

Consideraciones sísmicas para conexiones resistentes a momento con columnas de sección cuadrada y vigas W

Seismic Considerations for Moment Connections Between Box Columns and Wide Flange Beams

Wilson Alberto González Arroyo^{1*}, Gerardo Enrique Chacón Rojas²

Resumen

Los edificios de acero que usan columnas en cajón hueco y vigas en perfiles W, se utilizan con relativa frecuencia en Costa Rica. Su configuración estructural, permite que la rigidez en planta de los edificios sea similar, y además permite que todos los elementos de los marcos tomen cargas laterales y sean sismorresistentes, configuración que es muy apreciada en el país. Otros países como Japón y Nueva Zelanda han desarrollado conexiones precalificadas para este tipo de estructuras, las cuales se están estudiando para ser incluidas en el Anexo B, de la nueva edición del Código Sísmico de Costa Rica. Sin embargo, existe una oportunidad para desarrollar conexiones columna tubular y vigas W que se adapten a las prácticas constructivas del país, y cuya ductilidad no requiera ser tan alta como para ser usado en marcos SMF, si no, más bien, en marcos intermedios (IMF). En el presente trabajo se presentará un breve recorrido por las prácticas usadas en países como Japón, Nueva Zelanda e Irán, así como los resultados de estudios desarrollados en este último país. Por otra parte, se presentarán los resultados preliminares de modelaciones en elemento finito de algunas conexiones propuestas para el país desarrolladas en el Programa de Investigación de Modelación de Estructuras y Terrenos de la Universidad Latina de Costa Rica.

Palabras clave: conexión resistente a momentos, prueba estándar, elementos finitos, histéresis.

Abstract

Columns in hollow steel structural section and beams in W profiles are common in Costa Rica's steel buildings. Their structural configuration allows the stiffness of the buildings to be similar, and also let all the elements of the frames take lateral loads and be seismic resistant, a configuration that is highly appreciated in the country. Other countries such as Japan and New Zealand have developed prequalified connections for these types of structures, which are being studied to be included in Annex B, of the new edition of the Costa Rica Seismic Code. However, there is an opportunity to develop tubular column connections and W beams that adapt to the construction practices of the country, and whose ductility does not have to be so high as required for Special Moment Frames (SMF), thus making it more suitable for Intermediate Momento Frames (IMF). This paper will show the practices used in countries such as Japan, New Zealand and Iran, as well as the results of studies developed precisely in this last country. On the other hand, the preliminary results of finite element modeling of some proposed connections for the country developed in the Structures and Land Modeling Research Program of the Universidad Latina de Costa Rica will be presented.

Keywords: moment-resistant connection, standard test, finite elements, hysteresis.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a los criterios de diseño de los códigos americanos de construcción con acero, las conexiones para marcos resistentes a momento, consideradas como completamente restringidas, requieren de una alta disipación de energía durante un evento sísmico de gran magnitud. Esta disipación de energía es generada mediante el desarrollo de deformaciones de orden plástico localizadas en las vigas, en la llamada “zona protegida”, en la cercanía de la conexión. Estas deformaciones inelásticas requieren de un alto desarrollo dúctil de esta zona de la viga. Esto se produce mediante un

detallado diseño de la conexión que, pretende generar una unión lo suficientemente rígida como para inducir una mayor concentración de esfuerzos en esta zona de la viga y no en la conexión, promoviendo el desarrollo dúctil de la sección de la viga. (FEMA 350, 2000, págs. 2-3).

Para garantizar un comportamiento adecuado de las conexiones, la Agencia Federal de Manejo de Emergencias de Estados Unidos (FEMA), y el Instituto Americano de Construcción con Acero (AISC), proponen una prueba de laboratorio estándar, que consiste en el ensayo de modelos a escala real de la conexión, como se indica en la figura 1. Estos modelos son sometidos a un protocolo de desplazamientos inducidos en la punta libre de la viga, reproduciendo en la conexión, los ángulos *máximos* de deriva que se generan a consecuencia de los desplazamientos laterales en una estructura de marcos resistentes a momento, durante un sismo de gran magnitud.

En la actualidad existen sistemas computacionales de análisis estructural que usan como base el método de elementos finitos, con algoritmos que consideran

* Autor de contacto: gerardo.chacon@ulatina.cr

¹ Licenciado en Ingeniería Civil. Profesor de Mecánica Estática de la Universidad Latina de Costa Rica.

² Licenciado en Ingeniería Civil. Profesor de Diseño de Estructuras de Acero de la Universidad Latina de Costa Rica.

la conducta inelástica de los materiales y que, de forma analítica, pueden brindar resultados muy similares a las pruebas estándar de laboratorio propuestas por los códigos americanos. Por lo que se consideran convenientes para el diseño y evaluación de conexiones de acero resistentes a momento, como un proceso de factibilidad estructural previo a la realización de las pruebas de calificación experimentales.

En el presente trabajo de investigación se analiza la conexión de acero (WUF-W), con columnas de sección cuadrada, para su evaluación según las pruebas de calificación de las normas del AISC. Dado que las pruebas de laboratorio tienen un alto costo económico, se toman como referencia los datos de pruebas realizadas en el extranjero, como base para la realización de las simulaciones virtuales y la comparación de resultados. Se hace uso del protocolo de ángulos de deriva, estipulado por el Código ANSI/AISC 341-16 para la evaluación y calificación de conexiones resistentes a momento. En concordancia con las pruebas de laboratorio, se realizan simulaciones virtuales del proceso de prueba estándar, auxiliado por el programa de análisis estructural ANSYS Workbench 18.1, con el objetivo de obtener los diagramas de histéresis correspondientes a las pruebas. Para el análisis se acogen los conceptos y teorías de la normativa americana de construcción con acero ANSI/AISC 341-16, FEMA 350, ANSI/AISC 358-16, ANSI/AISC 360-16, también vigentes en el Código Sísmico de Costa Rica en el capítulo 10 y anexo B.

Para la calibración del programa se usaron las curvas de esfuerzo-deformación de tres tipos de acero estructural, ASTM A36 para la columna, ASTM A572 para la viga y un ASTM A 706 grado 60 para las soldaduras, los mismos materiales reportados de las pruebas de laboratorio realizadas por Saneei y otros en 2013. Para el caso de las soldaduras se modelaron únicamente las soldaduras de tipo filete que aportan un aumento del volumen del material en la conexión, tomando en cuenta las áreas efectivas de las mismas. Las soldaduras de penetración completa con biselados no fueron modeladas, sino simuladas por medio de un comando llamado "Bonded" que asume que

las superficies en contacto no se separan durante la prueba. No fueron incluidos parámetros de fractura u otros datos pertinentes al fenómeno de ruptura del material, por lo tanto, en los modelos de pruebas virtuales no se considera la posibilidad de ruptura como puede ocurrir en los ensayos de laboratorio. En su lugar se ha estimado la posibilidad de fractura de algunas zonas de elementos de la conexión según el estado de esfuerzo y deformación del material, precisamente en las zonas en donde se presentan concentraciones de esfuerzos y deformación unitaria con máximos que superan los límites de resistencia del material.

Con el fin de optimizar el tiempo de procesamiento de datos del modelo de elemento finito, en el modelado de las pruebas de la conexión se han tomado en cuenta únicamente los parámetros estrictamente necesarios para obtener resultados aceptables en comparación con las pruebas reales de laboratorio, es decir, que se han omitido elementos propios del banco de pruebas. Algunos elementos de la conexión, como las soldaduras, se modelaron no de forma idéntica a las prácticas constructivas, pero sí de manera representativa de acuerdo a los criterios de diseño. Por lo tanto, los resultados presentes en esta investigación deben ser corroborados por medio de pruebas reales, tal y como lo estipula el AISC.

Para la prueba estándar se define el punto de intersección del eje neutro de la viga y eje neutro de la columna como el punto de rotación de la prueba para cualquier configuración de una conexión resistente a momento, como se muestra en la figura 1 (FEMA 350, 2000, págs. 3-75).

En el gráfico de la derecha, figura 1, se observa el protocolo de ángulos de deriva cíclicos a los cuales es inducido el modelo durante la prueba. Lo cual brinda como resultado los llamados diagramas de histéresis, en los cuales se registra la respuesta elástica e inelástica de la sección de viga conectada, que obedece a los ángulos de deriva inducidos durante la prueba estándar. Parámetros con los cuales la conexión es calificada para ser usada en marcos ordinarios (OMF), intermedios (IMF) o especiales a momento (SMF).

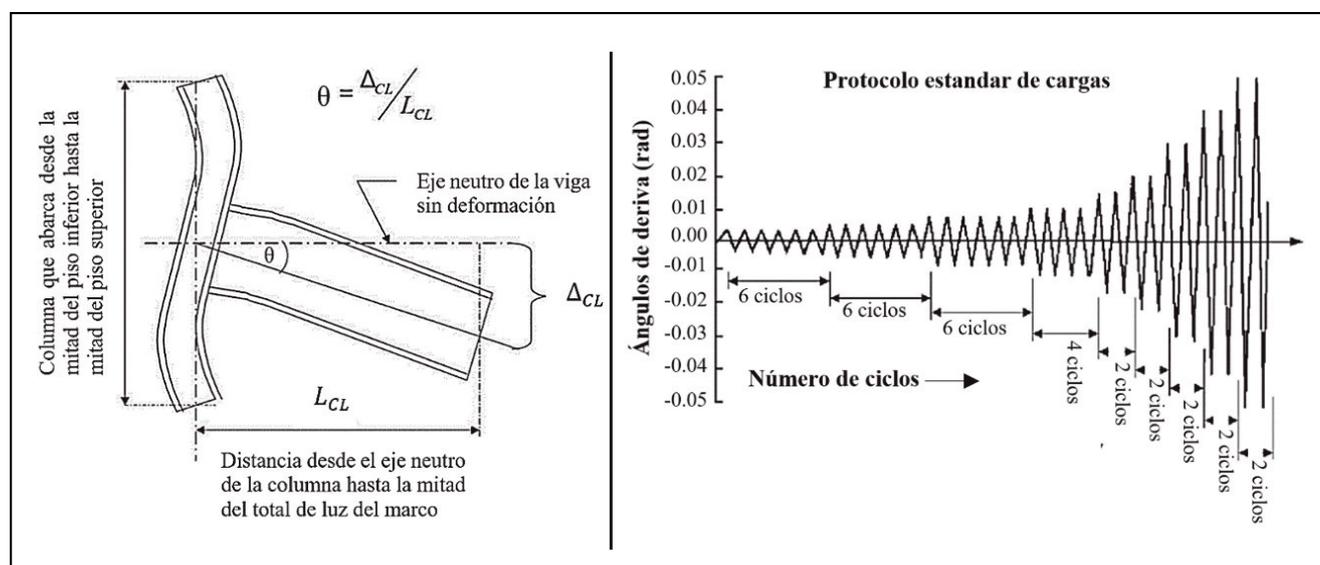


Figura 1. Izda.: ensamble de prueba de prueba estándar de la conexión. Dcha.: protocolo de ciclos y ángulos de deriva según FEMA 350 y AISC 341-16.

2. CONEXIONES ENTRE VIGA DE SECCIÓN W Y COLUMNAS DE SECCIÓN CUADRADA

En los códigos de construcción con acero americanos hay poca participación de conexiones con columnas de sección cuadrada, sin embargo, en países asiáticos de alta sismicidad, este tipo de sección es muy valorada por poseer dos ejes fuertes lo cual contribuye con la rigidez lateral de marco en ambos sentidos, otorgando una alta resistencia a la flexión biaxial en comparación con las columnas de ala ancha. Además, las conexiones entre columnas de sección cuadrada y vigas W utilizadas en la mayoría de los países asiáticos parecen cumplir con un comportamiento dúctil adecuado según las normas americanas para marcos especiales (SMF) o intermedios (IMF) a momento. Por esta razón, considerando el uso de este tipo de conexiones en Costa Rica, se realiza un análisis por elementos finitos de la conexión precalificada por el AISC llamada “welded unreinforced flange-welded web” [alas soldadas sin refuerzo y alma soldada] (WUF-W); en este caso, con columnas de sección cuadrada, construidas a partir de placas de acero. Este análisis está basado en pruebas reales de laboratorio, realizadas en la Universidad de Teherán en Irán, donde fueron sometidas al protocolo estándar de *ángulos de deriva*, 3 pares de especímenes de distinto tamaño de la conexión WUF-W con columnas cuadradas y diafragmas internos, para tres tamaños de edificación, de siete pisos, de doce pisos y veinte pisos, respectivamente.

El primer objetivo de la investigación consistió en realizar la calibración del programa de análisis estructural por elemento finito, llamado ANSYS WorkBench, y la realización de las pruebas en forma virtual, de manera que se obtuvieran diagramas de histéresis similares a los obtenidos en las pruebas realizadas en Teherán. De los tres especímenes analizados, el más grande presentó los resultados más similares. Por lo que, posteriormente, se realizaron cambios en este modelo respecto a la configuración de la conexión con el objetivo de analizar la influencia positiva o negativa de estos cambios en el comportamiento histérico de la conexión. A continuación, se presentan los resultados de histéresis obtenidos de forma virtual superpuestos sobre los diagramas obtenidos en las pruebas reales de laboratorio, para su comparación.

Como se ve en la figura 2, los resultados de las pruebas virtuales coinciden satisfactoriamente con los diagramas de las pruebas reales. Únicamente el espécimen virtual mediano registró menor resistencia en el análisis virtual con respecto del resultado real. Dados los resultados se escogió el modelo virtual del espécimen grande de la conexión para los siguientes análisis debido a que este presentó

los resultados más similares. A continuación, se presentan los modelos analizados y sus respectivos diagramas de histéresis.

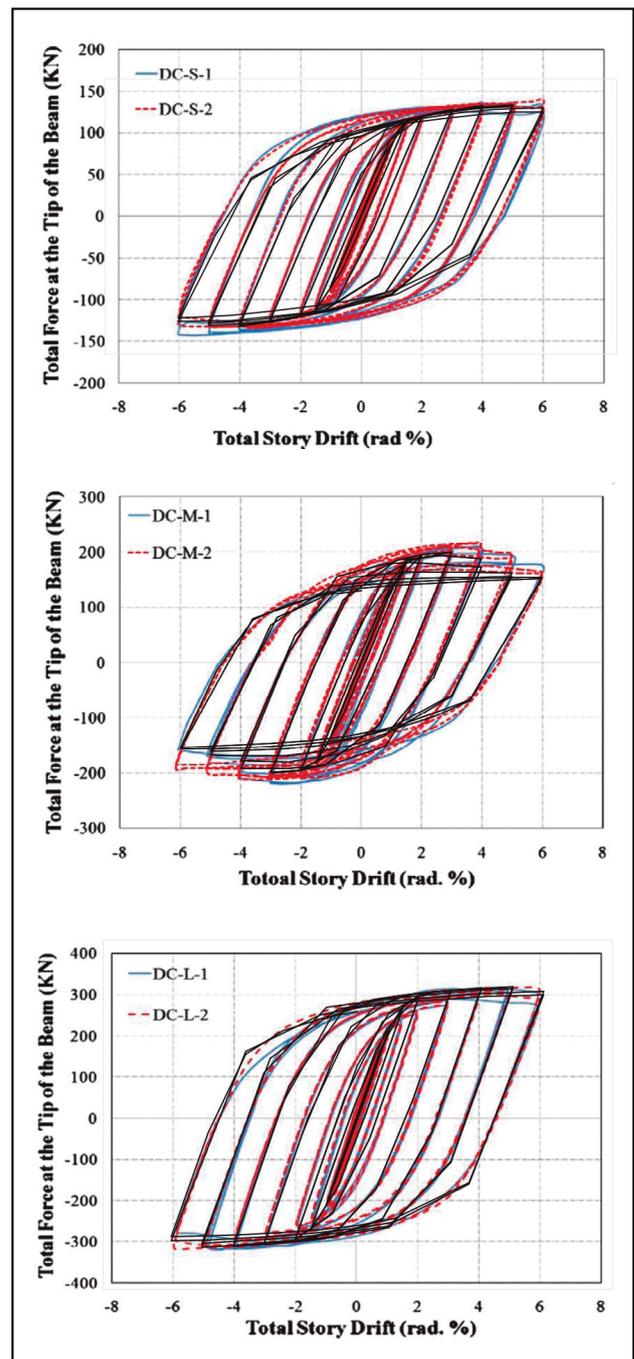


Figura 2. Resultados de histéresis virtuales (color negro) superpuestos sobre resultados reales (color rojo y celeste). De arriba abajo, el espécimen pequeño, mediano y grande, respectivamente (Saneei, Ghassemieh y Mazroi, 2013).

3. CONEXIÓN WUF-W CON DIAFRAGMAS INTERNOS

Según la norma americana, si la conexión alcanza ángulos de deriva de 0.04 rad y se registra en el diagrama de histéresis una resistencia inelástica ante la flexión igual o mayor que el 80% de la capacidad a momento plástico de la sección de la viga, esta conexión se considera una conexión especial a momento (SMF), debido a su alto desarrollo de ductilidad (ANSI/AISC 341-16, 2016, págs. 91-229). Tal es el caso de los resultados de la conexión con diafragmas internos, analizados en laboratorio y de forma virtual, que presentan valores de resistencia a la flexión, mayores al 80% del momento plástico de la sección de la viga al alcanzar ángulos de deriva de 0.04 rad (ver figura 3).

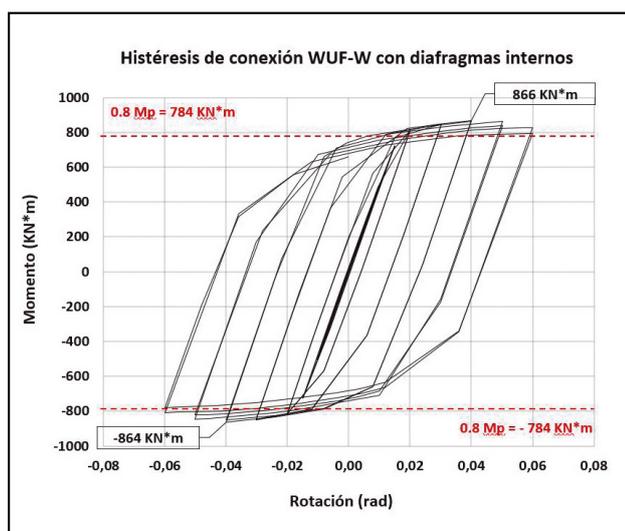


Figura 3. Diagrama de histéresis de conexión WUF-W con diafragmas internos. Resultado del modelo de elementos finitos.

En la figura 4 se presenta una fotografía del ensayo real y a su derecha una imagen del modelo de elementos finitos por medio de un mapa de colores: con colores cálidos las zonas que sufrieron mayores esfuerzos y en colores fríos

las zonas que no sufrieron poco esfuerzo. Es notable que la deformación plástica se genera en la sección de la viga después de la placa de refuerzo cortante del alma de la viga. Ambas imágenes presentan deformaciones similares en cuanto al pandeo local del ala y del alma de la viga. La zona de panel se mantiene en el rango elástico en el modelo de elementos finitos, tal y como se refleja en la fotografía de laboratorio.

Además, el análisis de elemento finito señala una concentración máxima de esfuerzos justo en los agujeros de acceso para las soldaduras principales, con una magnitud de 492 MPa, superior al esfuerzo último del acero A572 de 485 MPa empleado en la viga, por lo que es probable que en esta zona de la conexión se puedan producir fracturas debidas a la discontinuidad del flujo de esfuerzos en este punto. Las zonas de color amarillo como las alas de la viga presentan magnitudes entre los 350 y 385 MPa, lo cual evidencia un elevado desarrollo plástico de las mismas. En el diagrama de histéresis (figura 3), se observa cómo la sección alcanza el endurecimiento por deformación a partir de los ciclos de 0.02 rad y continúa aumentando hasta los ciclos de 0.05 rad.

Según lo analizado, esta conexión con diafragmas internos presenta resultados aceptables dentro de los criterios de resistencia para una conexión especial a momento. Sin embargo, durante la prueba por elementos finitos se nota que el proceso de plastificación comienza luego de alcanzar los 0.02 rad en las puntas de las alas de la viga justo en la conexión. Esto se observa mediante una animación de la prueba brindada por el programa. También se nota que, en los ciclos de carga siguientes, los esfuerzos permanecen en estas esquinas de las alas de la viga y conforme van aumentando se distribuyen a lo largo de las alas más allá de la conexión, pero se mantienen presentes durante toda la prueba en las esquinas, lo que sugiere que las soldaduras principales puedan ser vulnerables ante una fractura debida a posibles discontinuidades del material, porosidades, microfisuras o algún otro precursor de fractura. El modelo utilizado estima que esta configuración con diafragmas

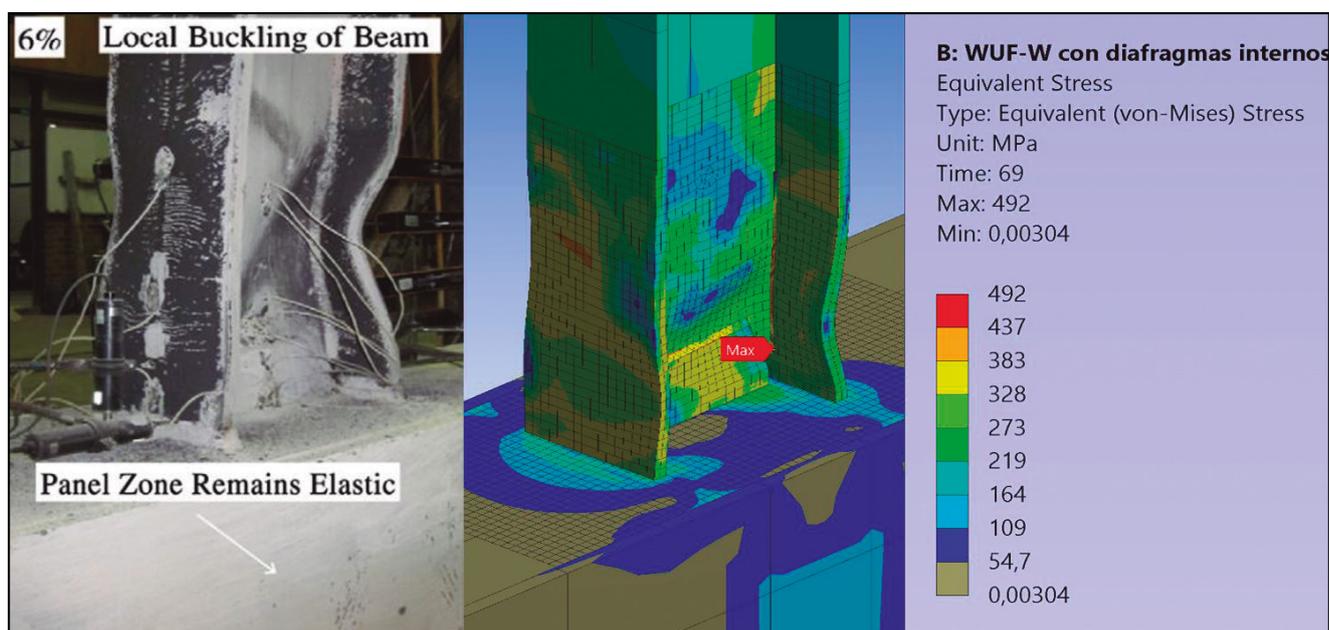


Figura 4. Ubicación de la rótula plástica. Izda.: fotografía del ensayo real (Saneei, Ghassemieh y Mazroi, 2013). Dcha.: imagen del análisis del análisis virtual de elementos finitos.

internos puede ser recomendada para marcos que requieran ductilidades intermedias con valores de deriva que no sobrepasen 0.02 rad.

4. CONEXIÓN WUF-W SIN DIAFRAGMAS INTERNOS

Debido a la aparición temprana de concentraciones de esfuerzos en las esquinas de las soldaduras principales, se optó por remover los diafragmas internos como primer cambio en la conexión para determinar la influencia de estos en el comportamiento de la zona de panel y la capacidad la conexión de producir rótulas plásticas en la zona protegida de la viga, sin los diafragmas internos. En el diagrama de histéresis (figura 5), se presentan los resultados de la conexión con diafragmas internos (línea color verde) y se comparan con los resultados de la conexión sin los diafragmas internos (línea color negro).

La rigidez de la conexión se ve significativamente afectada por la ausencia de los diafragmas internos. Lo cual sugiere que la conexión sin diafragmas, entre viga W y columna de sección cuadrada, no es lo suficientemente rígida ante la rotación para lograr que la sección de viga alcance un alto desarrollo de ductilidad. Debido a lo anterior, los esfuerzos se concentran en la cara de la columna y no en la viga, generando plastificación en las soldaduras principales como se observa en la figura 6. Por lo tanto, lo que refleja el diagrama de histéresis es la respuesta de la cara de la columna y no la respuesta de la sección de la viga. Este resultado del modelo sugiere que la conexión no puede ser considerada como una conexión resistente a momento, debido a que no cumple con la restricción necesaria para inducir las deformaciones en la viga. Las pruebas realizadas por Flores y otros en 2010 sobre conexiones similares, mostraron fallas por delaminación de la soldadura en las conexiones de los patines de las vigas, res, antes de que la

conexión fuera capaz de desarrollar la capacidad de momento de la viga, lo que confirma los resultados numéricos obtenidos.

Según un estudio realizado de conexiones de secciones W y vigas HSS por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, “en la construcción de edificios de acero muchas de las conexiones se sueldan directamente a la columna tubular en forma simple, con soldaduras de filete en todas las posiciones, ya que esta unión se realiza frecuentemente en campo” (Flores y Bernal, 2010). Este estudio revela que este tipo de conexiones sin ningún tipo de rigidizador interno, no cumple con los criterios de diseño para una conexión rígida, lo cual se ve reflejado en los resultados del análisis por elemento finito del presente análisis.

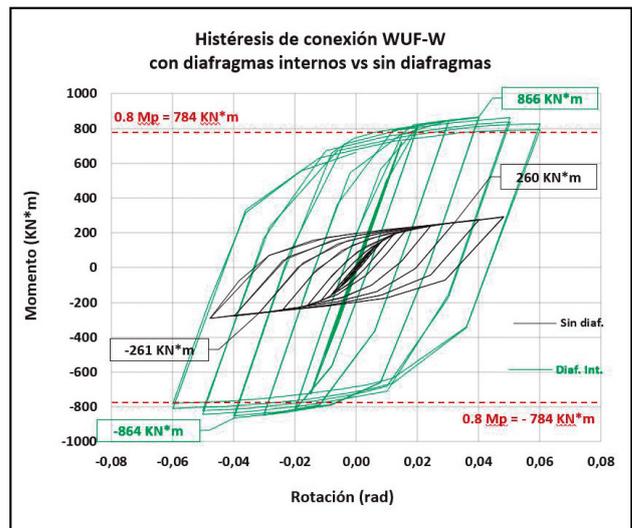


Figura 5. Comparación del diagrama de histéresis de la conexión con diafragmas internos (línea color verde) y el diagrama de histéresis de la conexión sin diafragmas internos (línea color negro).

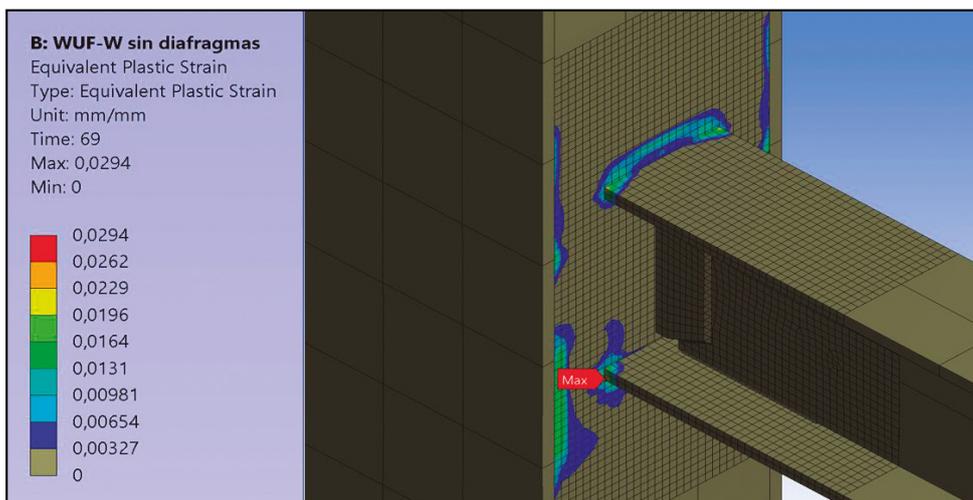


Figura 6. Modelo de conexión WUF-W sin diafragmas internos. Resultado equivalente plástico por elementos finitos. Muestra las zonas del modelo que superaron el límite proporcional elástico. Con una deformación unitaria máxima del 2,9% en este modelo.

5. CONEXIÓN WUF-W SIN DIAFRAGMAS INTERNOS Y RBS

Debido a que, en la ausencia de los diafragmas internos, la zona de panel de la columna no posee la rigidez necesaria, se realizó una reducción de las alas de la viga, del tipo RBS, tal y como especifica la norma AISC 358-16, con la intención de inducir mayormente las concentraciones de esfuerzos y promover las deformaciones plásticas en esta zona, alejándolas de la cara de la columna y las soldaduras principales.

Como se ve en la figura 7, el diagrama de histéresis muestra un comportamiento muy similar al resultado con la sección de viga completa, en ambos modelos se alcanzó prácticamente la misma resistencia y se observa un comportamiento histérico muy similar.

En una animación de la prueba brindada por el programa, se puede observar una mayor participación de la zona protegida de la viga para el modelo con la sección reducida (RBS) a diferencia del modelo con la sección de viga completa. En el caso de viga con sección reducida, la zona reducida acoge una cantidad significativa de esfuerzos a partir de los ciclos de 0.005 rad en adelante, a diferencia del modelo con la sección de viga completa que presenta esfuerzos hasta los ciclos de 0.01 rad. Así pues, este análisis sugiere que la reducción de la viga ayudó en alguna medida a alejar los esfuerzos de la conexión, pero no lo suficiente como para producir un desarrollo dúctil de la sección de la viga. En la figura 8, se presenta el resultado de equivalente plástico, el cual muestra las zonas del modelo que sobrepasaron el límite proporcional elástico. Como se puede

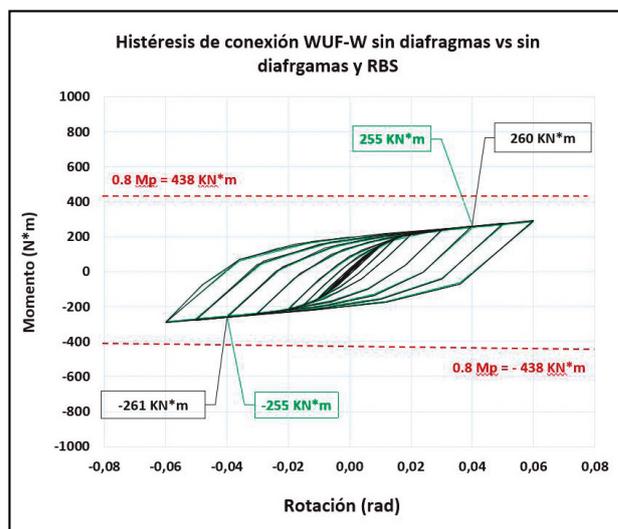


Figura 7. Diagrama de histéresis de conexión WUF-W sin diafragmas internos y viga con sección reducida (RBS). Resultado del modelo de elementos finitos.

observar, al igual que en el caso con la sección de viga completa, el proceso de plastificación se concentra en las soldaduras principales.

Debido a que la sección de viga reducida RBS presenta una influencia positiva en cuanto al alejamiento de los esfuerzos de la conexión, se realizó un análisis del modelo con diafragmas internos y sección de viga reducida, con el objetivo de determinar si la sección reducida de la viga es capaz de generar una rótula plástica, alejando por completo las concentraciones de esfuerzos en la conexión.

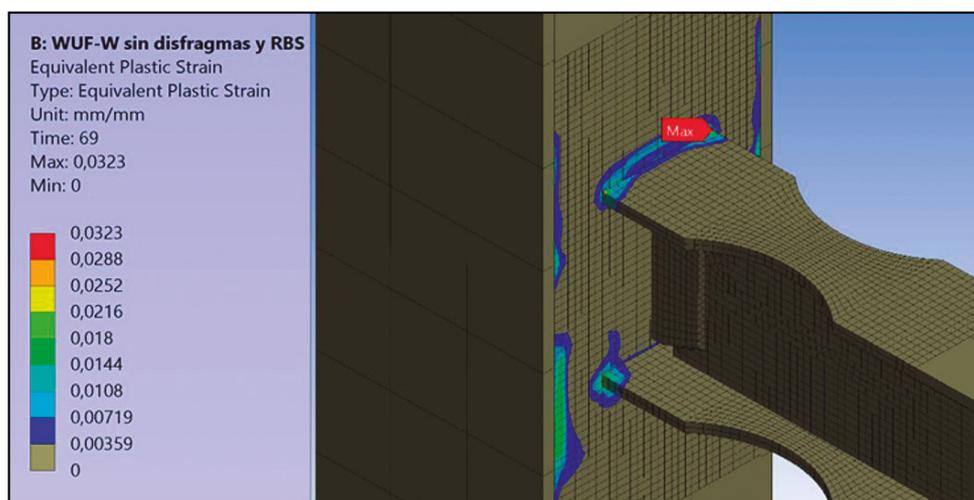


Figura 8. Modelo de conexión WUF-W sin diafragmas internos y con reducción tipo RBS. Resultado equivalente plástico por elementos finitos.

6. CONEXIÓN WUF-W CON DIAFRAGMAS INTERNOS Y VIGA CON SECCIÓN REDUCIDA (RBS)

En el diagrama de histéresis de este modelo (figura 9), se observan resistencias superiores al momento plástico nominal de la sección reducida de la viga después de los ciclos de 0.02 rad, y en aumento de la resistencia debido al endurecimiento por deformación hasta los 0.05 rad, presentando degradación de la resistencia para el último bucle histérico a los 0.06 rad.

Como se esperaba, al realizar una reducción en la sección de la viga en el modelo de la conexión con diafragmas internos, el resultado es el desarrollo de una rótula plástica justamente en la sección reducida como se aprecia en la figura 10, donde se denota una deformación unitaria máxima del 4.0% justamente en el centro de la reducción de la sección.

La resistencia a la flexión se ve disminuida a consecuencia de la reducción de la sección de la viga en comparación con la resistencia plástica nominal de la sección

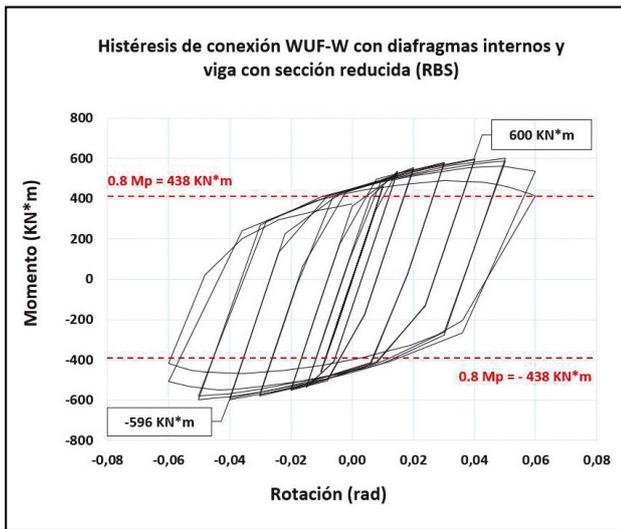


Figura 9. Diagrama de histéresis de conexión WUF-W con diafragmas internos y viga con sección reducida (RBS). Resultado del modelo de elementos finitos.

de viga completa. Sin embargo, los resultados señalan que las concentraciones de esfuerzos se han alejado de la conexión, permaneciendo las soldaduras principales en un rango elástico. Por esta razón se recomienda el diseño de vigas de sección reducida para el caso de las conexiones rígidas con diafragmas internos.

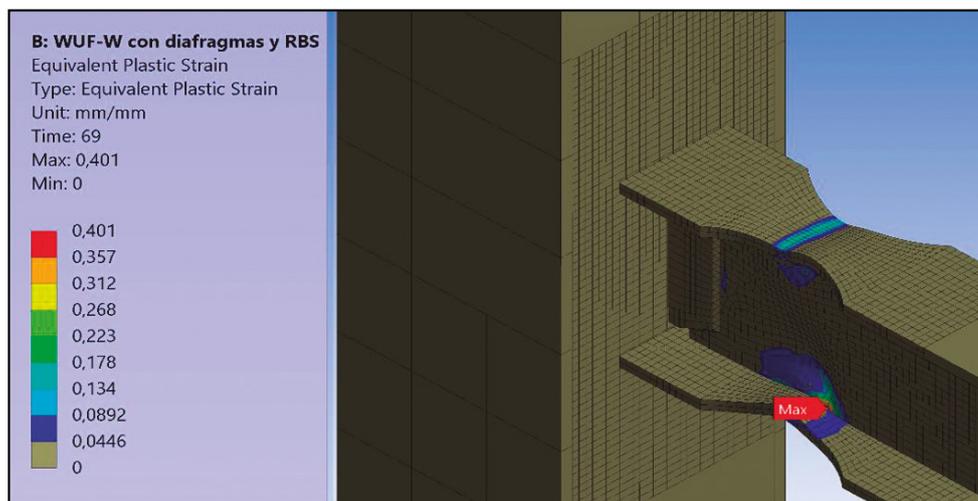


Figura 10. Modelo de conexión WUF-W con diafragmas internos y con reducción tipo RBS. Resultado equivalente plástico por elementos finitos. Con una deformación unitaria máxima del 4,0 %.

7. CONEXIÓN WUF-W SIN DIAFRAGMAS INTERNOS CARA DE COLUMNA MÁS GRUESA

En este modelo se eliminaron los diafragmas internos y en su lugar se aumentó el espesor de la cara de la columna conectada, hasta una pulgada, con el propósito de analizar si este aumento en el espesor consigue otorgar la rigidez necesaria en la zona del panel, para inducir las deformaciones en la sección de la viga.

En el diagrama de histéresis se aprecia un notable aumento en la resistencia a flexión en comparación con el modelo sin el aumento del espesor de la cara de la columna (figura 5). El modelo con aumento en el espesor de la cara de la columna registra una resistencia a la flexión de 744 KN*m, superior al momento plástico de la viga de 718 KN*m, mientras que el modelo sin el aumento en el espesor de la cara de la columna registra 261 KN*m.

Como vemos, el aumento del espesor de la cara de la columna aporta un considerable aumento en la rigidez de la conexión, logrando concentrar los efectos de plastificación

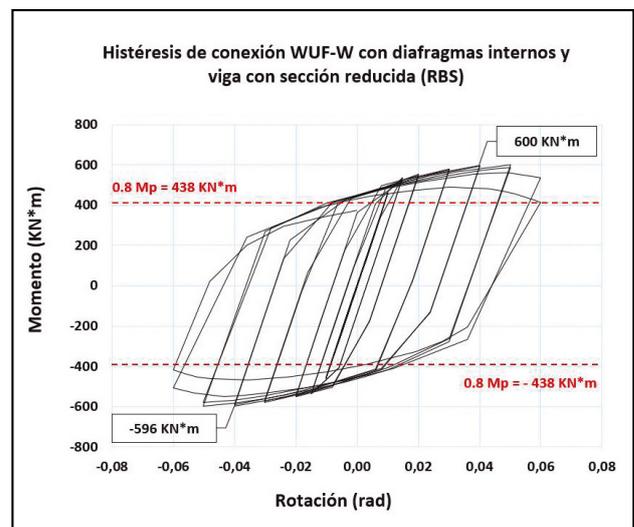


Figura 11. Diagrama de histéresis de conexión WUF-W sin diafragmas internos, pero con un aumento del doble del espesor de la cara conectada de la columna. Resultado del modelo de elementos finitos.

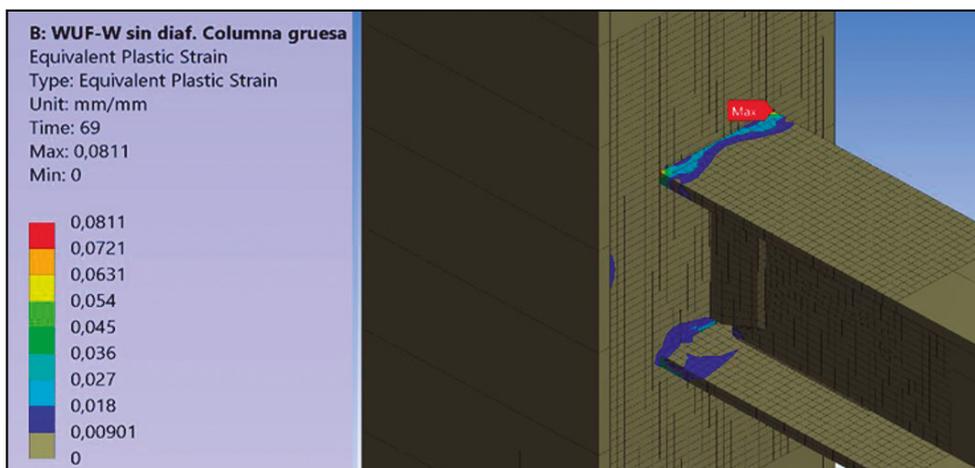


Figura 12. Modelo de conexión WUF-W sin diafragmas internos. Resultado equivalente plástico por elementos finitos. Con una deformación unitaria máxima del 8.0 %.

en sección de la viga y no tanto en la cara de la columna como se observa en la figura 6.

Sin embargo, estas zonas que entraron en rango inelástico se ubican justo en las soldaduras principales y en parte de las alas de la viga, como se observa en la figura 12. Por lo que se estima que, a pesar de haber un desarrollo inelástico en las alas de la viga, el aumento en el espesor de la cara de la columna, de hasta dos pulgadas, no es suficiente para producir las deformaciones plásticas deseadas en las secciones de la viga.

8. CONEXIÓN WUF-W CON DIAFRAGMAS EXTERNOS

Dado que los modelos sin diafragmas internos no cumplen con las especificaciones de la norma para marcos rígidos resistentes a momento y que los modelos con diafragmas internos presentan concentraciones de esfuerzos en las soldaduras principales, se realizó una prueba de la misma conexión WUF-W utilizando diafragmas externos, conexión típica en Japón (Chen, 2015). Se modelaron diafragmas externos según la especificación (Kurobane, 2004) y se sometió el modelo al protocolo de prueba estándar igual que los modelos anteriores.

Los resultados de este análisis muestran un mejor desarrollo de la capacidad de momento que los anteriores modelos. Con respecto al desarrollo dúctil de la sección W de la viga, se presenta una rótula plástica justo después de los diafragmas externos, como se muestra en la figura 14. Se tiene una deformación unitaria máxima de 60% en la unión entre el alma y el ala de la viga. En las alas de la viga se tienen deformaciones unitarias del orden de 1% (franja color azul de la figura 14), lo cual indica un elevado desarrollo dúctil de éstas. Además, el modelo con diafragmas internos presenta pandeo local de las alas de la viga, figura 4, situación particularmente distinta en el modelo con diafragmas externos, figura 14, en donde las deformaciones por pandeo local se presentan mucho más controladas, sin signos de torsión, deformándose de manera muy similar ambas alas de la viga, lo cual denota que la conexión exige un mayor desarrollo de las alas de la viga en comparación con los modelos con diafragmas internos.

En el diagrama de histéresis se superpone con línea de color negro, el resultado histerético del modelo con diafragmas externos, figura 13, contra el resultado del modelo con diafragmas internos, con línea color verde, también presentado en la figura 3.

Como se puede observar, la resistencia de la conexión aumentó considerablemente, lo que evidencia un mayor desarrollo dúctil de la sección. Vemos que en el caso con diafragmas externos la resistencia a la flexión alcanza los 961 KN*m y luego se degrada a partir de los 0.04 rad hasta los 0.05 y 0.06 rad. Mientras la conexión con diafragmas internos presenta una resistencia menor de 866 KN*m a los 0.04 rad y una degradación menor en los dos últimos bucles de histéresis al llegar al ángulo de deriva de 0.05 y 0.06 rad. Lo que evidencia una mayor sollicitación de esfuerzos locales de la viga de la conexión con diafragmas externos y, por lo tanto, un mayor desarrollo de la ductilidad de la sección. Además, de alejar las concentraciones de esfuerzos de la conexión, durante toda la prueba.

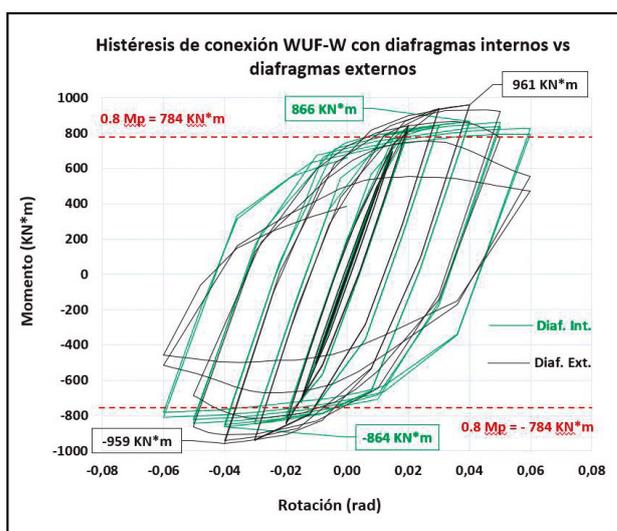


Figura 13. Comparación de diagramas de histéresis de conexión WUF-W con diafragmas internos vs con diafragmas externos. Resultado del modelo de elementos finitos.

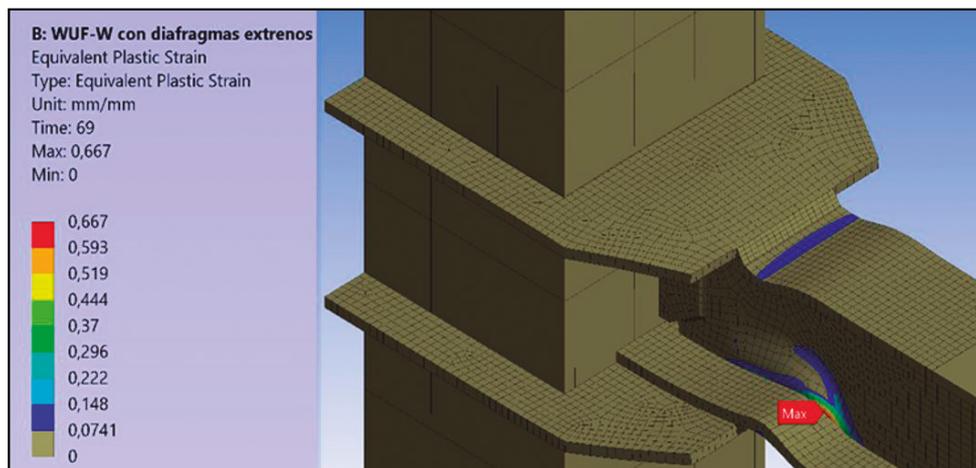


Figura 14. Modelo de conexión WUF-W sin diafragmas internos. Resultado equivalente plástico por elementos finitos. Con una deformación unitaria máxima del 60 %.

9. CONCLUSIONES

1. Las conexiones tipo WUF-W con columnas de sección hueca, rectangular, que utilicen diafragmas internos para rigidizar la conexión, presentan resistencia a la flexión inelástica satisfactoria con respecto al 80% de la capacidad plástica de la sección de viga W. Sin embargo, un análisis detallado del modelo sugiere que esta configuración puede producir concentraciones de esfuerzos y plastificación en las soldaduras principales después de un ángulo de deriva de 0.02 rad, por lo que se recomienda su uso para marcos intermedios a momento (IMF).
2. La aplicación de reducciones de la sección de viga del tipo RBS en combinación con diafragmas internos se comporta adecuadamente. La capacidad de la viga ante la flexión se disminuye debido a la reducción de su sección transversal. Sin embargo, esta configuración cumple con una resistencia ante la flexión superior al 80% del momento plástico de la sección reducida y, además, la plastificación se concentra en la zona reducida de la sección por lo que evita la plastificación prematura de las soldaduras principales. Por lo que puede ser empleada como una conexión especial a momento, de acuerdo a la capacidad de la sección reducida.
3. La conexión sin diafragmas internos se puede considerar como una conexión simple, debido a que la cara de la columna no es capaz de transmitir momentos a la sección W. Por el contrario, la viga se vuelve incisiva en la zona del panel a falta de estos elementos de continuidad que participen en la distribución de los esfuerzos de tensión y compresión generados por las alas de la viga.
4. El uso de reducciones en la sección de la viga del tipo RBS, cuando no se implementan diafragmas internos, parece no influir de manera significativa en cuanto a la respuesta de la conexión.
5. En el caso de la conexión sin diafragmas internos, pero con un aumento en el espesor de la cara conectada de la columna, se nota que aumentó la rigidez de la conexión, pero no se alcanza la plastificación de la viga, lo que sugiere un indispensable uso de rigidizadores para estas conexiones con columna rectangular hueca.
6. El modelo con diafragmas externos presentó los mejores resultados. Se percibe un aumento en la resistencia de la conexión en comparación con el modelo con diafragmas internos, alcanzándose una resistencia a la flexión supe-

rior al 80% del momento plástico de la viga al alcanzar un ángulo de deriva de 0.04 rad. Además de un notable desarrollo de ductilidad en las alas y alma de la viga, generándose un pandeo por flexión localizado precisamente al final de cada diafragma exterior. Este último análisis sugiere que esta configuración de conexión WUF-W es la más adecuada, en la construcción de edificaciones constituidas por marcos especiales o intermedios resistentes a momento con columnas de sección rectangular hueca.

10. RECOMENDACIONES

Se recomienda la realización de pruebas de laboratorio para corroborar los resultados de los análisis aquí descritos, ya que los presentes resultados representan tan solo una aproximación a la conducta que pueden tener las configuraciones de la conexión en estudio.

11. REFERENCIAS

- American Institute of Steel Construction (2016). *341-16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago: AISC.
- American Institute of Steel Construction (2016). *358-16 Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. Chicago: AISC.
- Chen, Z., Qin, Y., y Wang, X. (2015). Development of connections to concrete filled rectangular tubular columns. *Advanced Steel Construction*, 11(4): pp. 408-426.
- FEMA-350 (2000). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*.
- Flores, I.T., y Bernal, A.G. (2010). Estudio experimental de conexiones de acero a momento de vigas I con columna rectangular HSS. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato, México, 2010.
- Kurobane, Y. (2004). *Design Guide for Structural Hollow Section Column Connections*, Vol. 9. Chicago: AISC.
- Martín del Campo, I.T., y Gómez-Bernal, A. (2010). Estudio experimental de conexiones de acero a momento de vigas I con columna rectangular HSS. México, DF: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- Saneei Nia, Z., Ghassemieh, M., y Mazroi, A. (2013). WUF-W connection performance to box column subjected to uniaxial and biaxial loading. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 88, pp. 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.04.008>.