

DESEMPEÑO SÍSMICO DE CONEXIONES A MOMENTO TIPO END-PLATE EN SISTEMAS ESTRUCTURALES A MOMENTO CON COLUMNAS Y VIGAS TUBULARES HSS

González, Freddy¹; Torres, Ronald²; Nuñez, Eduardo³; Picón, Ricardo⁴; Guerrero, Néstor⁴

¹ *Industrias Unicon, C.A. freddy.gonzalez@unicon.com.ve*

² *Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME). ronald.imme@gmail.com*

³ *University Austral of Chile*

⁴ *Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA).*

RESUMEN

Las construcciones realizadas con perfiles tubulares se están desarrollando y mejorando a nivel internacional, aprovechando este empuje se realiza este estudio que pretende dar soluciones a una práctica común en el país. Este trabajo describe la metodología y los resultados obtenidos en el estudio analítico y experimental de una propuesta de conexión a momento entre una viga y columna de perfil tubular ante cargas sísmicas. Las conexiones soldadas entre este tipo de vigas y columnas son frecuentemente empleadas en edificaciones de interés social y privado en Venezuela. Los sismos de Northridge 1994 y Kobe 1995 permitieron estudiar las deficiencias en el diseño sísmico de estructuras en acero, específicamente de sus conexiones. Numerosas conexiones han sido estudiadas hasta la actualidad, es por ello, que el objetivo de ésta investigación es estudiar conexiones a momento empleando vigas y columnas tubulares en sistemas de pórticos a momento en zonas sísmicas, aplicando y evaluando las metodologías de diseño establecidas en Norma AISC vigente. Los resultados obtenidos muestran que las conexiones soldadas a cara de columna presentan mecanismos de falla frágiles, concentración de tensiones y trasladan la acción inelástica a la columna, mientras que las conexiones ensayadas permiten una distribución de tensiones que evita la falla del material en zona de columna, que sean las vigas las que disipen energía y eviten la manifestación de mecanismos de falla frágiles en toda la conexión.

Palabras Clave: Ductilidad, Pórticos de acero, Conexiones a momento, Pórticos resistentes a momento, Conexiones de plancha extrema.

ABSTRACT

Constructions made with tubular profiles are being developed and improved internationally, taking advantage of this push this study is made to provide solutions to a common practice in the country. This work describes the methodology and the results obtained in the analytical and experimental study of a connection proposal at moment between a beam and a column of tubular profile before seismic loads. The welded connections between this type of beams and columns are frequently used in buildings of social and private interest in Venezuela. The earthquakes of

Northridge 1994 and Kobe 1995 made it possible to study the deficiencies in the seismic design of steel structures, specifically their connections. Numerous connections have been studied up to the present time, that is why the objective of this research is to study connections at moment using beams and tubular columns in gantry systems at moment in seismic zones, applying and evaluating the design methodologies established in the current AISC Standard. The obtained results show that the connections welded to column face present fragile failure mechanisms, concentration of tensions and transfer the inelastic action to the column, while the tested connections allow a distribution of tensions that avoids the failure of the material in column area, may the beams dissipate energy and avoid the manifestation of fragile failure mechanisms in the whole connection.

Keywords: Ductility, Steel frames, Connections at moment, Resistant frames at moment, Extreme iron connections.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo estudia el comportamiento de una conexión a momento empernada con diafragma externo entre perfiles tubulares de acero, columna de sección cuadrada y viga de sección rectangular. Los perfiles tubulares empleados son los conformados en frío HSS (Hollow Structural Sections) fabricados bajo la norma ASTM A500 en grado C de producción y comercialización regular en Venezuela, los cuales son utilizados usualmente en la construcción de estructuras con pórticos a momento para edificaciones. Para asegurar el buen comportamiento de la conexión ante cargas cíclicas, se estableció un robusto detallado que garantiza la generación del mecanismo dúctil, el cual es necesario para permitir la disipación de energía por deformación del material (acero) en rango inelástico (plastificación), sin pérdida considerable de su resistencia, en una zona alejada de la cara de la columna, es decir la conexión, esencialmente permanece en el rango elástico de deformación luego de la formación de la rótula plástica. El detallado consta de diafragmas externos en la columna tubular, placas o planchas extremas para la unión de la viga tubular y la columna y otros elementos de refuerzo para zonas específicas. Este trabajo se realiza con el fin de calificar la conexión señalada, de acuerdo a la normativa vigente, y de ofrecer un procedimiento práctico, simplificado y seguro para su diseño, con aplicación en pórticos a momentos que formen parte del sistema resistente a sismos.

La investigación mencionada contempla una amplia recopilación bibliográfica sobre estudios previos, tales como los de: Wheeler, Clarke, Hancock y Murray (1997), Wilkinson y Hancock (1998), Wilkinson (1999), Wheeler, Clarke, Hancock (2003), McCormick y Fadden (2010), Fadden (2013), entre otras relacionadas como lo realizado en Venezuela y en Colombia, sobre la creación de modelos para la generación de simulaciones a través del método de elementos finitos y validación experimental a escala real del prototipo definitivo, según el protocolo establecido en las Previsiones Sísmicas del Instituto Americano de la Construcción en Acero, ANSI/AISC341:10 (American Institute of Steel Construction). De lo antes expuesto se deriva la necesidad de realizar el estudio de conexiones a momento empleando vigas y columnas tubulares en sistemas estructurales de pórticos a momento en estructuras de acero ante cargas sísmicas, mediante la calificación de una conexión viga-columna con perfiles tubulares comúnmente

empleados en las edificaciones residenciales de interés social que satisfagan los requisitos sismo resistentes y que se presente como solución estructural estadísticamente confiable, empleando un procedimiento de diseño mediante una metodología experimental basada en los protocolos de ensayos del Proyecto SAC.

METODOLOGÍA

Numerosos estudios han sido desarrollados para estudiar el comportamiento de conexiones a momento en pórticos de acero resistentes a momento y sirven como antecedentes para este trabajo. Como referencia tenemos Swanson J. y León R. (2002), realizan estudio detallado del comportamiento de conexiones tipo T, así como Kulak et. Al (1998) donde indican la sobrerresistencia que pueden llegar a alcanzar los pernos de alta resistencia, Summer, E. A. y T. M. Murray (2004), elaboran una guía de diseño de conexiones a momento con planchas extremas bajo cargas de viento y sismo, donde se exponen los criterios obtenidos a partir de las numerosas investigaciones del Proyecto SAC, Seek, M. W. y T. M. Murray (2005), realizan estudio experimental de conexiones a momento con planchas extremas, Fadden M. y McCormick J. (2013), estudian el comportamiento cíclico de perfiles tubulares de acero bajo cargas sísmicas y proponen unas conexiones soldadas que permiten mejorar el comportamiento de las conexiones soldadas y Gholami M., Deylami A., Tehranizadeh M. (2013), realizan estudio de conexiones soldadas entre perfiles de alma abierta y secciones cajón, encontrando un desempeño adecuado gracias a la incorporación de planchas en alas y alma de viga. Se realizó el estudio de la conexión empleando líneas de cedencia con el fin de evidenciar los mecanismos de falla en las conexiones estudiadas.

Posteriormente se realizó el estudio empleando métodos numéricos (ANSYS 2014), logrando obtener por dos vías distintas los patrones de falla asociados a la conexión en estudio. Todos los especímenes están conformados por columnas articuladas en sus extremos, las columnas son perfiles tubulares de sección cuadrada de 220x220x9 (mm), fabricados bajo la norma ASTM A500 en Grado C. La sección transversal de la viga es un perfil tubular de sección rectangular de 200x70x4,3(mm), fabricados bajo la norma ASTM A500 en Grado C. Las planchas utilizadas son del tipo ASTM A36 y todos los pernos poseen diámetros 5/8pulg., los cuales son de alta resistencia mecánica fabricados bajo la norma ASTM A325. Las soldaduras varían en cuanto a tipo, sin embargo el material de aporte es del tipo E70XX, tal como se indica en Figura 1. Los pernos se asumirán con una pretensión mínima establecida en código ANSI/AISC 360-10, del 70% de su capacidad a tracción.

La conexión presentada en esta investigación está influenciada por las recomendaciones dadas por la CIDECT Guía N°9 (2005), de los actuales requerimientos para el diseño de las conexiones a momento entre perfiles abiertos, de las investigaciones para determinar el comportamiento de miembros rectangulares bajo carga cíclica y las conexiones a momento directas y con diafragmas, así como de las investigaciones para el diseño de las planchas extremas empernadas. Estas investigaciones fueron realizadas por los siguientes; Wheeler, Clarke, Hancock y Murray (1997), Wilkinson y Hancock (1998), Wilkinson (1999), Wheeler, Clarke, Hancock (2003), McCormick y Fadden (2010), Fadden (2013), entre otros relacionadas como lo realizado en Venezuela y en

Colombia

El dimensionamiento y diseño del diafragma se ha realizado tomando como referencia el campo de validez de las ecuaciones emanadas de resultados experimentales de Kamba (2001) y Tabuchi et al (1985) presentadas en la Guía N°9 del CIDECT, para el diseño de las conexiones entre perfiles tubulares como columnas y perfiles abiertos como vigas y complementadas por las simulaciones realizadas a través del método de los elementos finitos de la conexión estudiada.

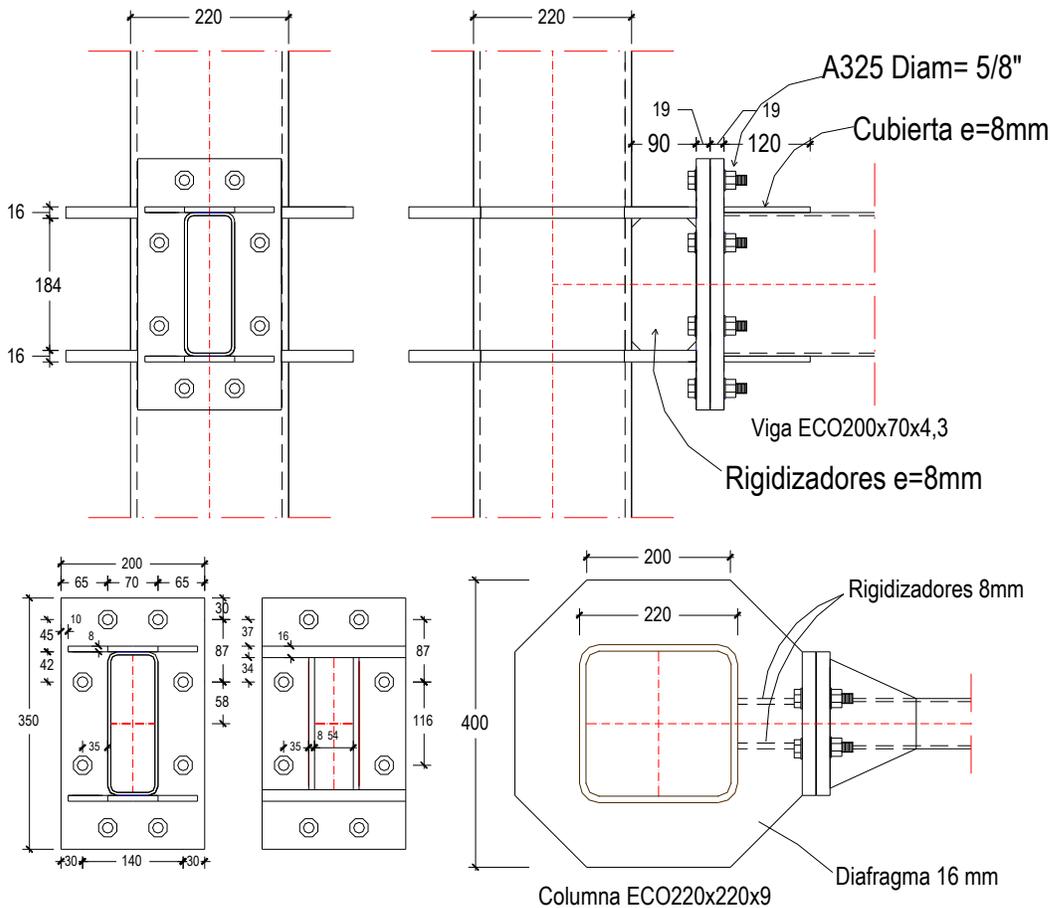


Figura 1. Detalles de la conexión a momento viga-columna entre perfiles tubulares investigada.

Por otra parte, se muestra los detalles de las soldaduras que se emplearon en la confección de la conexión a momento, Figura 2. Se destacan las soldaduras de penetración total y las abocinadas en bisel o de contorno convexo.

Con base en los mecanismos de falla se ensamblaron los modelos realizados en 3 dimensiones, empleando elementos finitos, poseen la configuración y dimensiones antes indicadas. La forma computacional adoptada para modelar las conexiones fue utilizando elementos tipo SOLID rigidizadores, planchas, pernos, vigas, columna y tuercas, evitando los conflictos que ocasionalmente se puedan generar en la interacción entre elementos de distinto tipo. Para el

mallado de los modelos se usó elementos tipo SOLID186, los cuales, permiten la formulación de materiales con plasticidad, endurecimiento, cedencia, grandes deflexiones y grandes deformaciones, Figura 3.

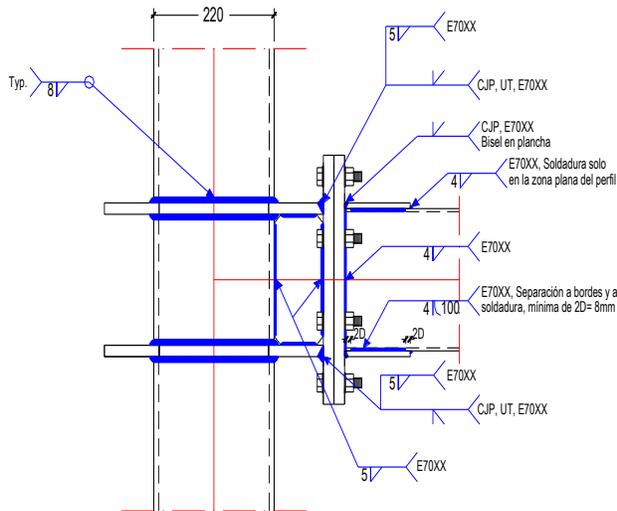


Figura 2. Detalles de las soldaduras.

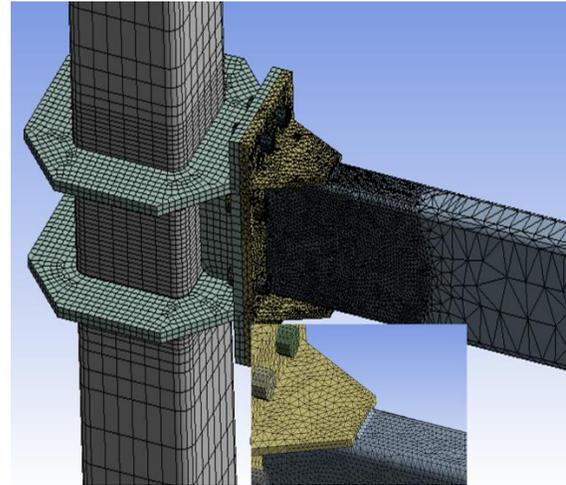


Figura 3. Modelo de Elemento Finito.

Se emplearon modelos bilineales y trilineales, según cada material. Para el ASTM-A36, se empleó el modelo Ghassemieh et al (2012). Para el ASTM-A500B, se empleó un modelo bilineal resultados de los ensayos efectuados al perfil tubular empleado. El material de los pernos ASTM-A325, se modeló como un material elasto-plástico con endurecimiento por deformación, según James A. Swanson and Roberto T. León, (2001) y las consideraciones tomadas según Patrick M. Wade (2006).

Para el estudio experimental, se fabricaron 3 probetas a ensayar con las mismas características descritas para la conexión especificada. La instrumentación consta de 3 LVDT (transformadores lineales de variación de velocidad) que capturan el desplazamiento deseado. Se ubicó el LVDT-1 en el actuador ubicado en extremo de viga para capturar el desplazamiento en extremo donde se aplicaba dicho desplazamiento y los LVDT-2 y LVDT-3 en los extremos de columna para verificar si había algún desplazamiento. La capacidad de carga es de 50 Toneladas y tiene un recorrido máximo de ± 12.50 cm. Las especificaciones del actuador son Force Transducer, model 661.23F-01 SN:0375349 fabricado por MTS Systems Corporation USA. El desplazamiento aplicado por el actuador se realizó según esquema indicado en figura 4, el cual describe el protocolo de carga descrito según AISC-341-2010, capítulo K.

Se simuló el comportamiento de una conexión soldada considerando para el análisis que posee en general las mismas dimensiones que el prototipo empernado, es decir, la columna tiene de 2,70 metros y la viga de 1,50 metros desde el eje de la columna al extremo de la viga, en éste se aplican los desplazamientos discretos obtenidos a partir de las rotaciones establecidas en el protocolo de ensayo.

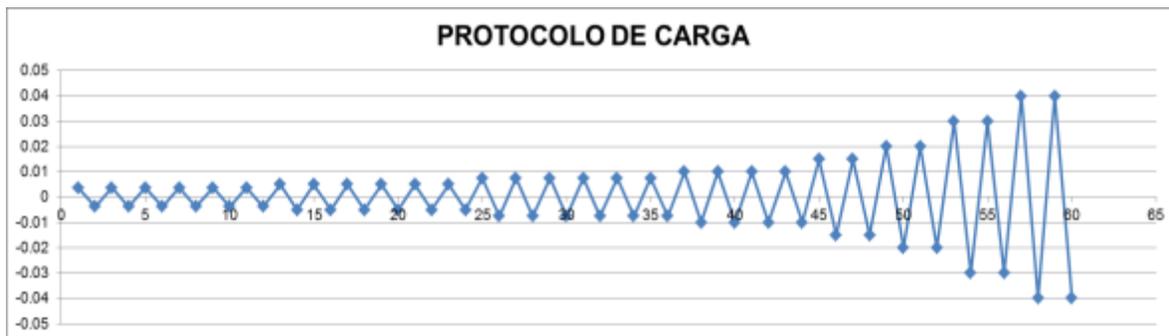


Figura 4. Protocolo de carga

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron 3 ensayos experimentales de probetas para cumplir con los principios de reproducibilidad y repetitividad, las cuales, fueron diseñadas según lo establecido en AISC (2010-c), una vez obtenidas las dimensiones que cumplían con requisitos de diseño, se realizó el ensayo según protocolo establecido en capítulo K del AISC (2010-b). En la Figura 5 se presentan los resultados de Diagrama Momento vs. Rotación plástica de cada probeta.

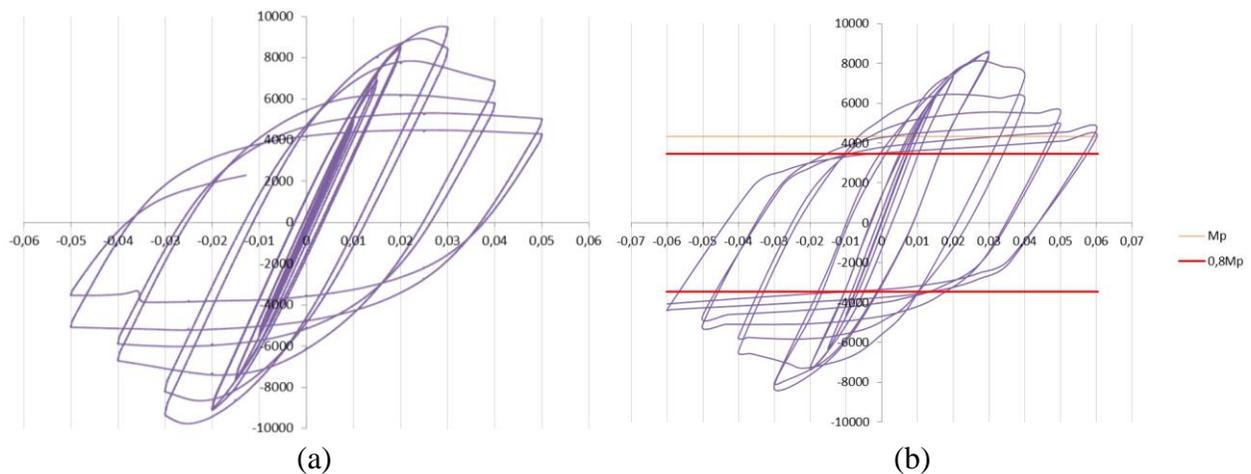


Figura 5. Diagrama Momento vs. Rotación Plástica de probeta
 a) Ensayada según protocolo del AISC, b) Simulación numérica

Las probetas diseñadas y ensayadas según lo establecido en AISC, alcanzaron un momento máximo por encima de la carga objetiva esperada, una deriva máxima alcanzada sobre 0.05 radianes, lo cual, muestra un buen desempeño según lo establecido en normativa vigente. Con respecto a la disipación de energía; la cual está definida por el área encerrada dentro de la curva o los ciclos de histéresis, carga versus desplazamiento, se menciona, que la mayor parte ocurre luego de alcanzar el ángulo deriva de 0,02 radianes, principalmente en la viga, ya que no se pudo determinar la contribución de la zona del panel de otros elementos de la conexión. De forma

específica se identificó que el comportamiento es mayoritariamente elástico hasta la rotación de 0,015 radianes, de allí en adelante se empieza a contabilizar leve disipación de energía hasta 0,02 radianes, a partir de este punto inicia la etapa importante de disipación energía hasta 0,04 radianes, en la etapa de 0,05 radianes la contribución es menor hasta la falla del miembro. En términos de comportamiento, la columna y partes conectadas no experimentan incursión inelástica, siendo exclusivamente la viga donde se concentra toda acción inelástica, tal como se puede apreciar en figura 5. Este comportamiento está asociado a un mecanismo de falla dúctil y por tanto es deseado según filosofía sismorresistente.

La simulación de conexión calibrada diseñada según lo establecido en AISC, se observa que el pandeo local inicia luego de superar la rotación de 0,03 radianes y alcanzar un momento máximo de 8.469Kgf-m, esto coincide con la pérdida de resistencia de la conexión. Sin embargo la conexión mantiene una resistencia por encima del 80% del M_p cuando supera la rotación de 0,04 radianes, esto indica que la conexión, en principio cumple para sistemas especiales e intermedios de momento equivalentes a ND3 y ND2, lo cual, muestra un buen desempeño según lo establecido en normativa vigente. Los ciclos histeréticos muestran una degradación de rigidez estable hasta los 0.01 radianes. A nivel tensional se alcanzó una concentración de tensiones en la viga, con valores superiores a la tensión cedente esperada, así como las deformaciones superan los límites elásticos calibrados del material en la viga. En términos de comportamiento, la columna y partes conectadas no experimentan incursión inelástica, siendo exclusivamente la viga donde se concentra toda acción inelástica.

La simulación del comportamiento de la conexión soldada demuestra diferencias fundamentales en cuanto a la función que se requiere para los pórticos a momento, se puede ver que las tensiones más altas ocurren en la cara de la columna alrededor de la viga, por su parte la viga concentra menos tensiones que la columna, incluso menor que la tensión cedente.

CONCLUSIONES

La conexión soldada, mostró en términos de resistencia y rigidez un pobre desempeño, los ciclos histeréticos reflejaron una pobre capacidad de disipación y gran degradación de rigidez flexional. Adicionalmente, todas las tensiones fueron localizadas en la columna sin que la viga fuese capaz de desempeñar sus funciones de fusible.

Se ensayaron 3 probetas a escala real y fueron sometidas a la acción de un actuador pseudo estático según protocolo indicado en AISC341:10, sección K. Se obtuvo un comportamiento histerético favorable en líneas generales, en términos de resistencia y rigidez, donde la resistencia superó la capacidad nominal a flexión de la viga y superó de forma estable los 0,04 radianes exigidos en la norma citada. No se evidenció ningún mecanismo de falla frágil asociado al pandeo local en la columna, planchas ni rigidizadores, así como la integridad de los pernos hasta el último ciclo del ensayo en las 3 probetas. Toda la acción inelástica estuvo presente en la viga.

De los tres ensayos se rescata que la conexión permite el total desarrollo de la capacidad resistente a flexión de la viga tubular más allá del límite elástico. En este sentido se destaca que

los especímenes desarrollaron momentos máximos que duplicaron el momento plástico, esto indica que existen factores que aumentan de forma significativa la resistencia a flexión de la conexión y de la viga.

El mecanismo de falla de los especímenes para todos los ensayos fue el agrietamiento en las alas del perfil tubular luego de la ocurrencia del pandeo local, después de superar ampliamente el rango elástico de deformaciones y estar en la etapa de plastificación moderada de la sección.

REFERENCIAS

- [1] AISC. (2010a). Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction.
- [2] AISC. (2010b). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction.
- [3] AISC. (2010c). Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications. American Institute of Steel Construction.
- [4] FEMA. (2000). Recommended seismic design criteria for new Steel Moment-frame buildings (FEMA 350). Washington, DC.: Federal Emergency Management Agency.
- [5] MURRAY, T. M. AND SUMNER, E. A., (2004) End-Plate Moment Connections – Wind and Seismic Applications, Design Guide Series 4 – 2nd Edition, American Institute of Steel.
- [6] MURRAY, T., Seismic strength of moment end-plate connections with attached concrete slab. Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061, USA. Construction, Chicago, Illinois, 2004.
- [7] KULAK, G.L. FISHER, J. W. STRUIK, J. H. A. Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, 2nd ed., Chicago, Illinois, USA, Research Council On Structural Connections c/o American Institute Of Steel Construction, 2005.
- [8] SWANSON, J.A., LEON, R.T. “Bolted Steel Connections: Tests On T-Stub Components”. Journal of Structural Engineering, 2000.
- [9] Wheeler A. y otros. (1997). Design Model for Bolted Moment End Plate Connections using Rectangular Hollow Sections. Centre for Advanced Structural Engineering Department of Civil Engineering University of Sidney, Australia.
- [10] Wilkinson T. (1999). The Plastic Behaviour of Cold-Formed Rectangular Hollow Sections. Thesis. The University of Sydney. Australia.