 25% del diámetro de la columna, d_c . Estas dimensiones fueron evaluadas mediante modelación numérica considerando incluso la influencia del ángulo θ en el flujo de esfuerzos y niveles de deformación plástica en el diafragma. Como resultado, se estableció un valor de 30 grados para θ .

(5) El espesor del diafragma, t_p , debe obtenerse de los estados de tensión de fluencia de área gruesa, fractura de área neta y bloque cortante, considerando la fuerza de capacidad máxima, F_{pr} . A su vez, F_{pr} se obtiene descomponiendo el momento máximo probable de la viga ubicada en el frente de la columna entre el alma de la viga, d_b , e incluyendo el espesor del diafragma:

$$F_{pr} = \frac{M_f}{d_b + t_p} \quad (4)$$

El espesor del diafragma debe coincidir con el espesor de una placa comercial. Por tanto, la iteración debe iniciarse con un espesor preliminar y se debe verificar su cumplimiento con los estados de tensión mencionados. Para la resistencia del diafragma, se debe considerar un factor de reducción de la resistencia para el estado límite dúctil, $\phi_d = 1$, de acuerdo con AISC 358 (AISC, 2016a).

(6) Los diafragmas deben conectarse a la pared de la columna utilizando soldaduras de penetración total. Para esto, debe asegurarse que los bordes estén provistos de biseles de 45 grados. Para este trabajo se utilizó el detalle de soldadura tipo AWS TC-U4b-GF con precalentamiento de piezas según AWS D1.1 (AWS, 2020).

(7) La unión de la placa de corte a la columna se puede hacer usando soldaduras de penetración total o soldaduras de filete. Si se implementan soldaduras en ángulo, deben calcularse para resistir el cortante máximo probable, V_p .

La figura 1 muestra los componentes y dimensiones principales de la conexión obtenida del proceso de diseño descrito anteriormente. También se ilustra la acción de la fuerza de capacidad máxima, F_{pr} ,

y el momento probable máximo, M_f . Como se muestra en la figura, la columna está hecha de acero ASTM A500 grado C y tiene una sección circular con un diámetro exterior de 323,9 mm y un espesor de pared nominal de 9 mm. La viga corresponde a un perfil laminado IPE360 y está hecha de acero ASTM A572 grado 50. La columna se rellenó con hormigón de 21 MPa de resistencia. El espesor del diafragma fue de 19 mm y el número de pernos por diafragma fue de 16 con un diámetro de perno de 5/8 pulgadas (15,875 mm) y hecho de acero ASTM A490. La Tabla 1 muestra todos los valores relevantes de la conexión.

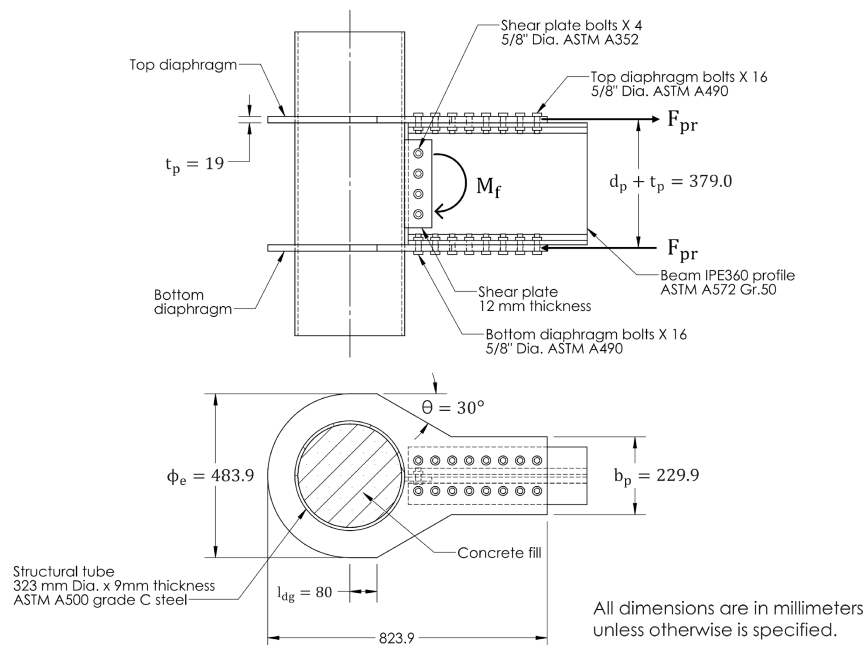


Figura 1. Componentes y dimensiones principales de la conexión obtenidas del proceso de diseño. También se ilustra la acción de la fuerza de capacidad máxima, F_{pr} , y el momento probable máximo, M_f .

Tabla 1. Valores relevantes de la conexión.

Propiedades Geométricas			
Notación	Descripción	Valor	Unidades
A_g	Área gruesa de la columna	8903.6	mm ²
A_{gb}	Área gruesa de la viga	72.7	cm ²
A_{gc}	Área gruesa de diseño de la columna	8280.3	mm ²
b_f	Espesor del patín de la viga	170	mm
b_p	Ancho del perfil del diafragma en su base	229.9	mm
d_b	Longitud del alma de la viga	360	mm
d_c	Diámetro de la columna	323.9	mm
I_{yb}	Momento de inercia de la viga respecto al eje x	1043	cm ⁴
t_c	Espesor nominal de pared de la columna	9	mm

r_b	Curvatura entre el patín y el alma de la viga	18	mm
S_h	Distancia desde la cara de la columna hasta la ubicación de la rótula plástica	385	mm
t_{cw}	Espesor de diseño de la pared de la columna ($0,93t_c$)	8.37	mm
t_{fb}	Espesor del patín de la viga	12.7	mm
t_{wb}	Espesor del alma de la viga	8	mm
Z_{xb}	Modulo plástico de la viga	1019	cm ³
Z_{xc}	Modulo plástico de la columna	892.7	cm ³
Propiedades de los Materiales			
E	Módulo de elasticidad del acero	200 000	MPa
F_{yb}	Límite de fluencia de la viga	350	MPa
F_{ub}	Límite último de la viga	460	MPa
F_{yc}	Límite de fluencia de la columna	315	MPa
F_{uc}	Límite último de la columna	425	MPa
R_{yb}	Factor de sobre resistencia a fluencia para la viga	1.1	-
R_{tb}	Factor de sobre resistencia a rotura para la viga	1.1	-
R_{yc}	Factor de sobre resistencia a fluencia para la columna	1.4	-
R_{tc}	Factor de sobre resistencia a rotura para la columna	1.3	-

Condiciones de calificación

La conexión SFM viga-columna debe cumplir las siguientes condiciones:

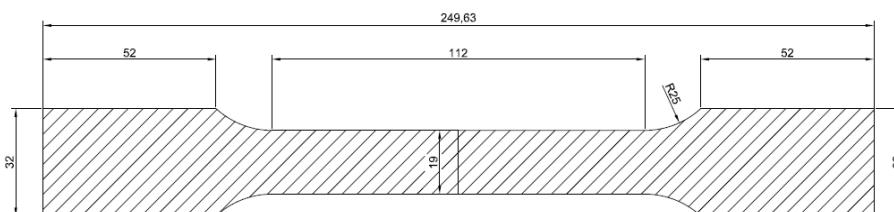
- La conexión debe poder soportar las rotaciones de plástico correspondientes a un nivel de distorsión total del piso de 0.04 radianes. Este nivel de distorsión equivale a una rotación plástica en las bisagras de 0.03 radianes considerando que la distorsión elástica del piso es de 0.01 radianes.
- La capacidad de flexión de la unión medida en el frente de la columna debe ser de al menos 0.8 Mp, donde Mp es el momento de plastificación de la viga calculado con el límite elástico para el acero especificado, con un nivel de deformación del piso de 0.04 radianes.
- La resistencia al esfuerzo cortante requerida por la conexión debe determinarse a partir de combinaciones de carga, incluido el terremoto amplificado.
- En conexiones de marcos especiales, se deben considerar las soldaduras de demanda crítica junto con el uso de ranuras o soldaduras de penetración total.

Métodos experimentales

Para determinar las propiedades mecánicas del material implementado en la conexión se realizaron ensayos de tracción según la Norma NTC 2, en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de

Ingeniería Civil de la Universidad del Valle. Se utilizaron nueve (9) probetas de las cuales, dos (2) corresponden al patín superior de la viga, dos (2) al patín inferior de la viga, dos (2) al alma de la viga y tres (3) a la columna. La extracción de las probetas se realizó de forma aleatoria, con los materiales sobrantes de la etapa de fabricación, usando la geometría mostrada en la figura 2 (a). Los resultados evidenciaron que el material ensayado fue un acero estructural ASTM A572 Gr.50, con un límite promedio de fluencia de 350Mpa y módulo de elasticidad de 200Gpa. La densidad correspondiente a este material es de 7850 k/m³.

Las probetas se instrumentaron con *strain gauges* para capturar los datos de la parte lineal de la curva esfuerzo-deformación y obtener el módulo de elasticidad. Además, se usó un extensómetro para medir los niveles de desplazamiento de la probeta y obtener la curva completa, ver figura 2 (b). El extensómetro fue retirado antes de la ruptura de la probeta para evitar daños en los equipos de adquisición, ver figura 2 (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2. (a) geometría de las probetas utilizadas para caracterización del material; (b) extensómetro y (c) retiro del extensómetro antes de la ruptura de la probeta.

En la figura 3 (a) se presenta la curva esfuerzo – deformación de las probetas extraídas de la columna. Se verificó que los límites de fluencia correspondieran a los planteados en la etapa de diseño de la conexión. En la figura 3 (b) se presenta la curva esfuerzo – deformación de las probetas

extraídas de los patines y alma de la viga. Se verificó que los límites de fluencia corresponden a los planteados en la etapa de diseño de la conexión.

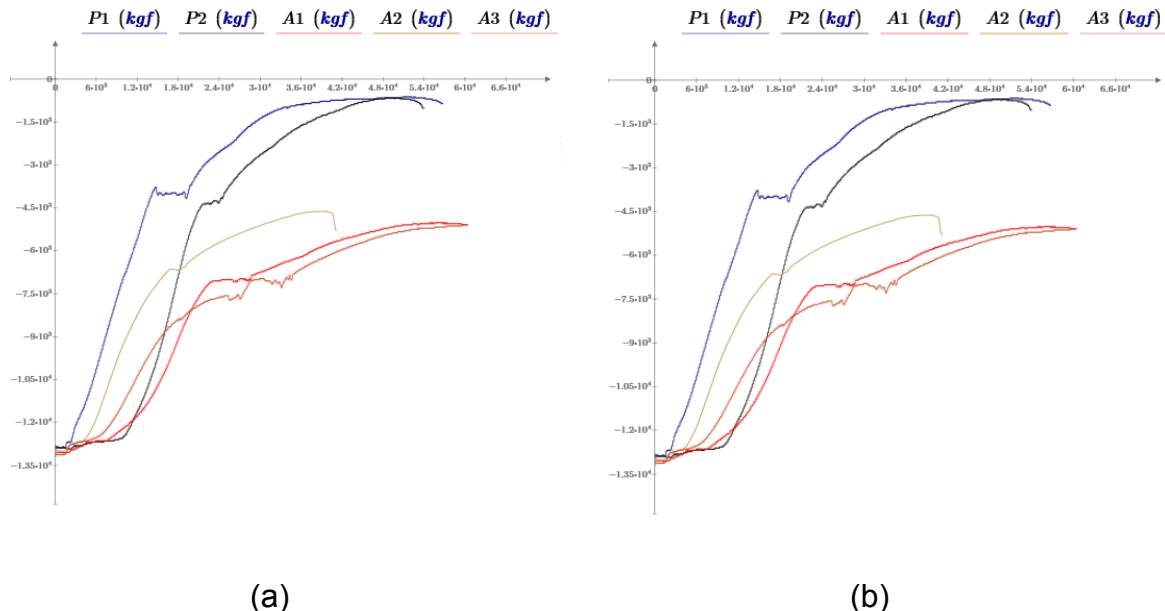


Figura 3. Curvas esfuerzo-deformación para las probetas: (a) extraídas del material de las columnas y (b) extraídas de los patines y alma de la viga.

La prueba se realizó en el laboratorio marco de homologación (MaPH) ubicado en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle. La figura 4 muestra la configuración experimental, incluidos los detalles de montaje de la conexión viga-columna. Como se puede observar en la figura 4 (a), se instalaron dos soportes en cada extremo de la columna con las siguientes condiciones de restricción: en el extremo 1, se restringieron las traslaciones en el plano y fuera del plano; en el extremo 2, la traslación vertical y la traslación fuera del plano también estaban restringidas; se permitió la rotación en el plano para ambos extremos. La figura 4 (b) ilustra las vigas que brindan soporte lateral a la estructura.

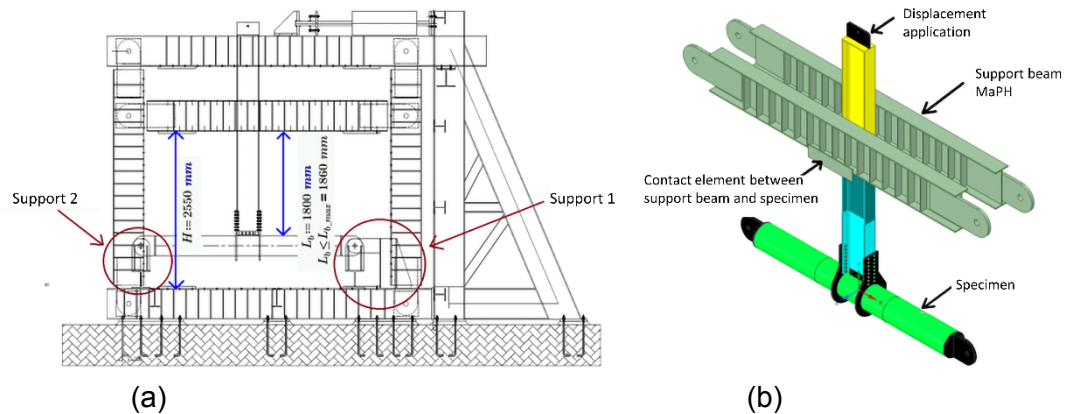
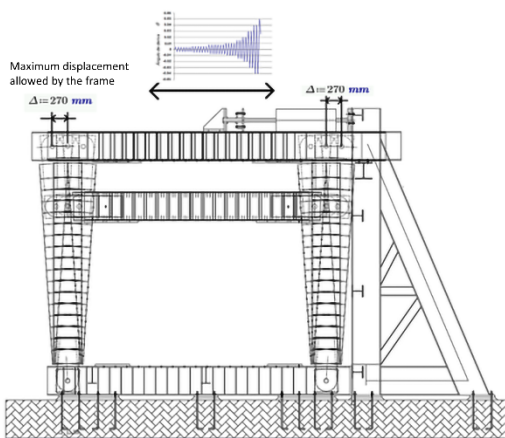


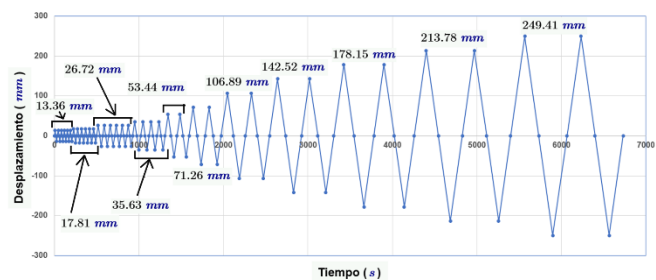
Figura 4. Configuración experimental, incluidos los detalles de montaje de la conexión viga-columna

Los componentes de la muestra de prueba se transportaron al MaPH y se ensamblaron en el sitio. Se utilizaron uniones atornilladas pretensadas manualmente, proporcionando una fuerza de pretensado de 107 kN. Además, se utilizaron arandelas indicadoras de tensión directa para los pernos A490 de 5/8 de pulgada. La probeta se montó sobre dos soportes que se instalaron en cada extremo de la columna. Uno de los soportes se restringió para traslaciones dentro y fuera del plano. El otro soporte se restringió para traslación vertical y traslación fuera del plano. Se permitió la rotación en el plano en ambos extremos. La restricción de las traslaciones se logró mediante placas conectadas a la base inferior del MaPH, mientras que la rotación se permitió mediante una conexión tipo pin. La muestra de prueba se ensambló en forma de T como se muestra en la figura 5 (a). En esta configuración, la columna se colocó horizontalmente y la viga verticalmente. Esto, dado que el sistema de desplazamiento accionado por el actuador hidráulico estaba ubicado en la parte superior del bastidor. El actuador permitía un nivel máximo de desplazamiento cíclico de 270 mm. La posición deformada del bastidor en su desplazamiento máximo durante un ciclo de desplazamiento, la ubicación del actuador hidráulico y el protocolo de desplazamiento también se pueden observar en la figura. El protocolo de desplazamiento se programó de acuerdo con el procedimiento descrito en FEMA 350 (FEMA, 2000) y se muestra en la figura 5 (b). La duración de la prueba se estimó en 6732 segundos con el fin de evitar elevados aumentos de temperatura en el sistema hidráulico.

La prueba permitió obtener las curvas de histéresis, el mecanismo de plastificación y la forma de falla en caso de que ocurriera. Las curvas de histéresis se obtuvieron del sistema de adquisición de datos utilizando los vectores de fuerza y desplazamiento para posteriormente obtener la rotación y el momento de flexión para cada paso de carga de prueba. Las curvas de histéresis permitieron identificar la capacidad de flexión de la conexión para una rotación de 0.04 radianes y comparar su resistencia con el mínimo permitido según los criterios de aceptación. El mecanismo y la forma de falla se obtuvieron visualmente. Para ello se utilizaron tres cámaras, ubicadas en la parte delantera, lateral y trasera de la instalación. Además, se cubrió la superficie de la conexión con cal y se trazó una cuadrícula en aquellas superficies donde se esperaba que apareciera la junta plástica.



(a)



(b)

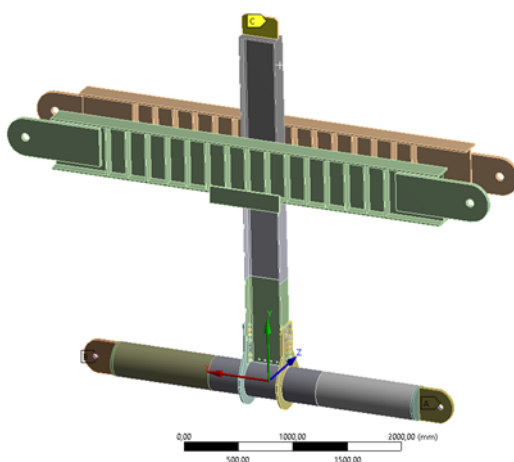
Figura 5. (a) Desplazamiento del marco de pruebas y (b) protocolo de desplazamiento aplicado.

Modelo matemático

La discretización del dominio se construyó considerando la representación exacta de la geometría y la configuración y dimensiones de la prueba. Se consideraron 49 cuerpos sólidos que corresponden a los diferentes elementos que componen la conexión. Dichos elementos son: 32 pernos, cuatro secciones de viga, tres secciones de columna tubular, tres secciones de volumen de concreto, dos diafragmas, dos tapas de extremo en columnas, dos placas para soportes de columna y una placa para la aplicación del protocolo de desplazamiento, ver figura 6 (a). Se consideraron adheridas las superficies de contacto entre los diafragmas y la columna, placa de corte - columna, tapas de extremo - columna y placas de soporte - tapas de extremo.

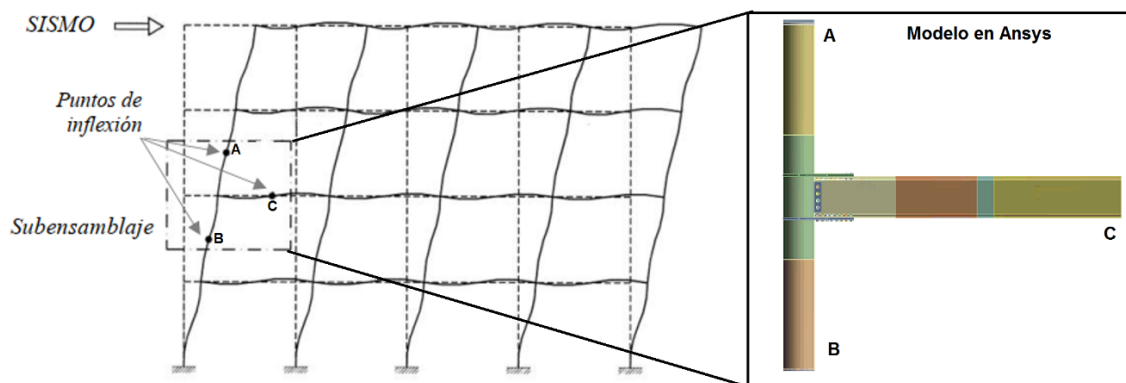
Es importante considerar que las cargas sísmicas aplicadas al SMF generan una deformación en la estructura similar a la mostrada en la figura 6 (b). En dicha deformación se observan zonas de inflexión en los puntos medios de vigas y columnas. Es decir, en estos puntos los momentos flectores resultan ser aproximadamente cero. Adicionalmente, se puso especial atención al área comprendida por los puntos A, B y C. Esto, con el fin de caracterizar el comportamiento inelástico del marco a partir del mecanismo de plastificación de la conexión.

Las geometrías de algunos elementos de la conexión tales como tuercas y tornillos fueron simplificados como elementos cilíndricos. Esto, para evitar distorsiones excesivas en los bordes del hexágono que describe la geometría real. Debido a la simetría geométrica, de carga y de restricciones del sistema, fue posible considerar solo la mitad del sistema estructural en el modelo. Esto, siendo el plano de simetría el plano YZ. La figura 6 (c) muestra el plano de simetría y la división de partes en las que se organizó el modelo para fines de mallado. La figura 6 (d) muestra la discretización del dominio, así como una mirada más cercana a las regiones de refinamiento de malla. Estas zonas son: los extremos izquierdo y derecho de la viga, la viga fuera de la rótula plástica y las vigas de soporte laterales.



(a)

Figura 6. (a) Representación geométrica del modelo.



(b)

Figura 6. (b) Deformación de la estructura.

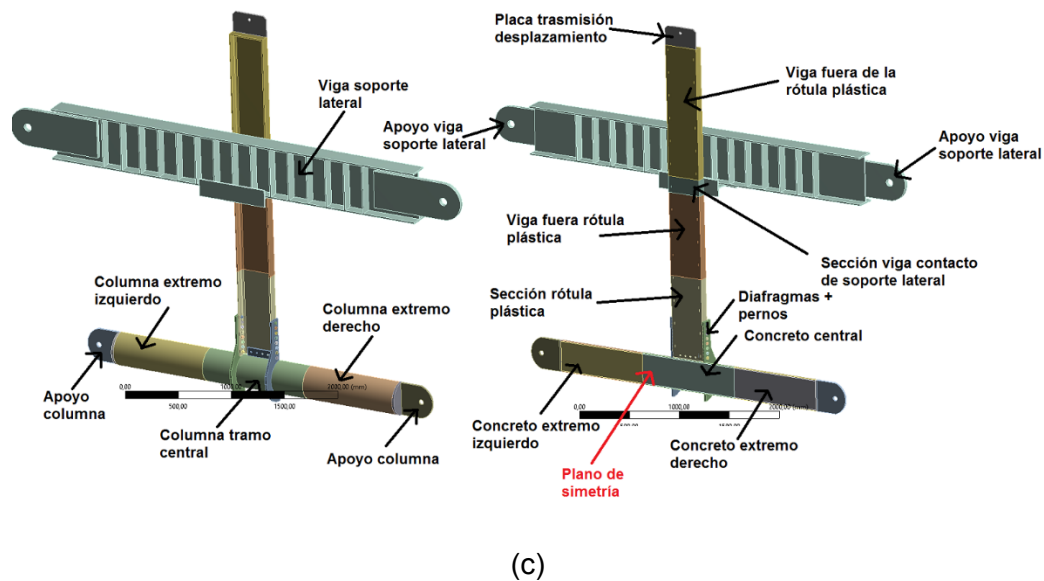


Figura 6. (c) Plano de simetría y división de partes.

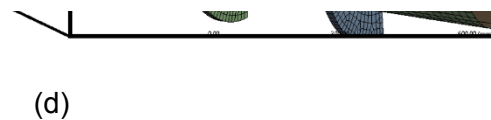


Figura 6. (d) Discretización del dominio.

Para la selección de los tipos de elementos en el modelo computacional se tuvieron en cuenta las siguientes características del sistema:

- Endurecimiento por deformación: se incluye un modelo de plasticidad debido a que el acero luego de alcanzar su límite de fluencia es capaz de deformarse en el rango plástico sin degradación de su resistencia.
- Contacto: Este fenómeno puede estar caracterizado por la separación entre las superficies de los elementos de la conexión. En este caso, los diafragmas que inicialmente están en contacto con los patines de la viga; presentan separación en la medida que avanza el protocolo de desplazamiento cíclico, debido a la disipación de la componente de fricción.
- Grandes deformaciones: Se presenta no-linealidad geométrica debido a las grandes deformaciones en los elementos discretos del modelo en respuesta de las fuerzas aplicadas, provocando cambios en la geometría de los elementos. El efecto de las grandes deformaciones fue considerado en las simulaciones debido a los altos niveles de rotación que puede llegar a experimentar la conexión.

Para el primer modelo se consideran elementos tipo sólido. Estos elementos son designados en Ansys como SOLID186. Una vez validados los resultados obtenidos, se decidió implementar un segundo modelo, simplificando las zonas alejadas de la rótula plástica, al reemplazar elementos tipo sólido por elementos tipo viga (BEAM 188), de esta forma se disminuyen los grados de libertad y a su vez el tiempo de procesamiento.

SOLID186 es un elemento tridimensional de orden superior que presenta un comportamiento de desplazamiento cuadrático. El elemento está definido por 20 nodos con tres grados de libertad por nodo y traslaciones en las direcciones nodales x , y , z . Estos elementos permiten modelar la plasticidad del material y los efectos por grandes deformaciones. Siendo este un elemento finito ampliamente usado en estudios numéricos que intentan capturar la física en la evaluación de conexiones a momento. La geometría, la localización de los nodos y el sistema de coordenadas para este elemento se muestran en la figura 7 (a).

BEAM 188 es un elemento línea que posee dos nodos cada uno en sus extremos con 6 grados de libertad, 3 desplazamientos y 3 rotaciones. A este tipo de elementos se les asigna una sección transversal con las propiedades geométricas estudiadas. La localización de los nodos y sistema de coordenadas para este elemento se muestra en la figura 7 (b).

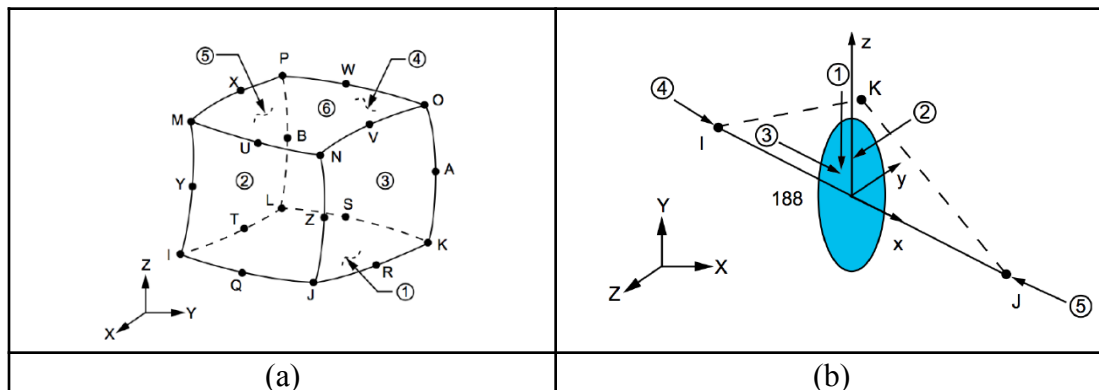


Figura 7. (a) Elemento SOLID186 y (b) elemento BEAM 188.

Para el segundo modelo, el acople entre los elementos SOLID 186 y BEAM 188 se realizó mediante el uso de elementos MPC184, capaces de brindar compatibilidad mediante ecuaciones de restricción a los nodos de la superficie del elemento SOLID 186 con el extremo del elemento BEAM188. La figura 8 ilustra las relaciones de compatibilidad nodal.

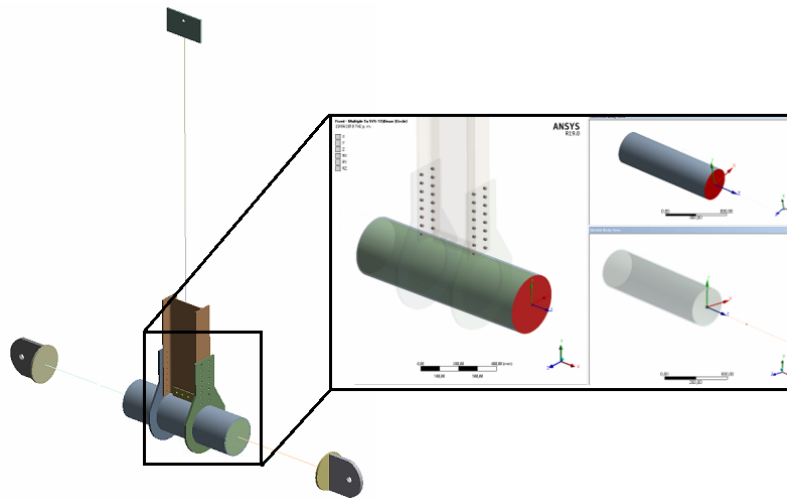


Figura 8. Relaciones de compatibilidad nodal entre elementos SOLID186 y BEAM 188 a través del elemento MPC184.

Las condiciones de borde que se definieron en el modelo fueron: el protocolo de desplazamiento descrito anteriormente e ilustrado en la figura 5 (b), apoyos, contactos y pretensionamiento de pernos. Con respecto al protocolo de desplazamiento, este se discretizó en 72 pasos de carga aplicados en la zona de aplicación de desplazamiento, ver figura 9 (a). Las restricciones en los extremos de la columna también se pueden ver en la figura 9 (a). En el soporte 1 se restringieron las traslaciones dentro y fuera del plano; en el soporte 2 se restringieron la traslación vertical y la traslación fuera del plano, sin embargo, se permitió la rotación en el plano para ambos soportes. En la viga de apoyo lateral se restringieron los grados de libertad en dirección axial y radial. No obstante, se liberó la dirección tangencial, ver figura 9 (b). Los contactos implementados en el modelo fueron de tres tipos: adherido, sin fricción y con fricción. Los contactos de tipo adherido se utilizaron para el par de contactos de diafragma-columna; los pares de contactos que se realizaron para tener una división geométrica para la discretización en la malla; los pares de contacto entre las placas de los soportes de columna; y los pares de contacto entre la placa de transmisión de desplazamiento y la viga fuera de la rótula plástica (*“plastic hinge”*). El contacto sin fricción se utilizó para considerar el fenómeno de deformación que se produce en los orificios por aplastamiento debido a la interacción de los pernos con la viga y los diafragmas. Finalmente, el contacto con fricción se aplicó a los pares de contacto entre los diafragmas y la viga, a las tuercas y cabezas de pernos con diafragmas y tuercas de pernos con la viga. La figura 9 (c) muestra un ejemplo de los elementos utilizados para simular los tornillos de pretensado. Para ello se utilizó un elemento con un solo grado de libertad y que representa la dirección definida para el pretensado.

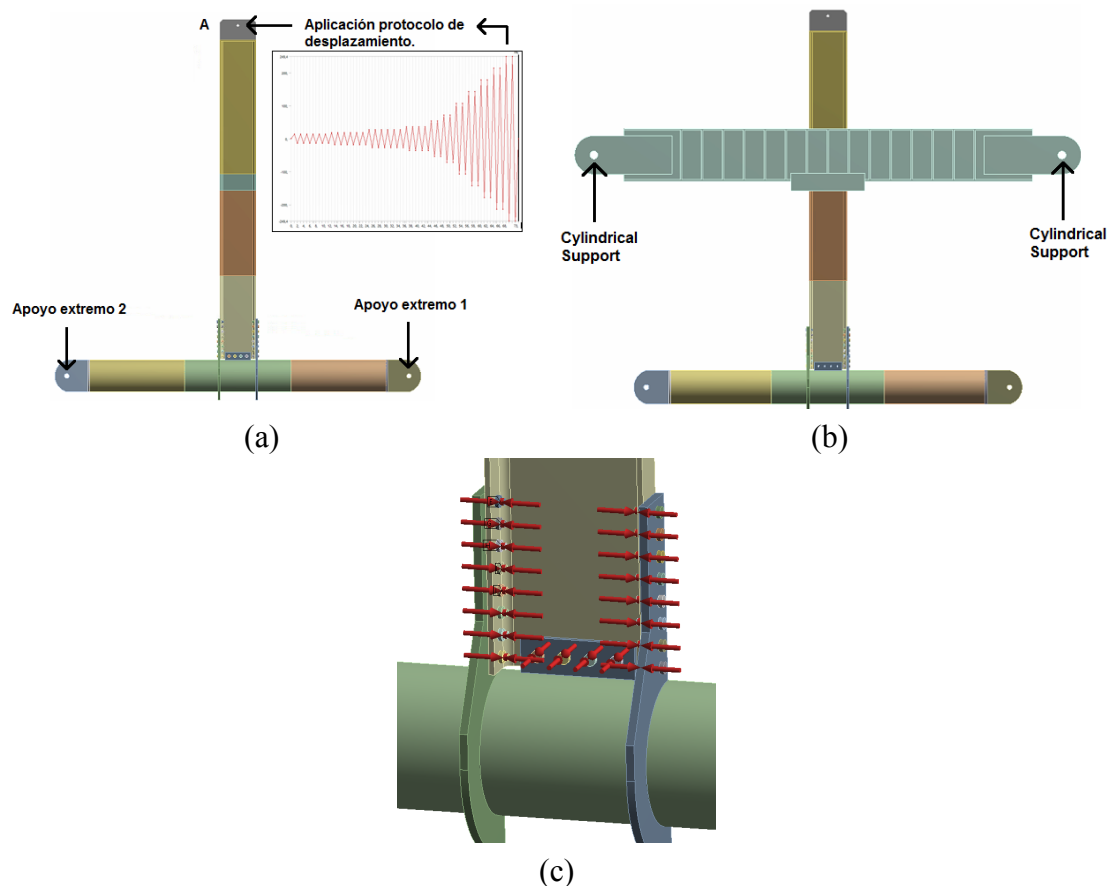


Figura 9. (a) Punto de aplicación del protocolo de desplazamiento y apoyos; (b) soportes de las vigas de apoyo y (c) elementos utilizados para simular los tornillos de pretensado

Para reproducir el comportamiento físico del problema de estudio se debe contemplar dentro del modelamiento la componente no lineal del material debido a las grandes deformaciones inelásticas que se presentan durante el proceso de plastificación de la viga. Para el correcto modelamiento del material Ansys se incluyó la componente de endurecimiento por deformación cinemática. Esto se hizo, tomando como referencia los resultados obtenidos por Andrade (Andrade C., 2015), donde el tamaño de la superficie de fluencia permanece constante y se traslada en la dirección de la carga, ver figura 10 (a). En la Figura 10 (b) se define la curva multi-lineal por endurecimiento cinemático. En esta curva, el eje vertical muestra los esfuerzos en MPa y el eje horizontal la componente de deformación plástica en decimas de milímetro.

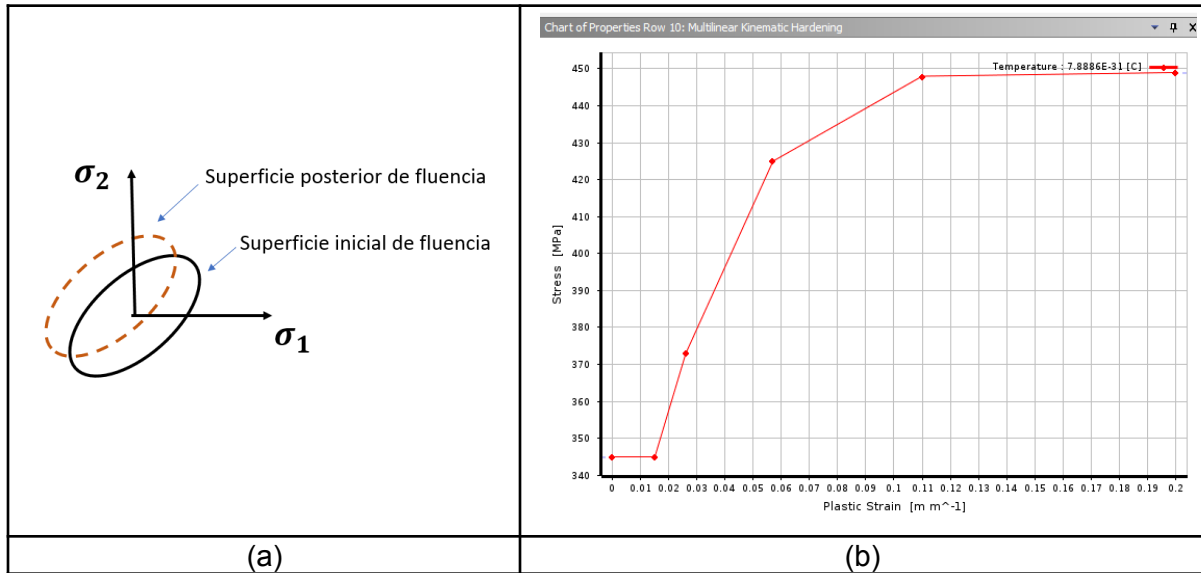


Figura 10. (a) traslación de la superficie de fluencia y (b) curva de endurecimiento cinemático

Con el planteamiento de este modelo se da cumplimiento a los objetivos #1 y #2 del proyecto. Como se observa más adelante en la sección de resultados, el modelo planteado se ajusta satisfactoriamente a los resultados experimentales.

Resultados obtenidos

Resultados experimentales

Curvas de Histéresis

La figura 11 muestra la gráfica de fuerza-desplazamiento obtenida para la muestra de prueba. Las curvas de histéresis también se pueden observar en la figura. Esta grafica permitió verificar que la conexión aprueba los requisitos necesarios para su aprobación según la norma NRS-10. Para determinar esto, se trazó en la gráfica el límite que se debe superar para su aprobación en sistemas especiales de disipación de energía. En la figura se observan cuatro líneas horizontales en la parte superior e inferior del gráfico. La descripción de estas líneas es la siguiente: la línea verde representa la capacidad mínima de flexión $\pm 0,8$ Mp; la línea roja oscura representa el momento plástico $\pm$ Mp; la línea negra representa el momento máximo probable $\pm$ Mpb; la línea en rojo en la abscisa a ± 0.04 radianes es el límite requerido para que la muestra sea aprobada. Dado que el comportamiento general de la muestra antes de alcanzar el desplazamiento de 0.04 radianes no presentó degradación en su resistencia en cuanto a la carga aplicada al actuador, se decidió continuar con el protocolo hasta el valor máximo permitido para el marco. Es decir, hasta una rotación de 0,07 radianes. Este valor se alcanzó con incrementos de 0,01 radianes por cada dos ciclos.

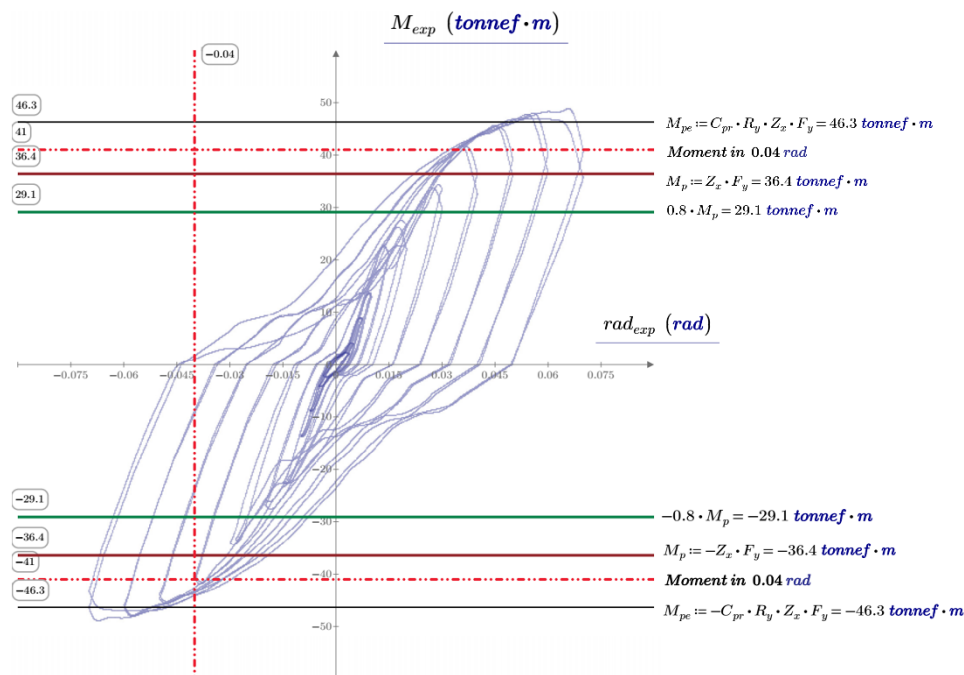


Figura 11. Curva histerética (fuerza - desplazamiento)

Con la obtención de la curva de histéresis se da cumplimiento al objetivo #3.

Mecanismo de Plastificación

En la etapa de diseño, se asumió una ubicación de rótula plástica para calcular las fuerzas máximas a las que estaría sometida la conexión. La prueba permitió mostrar la zona de plastificación colocándola visualmente en el punto con mayor pérdida de película. Además, en las pruebas se observó una concentración importante de esfuerzos y grandes deformaciones inelásticas en el área de la junta plástica a una distancia de ubicación de la rótula plástica de $Sh_{exp} = 480 \text{ mm}$.

La figura 12 (a) muestra la comparación de la posición asumida de la rótula plástica en la etapa de diseño y la obtenida experimentalmente. De esto se concluye que la posición de la rótula plástica estaba un 24% más alejada de la asumida inicialmente por la norma AISC 358-16, que la ubica en la última fila de tornillos. La pérdida de la película indica las áreas plastificadas de la viga, que están a 50 mm del borde del diafragma. Se observó que la zona de fluencia comenzaba en las alas de la viga y aumentaba con cada ciclo de desplazamiento hasta distribuirse sobre la red en un 70%.

También se identificó durante la prueba que la fluencia comienza en las alas y se extiende hacia el alma de la viga. Esto, a medida que aumenta el desplazamiento en los ciclos de carga y descarga, ver figura 12 (b). En cuanto a la columna, el hecho de que no se haya producido desprendimiento de la película indica que no hay incursiones en el rango inelástico para la superficie del tubo de la columna y el núcleo de hormigón. De hecho, no se encontró evidencia de grietas en el núcleo de concreto después de que el núcleo fue removido e inspeccionado.

En el último paso de desplazamiento, se observó que las vigas auxiliares que tienen como objetivo garantizar un adecuado apoyo lateral presentaban deformaciones fuera del plano debido a su baja rigidez. En consecuencia, provocando un pandeo lateral por torsión en la viga.

La figura 12 (b) ilustra el efecto que describe el contacto y la separación de los perfiles auxiliares adheridos al marco de prueba. En la parte superior derecha de la figura 12 (b) este efecto se observa a escala ampliificada. Esta parece ser una de las razones por las que fue posible demostrar durante el experimento un fallo debido únicamente al pandeo local. Como también se puede ver en la figura 12 (b), esta falla ocurrió en uno de los patines. Esto, después de que se alcanzó la rotación máxima impuesta de 0,07 radianes.

La razón por la que se debe proporcionar soporte lateral es para asegurar que la degradación de la resistencia debido al pandeo lateral por torsión se retrase hasta que la conexión alcance suficiente ductilidad y la energía sísmica se disipe por deformación. Aunque en el ensayo experimental se produjo un pandeo lateral, el diagrama de histéresis no mostró una pérdida dramática de resistencia debido a este fenómeno. La figura 13 muestra el estado final de la muestra durante la prueba visto desde diferentes ángulos.

La conexión exhibió un comportamiento histérico dúctil con ciclos estables y grandes áreas de disipación de energía. Cabe destacar que la inclusión de los diafragmas contribuyó al buen comportamiento de la conexión. Esto, mediante la transmisión de los esfuerzos de compresión y tracción generados por la flexión, lo que permite una adecuada distribución de la carga sobre una gran parte de la periferia de la columna. Además, se observó un efecto positivo al rellenar la columna con hormigón, ya que este disminuye la posibilidad de pandeo local según lo reportado por Raychowdhury & Hutchinson (Raychowdhury & Hutchinson, 2009), y la distorsión angular por deformación en el área de esfuerzos cortantes máximos en la columna tubular según lo reportado por Cheng & Chung (Cheng & Chung, 2003).

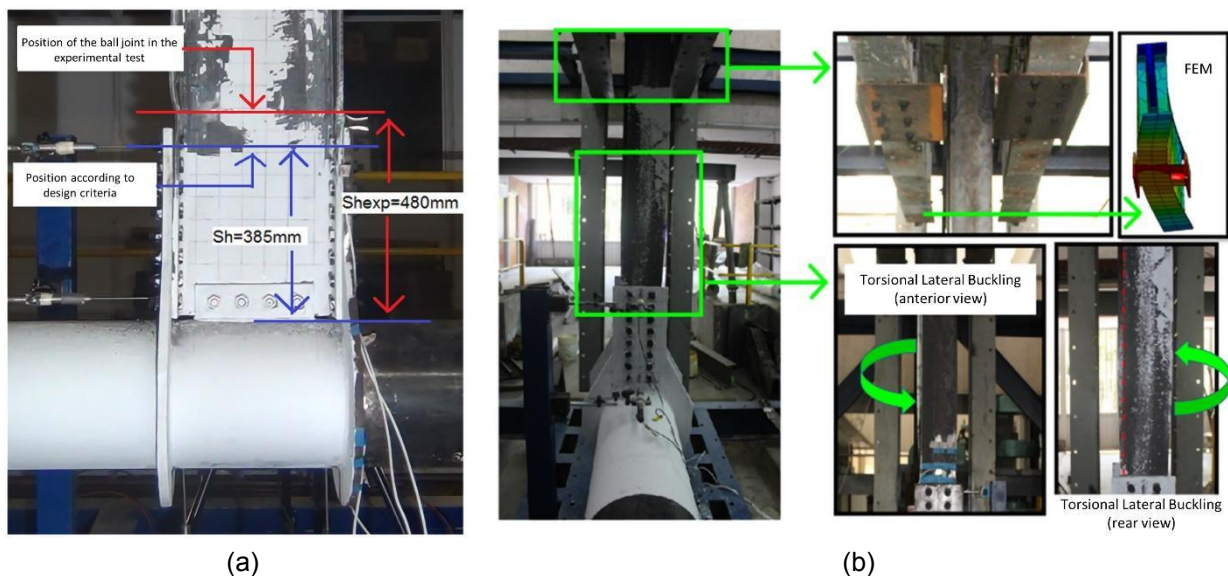


Figura 12. (a) Comparación de la ubicación de la rótula de plástico de acuerdo con el diseño y los resultados experimentales; (b) Vista lateral de prueba y efecto de pandeo lateral torsional

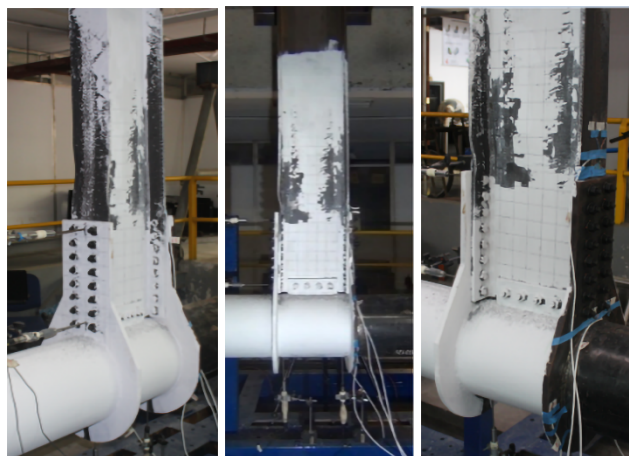


Figura 13. Estado final del espécimen visto desde diferentes ángulos

Envolvente Experimental

Para el análisis de la prueba dinámica es importante considerar la relación entre curvas monotónicas y curvas histeréticas. Esto se consideró de acuerdo con las disposiciones del capítulo 2 de la sección 2.2.9 de FEMA 355D, “Efecto del historial de carga y deformación; págs. 2-26”. Es decir, que las pruebas monotónicas proporcionan una envolvente aproximada a la obtenida de las curvas histeréticas en las pruebas de carga cíclica (FEMA, 2000).

La curva envolvente se obtiene trazando los puntos máximos en cada ciclo extraídos de la curva obtenida de las pruebas monotónicas o cíclicas. Esta envolvente es de especial importancia para definir la respuesta inelástica de la conexión a la acción de cargas dinámicas para el diseño estructural y modelado numérico. La curva envolvente que representa los resultados obtenidos en la prueba cíclica se muestra en figura 14 (a). La figura también muestra la ecuación que define la curva. Es una línea de tendencia polinomial de tercer orden con un coeficiente de correlación de 0,9949. Este polinomio representa una buena correlación hasta 0.06 radianes, que es el punto de máximo momento resistente en la conexión.

La curva envolvente de momento-rotación caracteriza el comportamiento inelástico de la conexión en términos de su resistencia, ver figura 14 (b). Según el ensayo cíclico descrito, la capacidad de flexión de la conexión medida desde la cara de la columna es superior al mínimo establecido de 0,8 Mp a un nivel de distorsión de 0,04 radianes. Al cumplir estas condiciones, esta conexión se puede implementar en pórticos resistentes a momentos con capacidad especial de disipación de energía en áreas de alta amenaza sísmica.

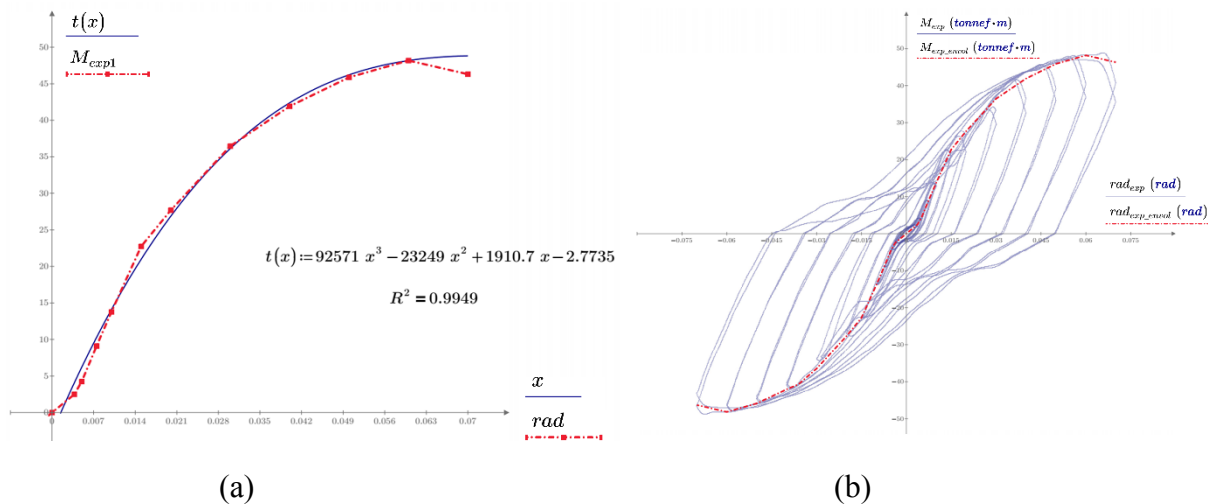


Figura 14. (a) Envolvente experimental de la curva de momento - rotación; (b) Envolvente de momento-rotación experimental

Con estos resultados se da cumplimiento al objetivo #4

Efecto de estrangulamiento ("pinching") en la curva de histéresis

Según Vallejo & Clement (Vallejo & Clement, 2016) el hormigón se agrieta una vez superada su resistencia a la tracción. Este efecto sumado al deslizamiento del perno, y la secuencia del endurecimiento por fluencia y resistencia provoca el efecto de estrangulamiento ("pinching") observado en la curva de histéresis, que se traduce en una disminución de la rigidez. El estrangulamiento de la curva de histéresis es una característica muy importante dentro de la evaluación de la capacidad de disipación de potencia de la conexión.

En cuanto al efecto de las grietas del hormigón sobre el estrangulamiento, el confinamiento y apoyo que brindan los muros de la columna tubular contribuyen a evitar fallas ya que para este tipo de conexión la acción de las fuerzas de compresión hace que las grietas se cierren gradualmente, lo que contribuye a la recuperación de la rigidez del núcleo de hormigón. En la prueba experimental se verificó la nucleación de grietas en el núcleo de hormigón para identificar su contribución al efecto de estrangulamiento. Para ello se retiró el núcleo de la columna y se verificó que el hormigón no presentaba fisuras. Así, con respecto a la columna, se determinó que el espécimen no presentó una incursión en el rango inelástico.

En cuanto al estrangulamiento debido al deslizamiento del perno y la secuencia del endurecimiento por fluencia y resistencia, este se produce cuando una carga supera la fuerza de fricción ejercida por la pretensión de los pernos que mantiene unidas dichas placas. Cuanto menor sea el diámetro del perno, menor será la tensión requerida por la norma, lo que conduce a una menor fuerza total requerida para superar el componente de fricción. Adicionalmente, la curva muestra cambios de pendiente que permiten identificar el desplazamiento entre placas debido a la holgura entre el diámetro nominal del perno y el diámetro de los orificios del diafragma.

Cabe mencionar que el efecto de deslizamiento no impide que la conexión se utilice en SMF con capacidades especiales de disipación de energía. El efecto de deslizamiento es bien conocido y ha sido documentado, por ejemplo, para el proceso de calificación de la conexión de momento de placa de brida atornillada (BFP) cubierto por AISC 358-16 (AISC, 2016a).

Resultados del modelo numérico

La figura 15 (a) compara la gráfica obtenida mediante elementos finitos con la obtenida experimentalmente. Al tomar un factor de corrección de 0.9 en las ordenadas del diagrama, se obtuvo una buena correlación entre los resultados experimentales y numéricos en el rango no lineal, ver figura 15 (b). Por un lado, se capturó un efecto no lineal de la conexión, obteniendo buenos resultados en cuanto a la ubicación de la rótula plástica y el mecanismo de plastificación. Por otro lado, el efecto de estrangulamiento no se pudo capturar numéricamente porque no se consideró el espacio entre el cuerpo del tornillo y el orificio. Al comparar ambas curvas, se observó la curva de histéresis obtenida numéricamente, presentando una rigidez durante los ciclos de carga y descarga similar a la obtenida experimentalmente.

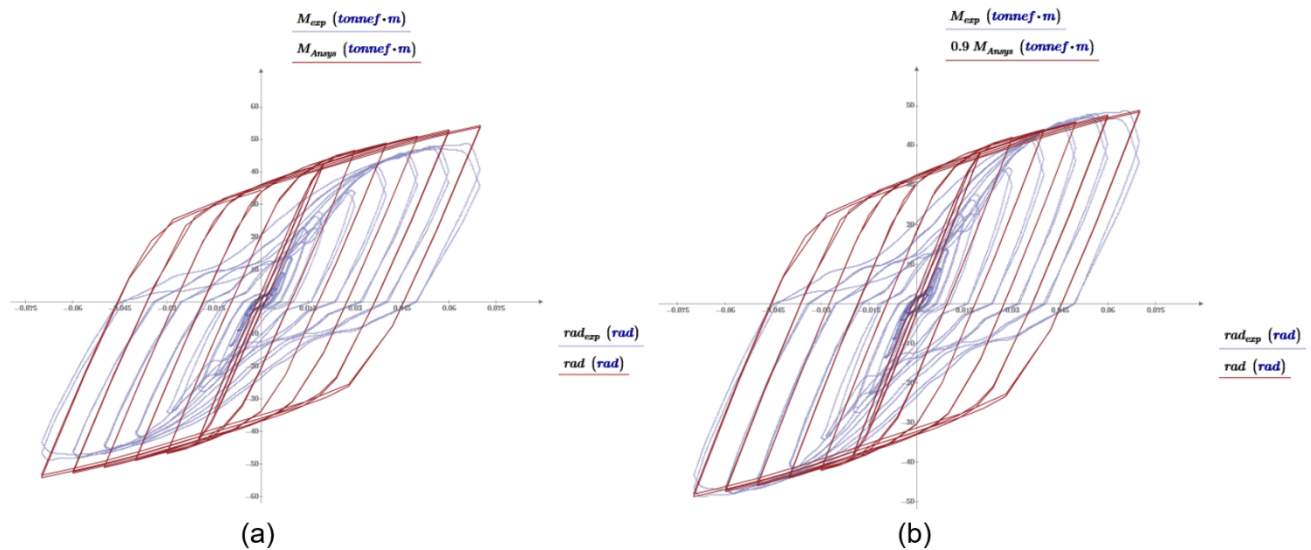


Figura 15. (a) y (b) Curvas experimentales y numéricas de momento – rotación.

Como se mencionó anteriormente, experimentalmente, la rótula plástica de la junta se presentó a una distancia $Sh_{exp} = 480$ mm mientras que la rótula plástica obtenida en el modelo numérico ocurre a un valor $Sh_{FEM} = 469$ mm. Es decir, el modelo numérico presenta una desviación del 2.5% con respecto a los experimentos. La figura 16 muestra la ubicación de la rótula plástica de la junta. Puede compararse con la imagen de valor experimental que se muestra en la Figura 12 (a).

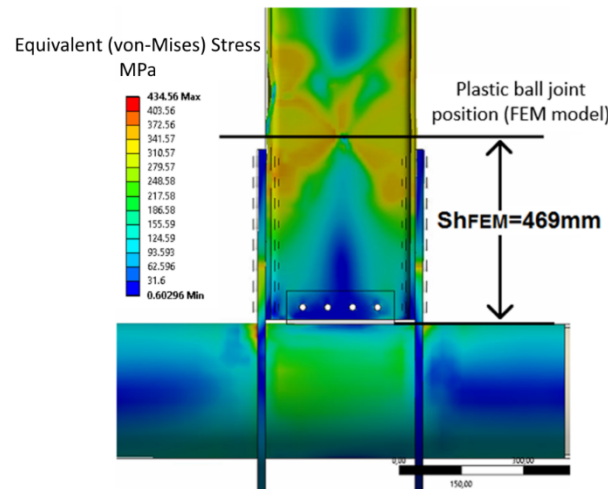


Figura 16. (a) Numerical location of the plastic hinging.

De acuerdo con FEMA 355D, las curvas monotónicas proporcionan una envolvente aproximada a las obtenidas de las curvas histeréticas en las pruebas de carga cíclica. La figura 17 (a) presenta una comparación entre la envolvente numérica y experimental. Se observa una buena correlación entre los puntos de rotación de 0.04 a 0.07 rad. Los puntos de rotación 0.005 a 0.02 corresponden a la componente lineal del sistema y su pendiente representa la rigidez de la conexión.

La figura 17 (b) presenta la curva momento-rotación obtenida por el modelo numérico. El gráfico muestra la superposición de tres curvas. La línea azul representa la envolvente cíclica numérica; la línea roja, que representa la envolvente cíclica experimental; y la línea de puntos naranja, que representa la respuesta monotónica. Se observa que la respuesta monotónica coincide con la curva cíclica hasta 0.06 radianes. Luego, a partir de 0.07 radianes hay una divergencia en los resultados. Sin embargo, no se observa pérdida por resistencia. Es decir, el momento de resistencia de la conexión no se degrada con el avance de la rotación, posiblemente por la condición de simetría asignada y por el desplazamiento monótono. La curva monótona proporciona una buena aproximación al comportamiento histérico hasta 0,06 radianes. Si se utiliza esta aproximación, el tiempo de cálculo se reduce unas 360 veces. De esta forma, se reduce considerablemente la demanda de recursos de hardware. Esto, con la ventaja de que este análisis proporciona una buena estimación del mecanismo de plastificación y la ubicación de la rótula plástica. **Con estos resultados se da cumplimiento al objetivo #5.**

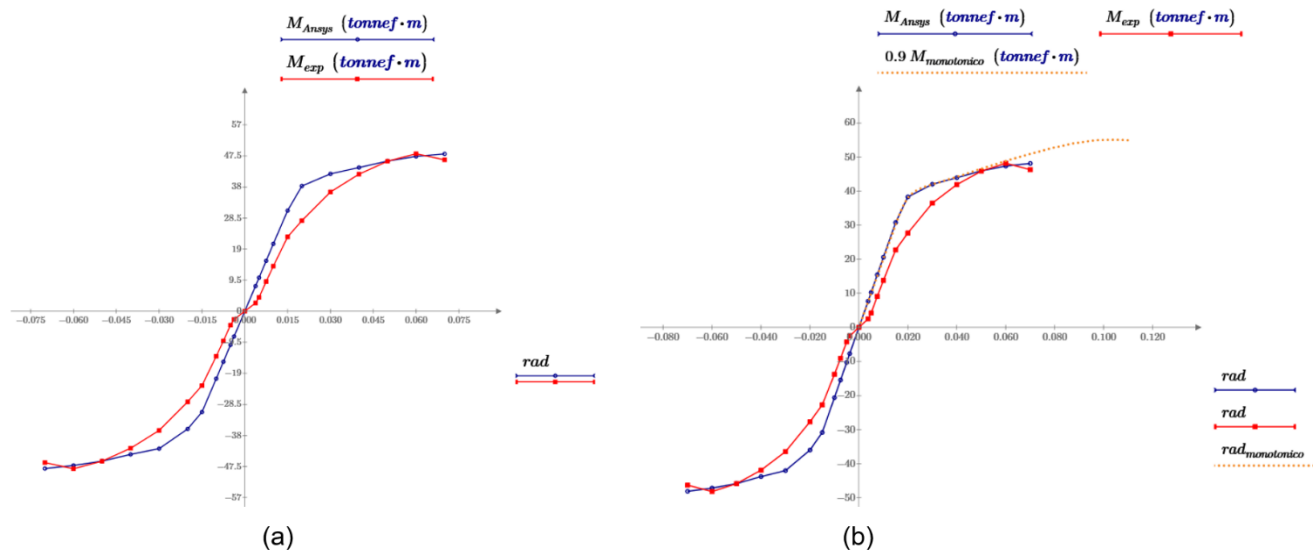


Figura 17. (a) Envolvente numérica de la curva momento-rotación; (b) Comparación de envolvente monótona, cíclica y experimental.

Además del cumplimiento de la totalidad de los objetivos hasta este punto, se realizaron tareas adicionales. Por ejemplo, dos simplificaciones en el modelo numérico fueron realizadas. En la primera, se retiró el apoyo lateral la viga de con el fin de verificar el comportamiento de la conexión con una rigidez lateral infinita. Esto se hizo estableciendo la condición de desplazamiento fuera del plano igual a cero para reproducir la condición óptima recomendada por la norma. La figura 18 (a) presenta una comparación entre las envolventes obtenidas de los modelos numéricos monótonos y cíclicos utilizando esta simplificación y la curva experimental. Se puede observar que la curva de prueba monótona representa un comportamiento similar a la curva cíclica y experimental en la parte elástica lineal. A partir de un ángulo de rotación de 0.015 rad, existe una diferencia entre los resultados debido a la simplificación de este modelo, sin embargo, sigue siendo una buena representación del fenómeno estudiado haciendo uso de menos recursos computacionales. La figura 18 (b) muestra el mecanismo de plastificación del modelo simplificado con apoyo lateral igual a cero. En esta figura, la ubicación de la rótula plástica se puede observar para diferentes ángulos de rotación.

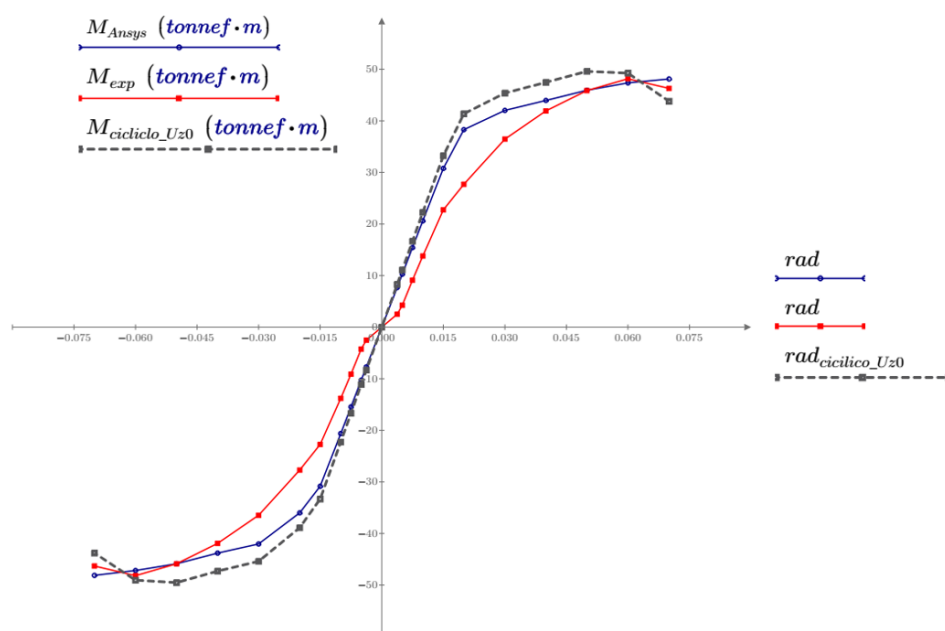


Figura 18. (a) Curva comparativa de envolvente monotónica, cíclica y experimental

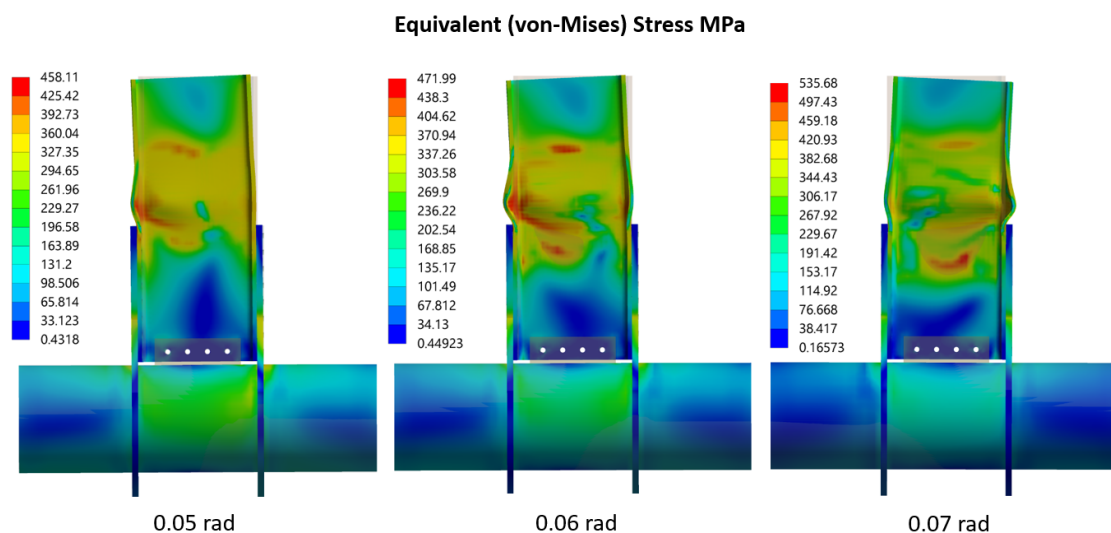


Figura 18. (b) Mecanismo de plastificación con soporte lateral igual a cero.

La segunda simplificación del modelo numérico estuvo motivada por la idea de reducir significativamente el tiempo computacional requerido para analizar el comportamiento del sistema. La idea clave fue utilizar elementos de línea en las áreas remotas de la rótula de plástico. Esto, mientras se cuida la compatibilidad nodal entre los elementos sólidos y los elementos de línea. De esta manera, el modelo se configuró de la siguiente manera: i) protocolo de desplazamiento: se aplicó el protocolo de desplazamiento monótonico sobre la placa de transmisión que se modela como un elemento sólido; ii) apoyos: los apoyos se implementaron a través de elementos sólidos; iii) contactos: el contacto del diafragma de la viga es de tipo friccional; iv) Pernos: los pernos se modelaron como un elemento tipo línea respetando la geometría circular del perno y la conectividad entre diafragma línea-agujero y elementos viga línea-agujero; v) pretensado: se configuró el pretensado a los elementos de línea; vi) Modelo de material: igual que el primer modelo.

El modelo se discretizó segmentando la línea que forma la viga en dos partes. La ubicación geométrica de esta división corresponde a la distancia donde se debe proporcionar soporte lateral. Todos los detalles geométricos y condiciones de contorno se explican en detalle en el artículo 2 adjunto en preparación: Ramírez et al. Rendimiento sísmico de una viga de acero en T doble y una conexión de columna tubular de acero rellena de hormigón, análisis numérico.

El análisis se elevó a un nivel de rotación de 0,11 radianes en términos de la tendencia de degradación de la resistencia. Esto, debido al pandeo local en las alas de la viga. La curva verde de la figura 19 (a) describe este comportamiento, que corresponde a lo esperado una vez que se produce el efecto de pandeo. La falla de pandeo local se muestra en la figura 19 (b). Estos resultados dan una buena aproximación al comportamiento real.

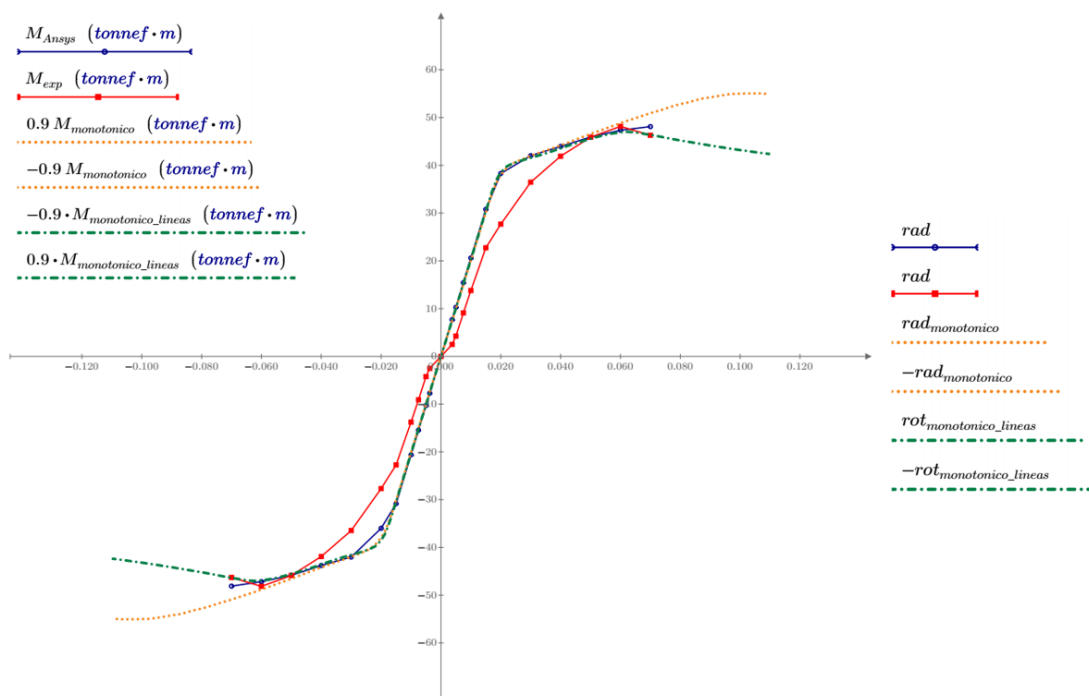


Figura 19. (a) Curva comparativa de envolvente monotónica para el modelo simplificado con elementos tipo línea.

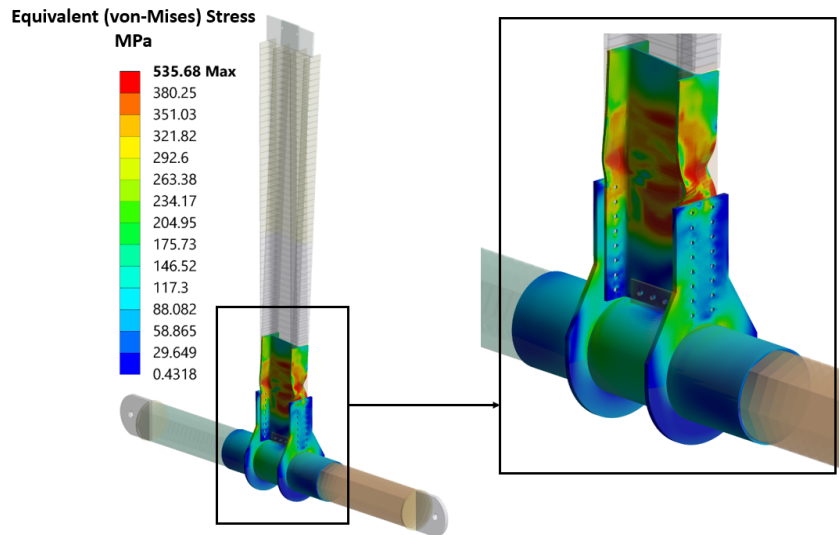


Figura 19. (b) Resultados de falla por pandeo local para el modelo el modelo simplificado con elementos tipo línea.

Principales conclusiones

Varias de las conexiones utilizadas en SMF no están homologadas según las regulaciones de diseño actuales. Por tanto, se requieren estudios para asegurar que los marcos diseñados disipen su energía en las vigas sin afectar las conexiones. En este contexto, este trabajo presentó el análisis del comportamiento inelástico de una conexión de viga de acero doble T y pilar tubular de acero relleno de hormigón.

Durante la experimentación se observó que las vigas auxiliares presentaban deformaciones fuera del plano debido a su baja rigidez. Por lo tanto, se produjo un pandeo lateral por torsión en la viga. A pesar de esto, el diagrama de histéresis no mostró una pérdida dramática de resistencia debido a este fenómeno.

Se observó que a un ángulo de rotación de 0.04, la resistencia a la flexión de la conexión medida a la cara de la columna fue de 32.57 tonf-m. Valor que supera 1.12 veces el 80% del momento plástico M_p (29,1 tonnef-m). De esta manera, satisfaciendo el requisito de la NRS-10 para la calificación de conexiones pertenecientes a pórticos resistentes a momentos con especial disipación de energía. El momento de resistencia máximo alcanzado por la conexión fue de 48,17 tonf-m con una rotación de 0,06 rad. Adicionalmente, la prueba mostró que la ubicación de la rótula de plástico, Sh , estaba un 24% más alejada de la cara de la columna de lo que se suponía inicialmente en la etapa de diseño.

Los experimentos mostraron que la conexión exhibe un comportamiento histerético dúctil con ciclos estables y grandes áreas de disipación de energía. Cabe señalar que la inclusión de los diafragmas contribuyó en gran medida al buen comportamiento de la conexión. Esto, al transmitir las tensiones de compresión y tracción generadas por la flexión al tiempo que se permite una distribución adecuada sobre una gran parte de la periferia de la columna. Además, se observó un efecto positivo al rellenar la columna con concreto, ya que esto disminuyó la posibilidad de pandeo local de acuerdo a lo reportado por Raychowdhury & Hutchinson (Raychowdhury & Hutchinson, 2009). Por lo tanto, la conexión propuesta es adecuada para ser utilizada en estructuras de marco de momento especiales ubicadas en áreas de alta amenaza sísmica.

El modelo numérico mostró que se capturó el efecto no lineal de la conexión con buenos resultados en cuanto a la ubicación de la rótula plástica y el mecanismo de plastificación.

El modelo FEM mostró que las pruebas monotónicas proporcionan una envolvente aproximada a la obtenida a partir de curvas histeréticas en pruebas cíclicas de carga hasta 0.05 rad.

Para reducir la incertidumbre en el comportamiento de la conexión cuando se suministra un soporte lateral con rigidez lateral adecuada, se reprodujo el ensayo experimental mediante FEM. Esto, incluyendo el contacto con las vigas de soporte laterales y el efecto de pandeo lateral por torsión. Una vez validado este modelo, se realizó una nueva simulación cambiando la condición de contorno en los puntos de apoyo por una restricción de desplazamiento lateral nula. Para este caso, se observó que los resultados del modelo para la cantidad de movimiento son 8.2% más altos hasta 0.05 radianes; alrededor de 0,06 radianes la diferencia porcentual disminuye a 4% aproximadamente y alrededor de 0,07 radianes el valor es menor con una diferencia porcentual cercana al 9%.

Finalmente, es importante mencionar que el mecanismo de plastificación obtenido es similar en todos los modelos. Es decir, el modelo FEM completo y sus simplificaciones. Esto indica que, a efectos prácticos, se puede utilizar el modelo que demanda menos recursos computacionales.

Referencias

- American Institute of Steel and Construction (AISC). (2016a)., "AISC 358-16 Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications," 2016.
- American Institute of Steel and Construction (AISC). (2016b)., "AISC 341-16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," 2016.
- American Institute of Steel and Construction (AISC). (2016c)., "AISC 360 Specification for Structural Steel Buildings," 2016.
- American Welding Society (AWS), "AWS.D1.1 Structural Welding Code - Steel," 2020.
- Andrade, C., " Steel I-beam Connections Qualification Connected to Column Weak Axis., Master's thesis. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.," 2015.

- Cheng, C. T., & Chung, L. L., "Seismic Performance of Steel Beams to Concrete-filled Steel Tubular Column Connections," Journal of Constructional Steel Research, vol. 59, no. 3, p. 405–426, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00033-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00033-0).
- Federal Emergency Management agency (FEMA), "FEMA 355D State of the Art Report on Connection Performance FEMA. Constructional Steel Research, 1–305," 2000.
- Hamburger, R. O., Krawinkler, H., Malley, J. O., & Scott M. A., " Seismic Design of Steel Special Moment Frames: A Guide for Practicing Engineers," NEHRP Seismic Design Technical Brief, 2, 37, 2009. <http://www.nehrp.nist.gov/pdf/nistgcr9-917-3.pdf>.
- Raychowdhury, P., & Hutchinson, T. C., "Performance Evaluation of a Nonlinear Winkler-based Shallow Foundation," The Journal of the International Association for Earthquake Engineering, vol. 38, p. 679–698, 2009.
- Vallejo, M. U., & Clement, G. F. V., "Evaluating a Steel Beam's Rigid Connection to a Concrete Filled Tubular Column when Submitted to Dynamic Load," Ing. Investig, vol. 29, no. 1, pp. 24-34, 2009.
- Zareian, F., Lignos, D. G., & Krawinkler, H., "Evaluation of Seismic Collapse Performance of Steel Special Moment Resisting Frames using FEMA P695 (ATC-63) Methodology," Structures Congress 2010, pp. 1275-1286, 2010. [https://doi.org/10.1061/41130\(369\)116](https://doi.org/10.1061/41130(369)116).

Recomendaciones

El aumento de SMF motiva el uso de nuevas conexiones no homologadas bajo la normativa de diseño actual. Se requieren estudios para asegurar que los marcos diseñados disipen su energía sísmica en las vigas sin afectar las conexiones.

4. Impactos actual o potencial:

Haga una descripción y/o relacione los impactos que tenga el proyecto en los diferentes ámbitos:

Académico (aportes a la docencia, aportes a la formación de recursos humanos)

Como aportes académicos se considera el aporte a la docencia que representa el modelo numérico, incluyendo sus simplificaciones. Este modelo, puede ser presentado en el curso de diseño por elementos finitos u otros cursos de la especialización en estructuras de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, ilustrando como diferentes simplificaciones pueden conducir a resultados con un nivel de precisión satisfactorio. Además, se puede ilustrar la construcción de dicho modelo y su comparación basándose en los resultados experimentales. En este sentido, a partir de este trabajo se pueden construir estudios de caso.

Investigativo (divulgación de resultados)

- Reducir la vulnerabilidad sísmica de edificaciones que implementen pórticos resistentes a momento con capacidad especial de disipación de energía utilizando conexiones como la desarrollada en este proyecto para columnas circulares compuestas
- Mejorar las prácticas constructivas en Colombia ofreciendo una nueva conexión al abanico de conexiones calificadas disponibles para construcción de edificios de baja y media altura.
- Tener una divulgación adecuada de los resultados del proyecto a entidades como el Instituto Colombiano de la construcción en acero (ICCA) para que esta sea cobijada dentro de las conexiones calificadas en Colombia.

Desarrollos futuros

Como trabajos futuros se consideran:

1. Análisis del comportamiento Inelástico de una conexión Viga doble T – Columna HSS sin relleno de concreto.
2. Análisis del comportamiento Inelástico de una conexión Viga doble T – Columna HSS con perfiles armados.
3. Modelamiento numérico de conexiones Viga doble T – Columna HSS considerando efectos bidireccionales.
4. Análisis del comportamiento Inelástico al añadir costillas como refuerzo.
5. Desarrollo del modelo numérico para incluir el efecto de estrangulamiento debido al efecto de holgura.

5. Productos:

Tabla No. 1. **Cantidad y tipo de productos pactados en el Acta de Trabajo y Compromiso y productos finalmente presentados**

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
Productos de nuevos conocimientos								
Artículo en revista ISI-SCOPUS:	Q 1	Q2	Q3	Q4	Q 1	Q2	Q3	Q4
		2, al menos uno aprobado				1 en revisión, otro		

		para publicación				en el 90% de preparación		
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A 1	A2	B	C
Libros de autor que publiquen resultados de investigación								
Capítulos en libros que publican resultados de investigación								
Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados								
• Prototipos y patentes								
• Software								
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial								
Normas basadas en resultados de investigación								
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados	No. de tesis	No. De estudiantes Vinculados	No. De tesis				
Estudiantes de pregrado								
Semillero de Investigación								
Estudiantes de maestría	1		1					
Estudiantes de doctorado								
Joven investigador								
Productos de divulgación								
Publicaciones en revistas no indexadas								

Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
Propuesta de investigación	1		1	
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.				

Tabla No. 2. Detalle de productos

Para cada uno de los productos obtenidos y relacionados en la tabla anterior, indique la información solicitada para cada uno, anexando copia de las respectivas constancias. Como anexo a este formato encontrará el instructivo para instructivo para la revisión de informes finales y productos

Tipo de producto:	Vinculación de estudiante de Maestría
Nombre General:	Estudiante Christian Ramírez Ortiz
Nombre Particular:	Vinculación de estudiante de Maestría
Ciudad y fechas:	Cali, Valle. Estudiante vinculado en septiembre de 2019.
Participantes:	Christian Ramírez Ortiz
Sitio de información:	Archivos de contratación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Fatiga y Superficies (GIFS)

Tipo de producto:	Presentación en evento académico
Nombre General:	Semana de la Ingeniería, Universidad del Valle, 18 al 21 de noviembre del 2020.

Nombre Particular:	Análisis y Diseño de Una Conexión Viga Doble T – Columna Circular Compuesta Implementando Costillas Como Refuerzo.
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, 18 al 21 de noviembre de 2020.
Participantes:	Albio D. Gutierrez, Cristhian Ramírez, Ruth Edmy Cano, Luis Felipe Gonzales, José L. Ramírez.
Sitio de información:	Memoria digital del evento Semana de la Ingeniería, Universidad del Valle, 18 al 21 de noviembre del 2020. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Fatiga y Superficies (GIFS)

Tipo de producto:	Artículo científico sometido a revista Q2.
Nombre General:	Artículo sometido a la revista Results in Engineering, ISSN: 2590-1230.
Nombre Particular:	Seismic Performance of a Double T Steel Beam and Concrete-filled Steel Tubular Column Connection, Experimental Study
Ciudad y fechas:	Cali, agosto 6 de 2021.
Participantes:	Christian Ramírez Ortiz, Gilberto Areiza Palma, Albio D. Gutierrez Amador José L. Ramírez Duque, Ruth E. Cano Buitron2, Luis F. Gonzales Escobar.
Sitio de información:	Archivos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle.
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Fatiga y Superficies (GIFS)

Tipo de producto:	Artículo científico aprobado para publicación en revista Q2. (Este artículo se encuentra en preparación. Se estima que en un 90%)
Nombre General:	
Nombre Particular:	Seismic Performance of a Double T Steel Beam and Concrete-filled Steel Tubular Column Connection, Numerical Analysis.



Ciudad y fechas:	
Participantes:	Christian Ramírez Ortiz, Albio D. Gutierrez Amador José L. Ramírez.
Sitio de información:	
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Fatiga y Superficies (GIFS)

La presente versión del informe contiene las observaciones de los evaluadores:

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones