

USO DE CONEXIONES TIPO PLACA DE EXTREMO EN COLUMNAS CON PERFILES TIPO H

David Alejandro Ramírez Espitia¹, Maritzabel Molina Herera²

¹Ing. Civil. MsC. en Estructuras. Universidad Nacional de Colombia (U.N.C.),
daramireze@unal.edu.co

²Profesora Asociada Universidad Nacional de Colombia (U.N.C.),
mmolinah@unal.edu.co

RESUMEN

A partir de la necesidad de empalmar perfiles de secciones tipo H utilizados como columnas, en esta investigación se ha planteado el uso de la metodología de conexiones tipo placa de extremo, para empalmar elementos sometidos a flexo compresión, con el fin de ofrecer un tipo de conexión versátil que cumpla con las solicitaciones establecidas por los códigos estructurales (NSR-10, AISC-360) y tenga un buen desempeño ante cargas sísmicas. Para desarrollar el planteamiento teórico que describe los estados límite del diseño de la conexión, se partió de una adaptación de las formulaciones establecidas para conexiones placa de extremo, en uniones viga-columna, considerando dos condiciones de empalme entre perfiles, un empalme con la misma sección, y otro, con reducción de sección. Para ello se modelaron numéricamente por el método de elementos finitos (MEF) los dos tipos de conexión, simulando las solicitaciones experimentales que tiene el elemento para identificar los posibles modos de falla y hallar una aproximación del comportamiento de la conexión ante cargas cíclicas en el rango inelástico de los materiales. Posteriormente, se desarrolló un programa experimental para la validación de la metodología de análisis y diseño planteada para conexiones tipo placa de extremo en columnas.

Palabras claves: conexión metálica, empalme de columna, placa de extremo.

USE OF END PLATE CONNECTION, FOR COLUMN SPLICE WITH H PROFILES

ABSTRACT

From the requirement to join profiles of steel H used as columns, in this research has been developed the use of the design methodology of end plate connections, to join elements subjected to bending and compression, in order to offer a new type of versatile connection, that accomplishes the requirements established by the structural codes (NSR-10, AISC-360) and developed a good seismic performance. First, the theoretical approach that describes the limit states in the design connection has been developed, based on the formulations established for beam-column end plate connections, considering two conditions of splices between profiles, a connection with the same section and another with section reduction. To do this, two types of connection were modeled with finite elements method applying the experimental demands, with the proposal to identify the possible failure modes, and find an approximation to the inelastic behavior of the connection under cyclic loads. Moreover, an experimental program was developed for the validation of the analysis and design methodology of end plate connections proposed.

Keywords: column splice, end plate, steel connection.

Nota Editorial: Recibido: septiembre 2019; Aceptado: abril 2020

1. INTRODUCCIÓN

En el diseño y construcción de estructuras de acero, las dimensiones limitadas de los perfiles que ofrece la industria para columnas y vigas de las edificaciones conllevan a que se requieran hacer empalmes entre elementos. Considerando que estas conexiones le dan la flexibilidad o rigidez al sistema estructural incidiendo en su desempeño ante cargas sísmicas, conlleva a que sea relevante el diseño de las conexiones de los elementos, bien sea entre columnas, entre vigas o viga-columna. De acuerdo con las recomendaciones del proyecto SAC [1] después de los terremotos de Kobe y Northridge, las conexiones metálicas no solo deben tener fiabilidad en el rango elástico, también deben poseer capacidad de disipación de energía en el rango

inelástico, para garantizar estructuras seguras que después de un evento sísmico permitan la evacuación de las personas antes del colapso, o en el mejor de los casos, sufrir un nivel de daño tal que no se afecte su funcionamiento después del desastre.

Basándose en la importancia de las conexiones metálicas y en la necesidad de tener mayor versatilidad en el diseño y fabricación de las mismas, se requiere plantear otras alternativas que tengan un comportamiento inelástico fiable. En esta investigación se propone el uso de conexión tipo placa de extremo para empalmar columnas, como una opción a la conexión con soldadura de completa penetración en obra y a la conexión pernada con platinas en patines y alma.

El desarrollo de este trabajo se basó en investigaciones en las que se evaluó la resistencia ante cargas estáticas de los empalmes de columnas, tanto por el eje fuerte como por el eje débil [2], e investigaciones más recientes que evalúan la resistencia de empalmes en columnas con reducción de sección sometidas ante cargas cíclicas [3-4].

2. ENSAYOS DE LABORATORIO

2.1 Descripción de los ensayos

Para representar adecuadamente las condiciones de servicio de las columnas, se diseñaron 3 montajes diferentes, con el fin de evitar la combinación de efectos, se aislaron las principales solicitaciones de la columna como lo son: 1- Carga axial, 2- Flexión en el eje fuerte, y 3- Flexión en el eje débil.

Para definir el protocolo de los ciclos de carga adecuados que se utilizaron en los ensayos se tomaron como referencia trabajos de análisis estructural en los cuales se demostraba que solo en los primeros pisos de las edificaciones se podía llegar a superar el M_n (Momento nominal) de la sección [5-6], por lo tanto, el desplazamiento relativo máximo en la columna corresponde al momento máximo, el cual se puede hallar en el laboratorio y en los modelos de elementos finitos (MEF).

Para el caso 1 se tomó como referencia el trabajo de empalmes solicitados axialmente realizado en Holanda [7]. Con el propósito de medir y analizar únicamente el efecto de la carga axial sobre las columnas, teniendo como variable principal la carga crítica de falla. Para este caso el montaje tuvo apoyos simples sin restricción a momento en el sentido del eje débil de la sección (Figura 1).

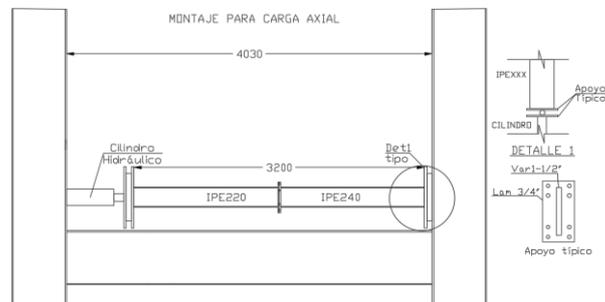


Figura 1: Montaje de carga axial

Para el caso 2 se tomó como referencia el estudio realizado en la Universidad de Berkeley [8], en el cual se solicitaron las probetas a flexión por medio de cargas aplicadas cerca a los tercios de la conexión, los ensayos realizados en la Universidad Nacional de Colombia fueron realizados sobre el marco de carga del laboratorio, al cual se le adaptaron dos riostras en W6X20, para restringir el pandeo flexo torsional como se muestra en la Figura 2 y se aplicaron cargas históricas pseudo estáticas.

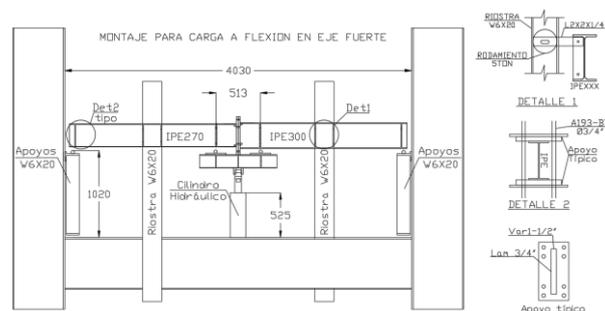


Figura 2: Montaje a flexión del eje fuerte

Para el caso 3 se tomó como referencia el trabajo realizado para ensayo de resistencia de empalmes para el montaje de las pruebas de carga a flexión de las conexiones por el eje débil de la sección [2], la diferencia respecto al montaje de flexión del eje fuerte, es la implementación de atezadores en los puntos de apoyo de la probeta y láminas que se soporten sobre los apoyos simples del montaje como se muestra en la Figura 3.

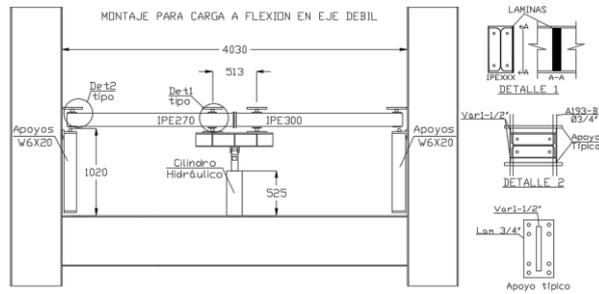


Figura 3: Montaje a flexión del eje débil

2.2 Materiales

Se seleccionaron los materiales más comerciales del mercado, siendo las láminas, pernos y soldaduras de estándar estadounidense y los perfiles europeos, en la Tabla 1 se muestran sus características mecánicas principales.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales usados.

ELEMENTO	MATERIAL	Fy (MPa)	Fu (MPa)	Frágil	Ry	Rt
Láminas	ASTM A572G50	345	450	no	1.1	1.1
Perfiles	S235	345	450	no	1.1	1.1
Soldadura	E70xx	400	480	si	n/a	n/a
Pernos	A490	845	1150	si	n/a	n/a

2.3 Descripción de las probetas

Las probetas tienen características diferentes, las cuales se señalan a continuación:

Tipo de carga: Las cargas como se mostraron en los montajes, pueden ser a flexión por el eje Fuerte (F-EF), a flexión por el eje débil (F-ED) o a compresión axial (C).

Tipo de conexión: El empalme de columna puede ser para dar continuidad a la misma sección de columna (E), o para empalmar la columna con una sección más pequeña reduciendo la sección de la columna (R).

Tipo de soldadura: Hasta la fecha no hay documentación de conexiones de tipo placa de extremo con soldaduras que no sean de completa penetración. Para este estudio se tuvo en cuenta que la soldadura de tipo filete es más económica desde el punto de vista de fabricación, respecto a la soldadura de completa penetración, por lo cual se hicieron la mitad de las probetas con soldadura de filete (SF) y la otra mitad con soldadura de completa penetración (SC), en la Figura 4. Se muestra la nomenclatura usada para referirse a los ensayos.

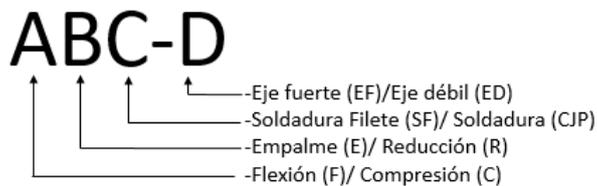


Figura 4: Nomenclatura de las probetas.

En la tabla 2 se muestran las probetas ensayadas, su nomenclatura, las características que tiene cada una y el tipo de secciones que la conforman, esto con el fin de referenciar de manera simplificada las probetas.

En la figura 5 se presenta el protocolo de carga usado en los ensayos, el cual se basó en protocolos aplicados en investigaciones anteriores [9].

Tabla 2: Caracterización de las conexiones ensayadas

Nombre	Solicitación	Sección 1	Sección 2
FESF-EF	Eje fuerte	IPE300	IPE300
FESF-ED	Eje débil	IPE300	IPE300
FESC-EF	Eje fuerte	IPE300	IPE300
FESC-ED	Eje débil	IPE300	IPE300
FRSF-EF	Eje fuerte	IPE270	IPE300
FRSF-ED	Eje débil	IPE270	IPE300
FRSC-EF	Eje fuerte	IPE270	IPE300
FRSC-ED	Eje débil	IPE270	IPE300
CRSF	Compresión	IPE240	IPE220
CESC	Compresión	IPE220	IPE220
CRSC	Compresión	IPE240	IPE220
CESF	Compresión	IPE220	IPE220

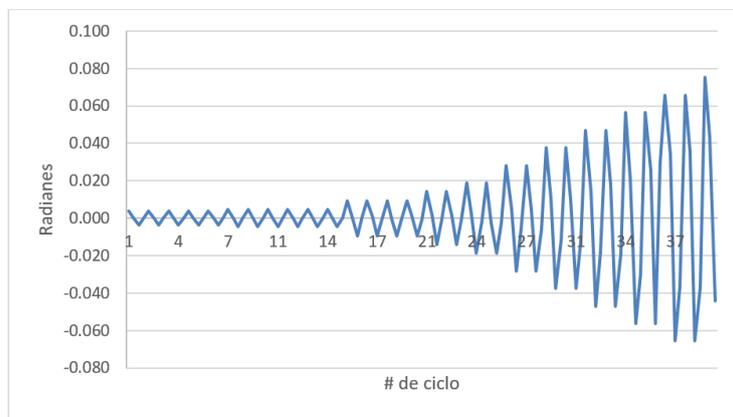


Figura 5: Protocolo de carga

2.4 Ensayos a flexión

Las siguientes gráficas corresponden a los datos de laboratorio de las envolventes de las curvas de histéresis. De estas gráficas se concluye que el uso de soldadura de completa penetración o de filete no influye en el comportamiento de la conexión. En todos los casos se superaron los límites de resistencia requerida según la norma AISC-360.

En las figuras 6 y 7 que corresponden a flexión de la probeta por el eje fuerte, se observó una plastificación de la conexión cercana al máximo momento probable de la sección más pequeña en las conexiones con reducción.

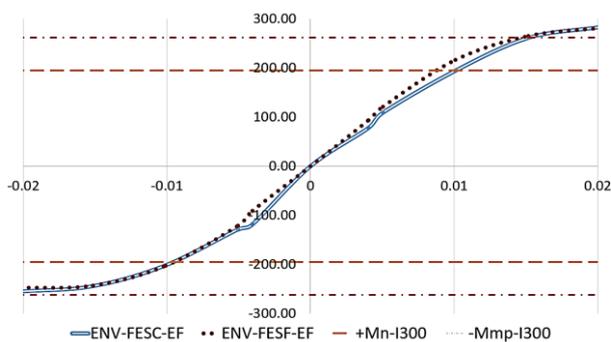


Figura 6: FESF-EF vs FESC-EF

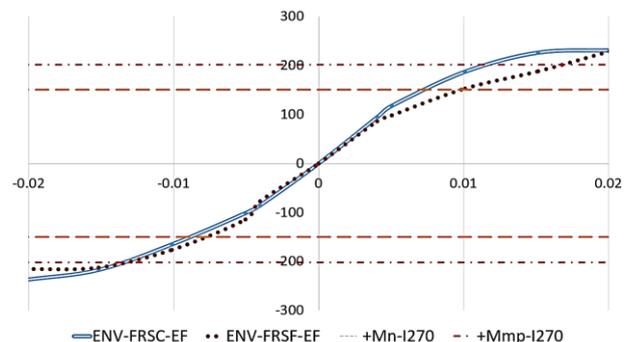


Figura 7: FRSF-EF vs FRSC-EF

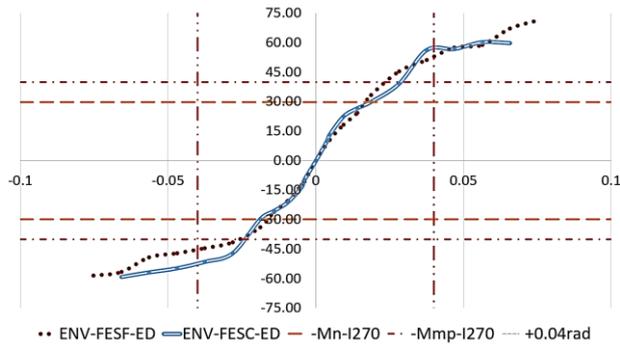


Figura 8: FESF-ED vs FESC-ED

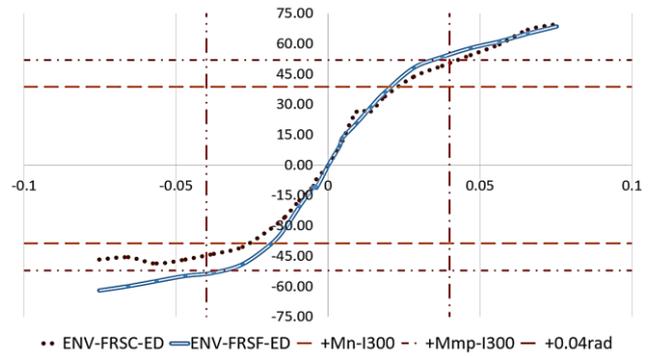


Figura 9: FRSF-ED vs FRSC-ED

En las gráficas 8 y 9 que corresponden a los ensayos del eje débil la plastificación con una rigidez baja, no hay pérdida de resistencia y se evidencia el endurecimiento de las probetas después de superar el máximo momento probable.

2.5 Ensayos a compresión

Para los ensayos se compararon las cargas límite alcanzadas en laboratorio, con los valores máximos teóricos hallados por la teoría clásica, en el caso de IPE220 $P(220)=347,5$ kN y para IPE240 $P(240)=482$ kN. De la tabla 3 se observa que todas las probetas alcanzan la carga axial máxima teórica de la sección más pequeña como indica la norma, y que los valores superaron ligeramente la carga teórica máxima antes de pandearse lateralmente.

Tabla 3: Resultados de los ensayos axiales

PROBETA	SECCIONES	EXPERIMENTAL KN	IPE220%*	IPE240%**
CRSF	IPE240-IPE220	361.75	104%	75%
CRSC	IPE240-IPE220	374.88	108%	78%
CESC	IPE220-IPE220	367.01	106%	
CESF	IPE220-IPE220	350.04	101%	

*Relación de carga axial de la IPE220 y el valor experimental, ** Relación de carga axial de la IPE220 y el valor experimental

La falla de este tipo de probetas con reducción de sección se presentó por pandeo lateral por el eje débil en la sección de menor dimensión, como se muestra en las figuras 10 y 11, la cual queda pandeada permanentemente por el eje débil, mientras que la mayor sección no presenta deformaciones permanentes.



Figura 10: Comparación probetas CRSF y CRSC



Figura 11: Pandeo probeta CRSC

Como se ve en las figuras 12 y 13, en las conexiones con la misma sección se observó que no se presentó fractura en la soldadura o acomodación de los pernos, sólo hubo pandeo lateral. De igual forma, aunque las probetas con empalme para perfiles con la misma sección soportaron una carga mayor a la esperada en el diseño, los elementos de las conexiones no presentaron fallas por ninguno de sus estados límites, sólo fallaron los perfiles, tanto en las probetas con soldaduras a filete como las probetas con soldaduras de completa penetración.

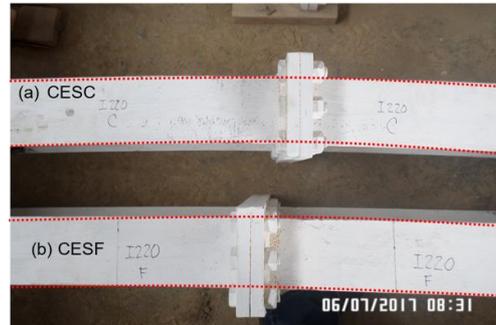


Figura 12: Comparación CESF y CESC

Al comparar la probeta inferior y superior de la figura 12, se evidencia que la falla (deformación inelástica), fue el pandeo por el eje débil del perfil, quedando ambas probetas curvadas en el sentido del eje débil después de retirar la carga.



Figura 13: CESC después de ser ensayada

A diferencia de las probetas con reducción de sección, las probetas de igual peralte presentaron deformaciones permanentes simétricamente al centro de la luz, como se ve en la figura 14.



Figura 14: CESC después del ensayo

2.6 Comparación de datos experimentales y datos MEF

A continuación, se muestra comparativamente las curvas momento rotación halladas por los modelos de elementos finitos MEF y las curvas experimentales.

Para la simulación por elementos finitos (MEF) se usó el programa ANSYS V16 y basándose investigaciones anteriores de precalificación de conexiones metálicas con modelación numérica [9], se consideró el

comportamiento no lineal de los materiales de las platinas, tornillos, soldaduras y perfiles, aplicando el modelo de plasticidad bilineal e isotrópico, con los parámetros indicados en la Tabla 1.

En las simulaciones se utilizaron elementos finitos tetraédricos, con una densidad de malla media. Asimismo, se emplearon superficies de contacto tipo “bonded” en los elementos soldados y sin fricción entre las placas de extremo, y también entre la rosca de los pernos y los orificios, además en los apoyos se restringió el desplazamiento en sentido vertical, simulando las condiciones de laboratorio.

Se aplicó desplazamiento en el centro de la conexión según el montaje de los ensayos a flexión (ver figura 15) y con protocolo de carga definido para la experimentación de la figura 5.

La modelación se hizo considerando dos condiciones para los pernos, uno con pretensión como lo indica la norma, con la herramienta de pretensión que está implementada en ANSYS, y otro modelo sin pretensión en los pernos. De los modelos numéricos analizados se hallaron las curvas de histéresis, y para facilitar su interpretación y calibración, se usaron las envolventes. Partiendo de investigaciones de la modelación con el método de elementos finitos para analizar el comportamiento de elementos estructurales bajo cargas cíclicas, se determinó la metodología de calibración y se lograron las aproximaciones, con un margen de error aceptable, como se muestra en las figuras de la 17 a la 20 y un resultado gráfico del modelo como se ve en la figura 16.

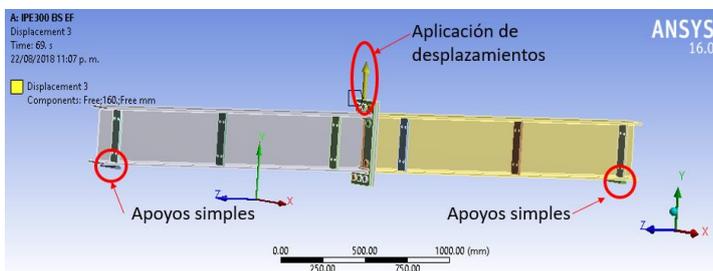


Figura 15: Modelo ANSYS

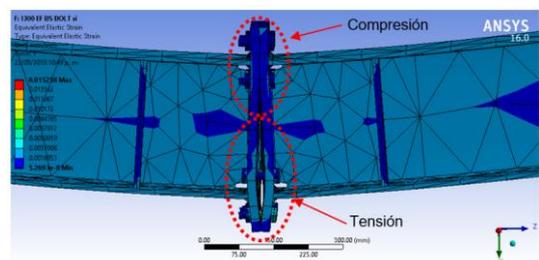


Figura 16: Resultados del modelo.

La diferencia porcentual entre los valores del MEF y los experimentales varían entre un 2 y 9%, siendo las figuras 17 y 18 en las que se observa mayor aproximación.

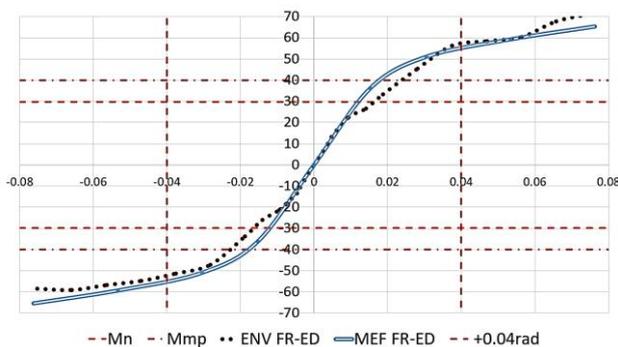


Figura 17: ENV FR-ED vs MEF FR-ED

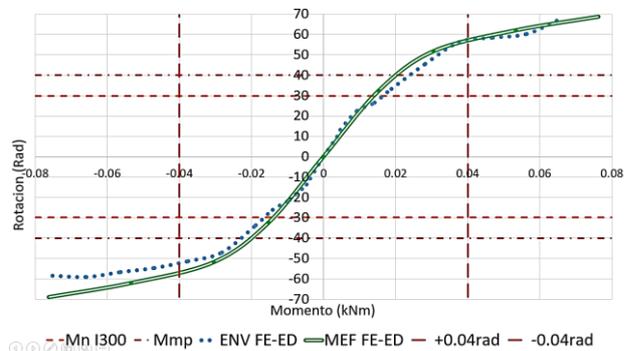


Figura 18: ENV FE-ED vs MEF FE-ED

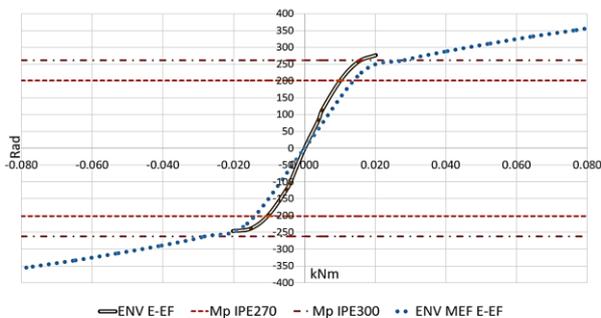


Figura 19: ENV FR-EF vs MEF FR-EF

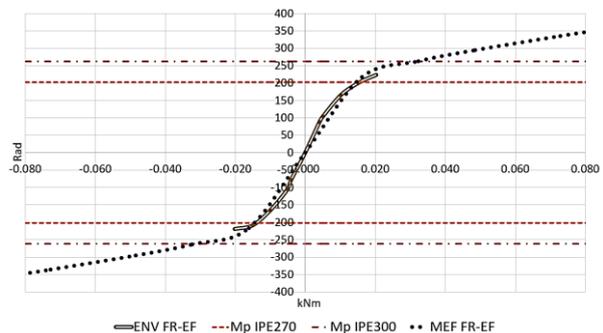


Figura 20: ENV FE-EF vs MEF FE-EF

Se evidencia que las rigideces iniciales para los modelos de las figuras 17 y 18 son bastante aproximadas entre el MEF y los datos experimentales, mientras que en las figuras 19 y 20 la diferencia es aceptable, aunque la curva del MEF es menos rígida que la experimental.

Debido a que el modelo de plasticidad utilizado no tiene integrado un parámetro que permita establecer la falla del material, las curvas halladas muestran la fluencia y el endurecimiento en las conexiones, pero no representa su pérdida de resistencia y/o rotura.

2.7 Extrapolación de ensayos a flexo-compresión por MEF

Uno de los parámetros que determinan la resistencia última de un elemento solicitado a flexo-compresión es la interacción entre el axial y los momentos. Como referencia para el análisis de las conexiones tipo placa extremo en columnas a flexo-compresión se partió de la investigación de columnas CFT [4] (Concrete Filled Tube), donde los modelos experimentales estaban solicitados a flexo-compresión, sirviendo como una guía inicial en la elaboración de la simulación por MEF y validación de sus resultados. Para estas gráficas se realizaron modelos con las características del numeral 2.3, con la diferencia que en los extremos de la probeta se aplicaron cargas axiales del 60%, 80% y 100% de la capacidad máxima nominal de la sección.

En las figuras 21 y 22 se muestran las curvas momento vs. Rotación por el eje débil y por el eje fuerte respectivamente, en ellas se observa que en el rango elástico y lineal hay una reducción de la rigidez de la conexión en función del aumento de la carga axial en la columna.

Comparando las figuras 21 y 22 se presenta la reducción de rigidez de las conexiones luego de alcanzar el Mmp (máximo momento probable). Esto evidencia la fase de endurecimiento del sistema, no obstante, la pérdida de rigidez de los modelos a flexión por el eje fuerte es mayor que la dada en el eje débil.

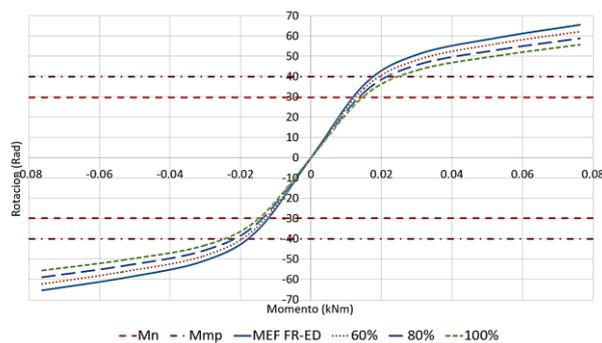


Figura 21: MEF FE-ED

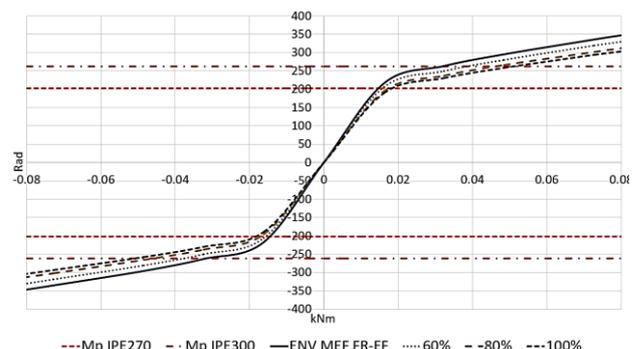


Figura 22: MEF FE-EF

De acuerdo con estos resultados, se demuestra que la conexión cumple con las solicitaciones de flexo-compresión, dado a que, con todas las condiciones de carga axial, el cambio de pendiente se da después de alcanzar el Mmp (Máximo momento probable) del perfil más pequeño, esto se evidencia en las figuras 21-22, dado que el cambio de pendiente se presenta después de la línea punteada que representa el límite Mmp.

3. CONCLUSIONES

Es factible el uso de conexiones tipo placa de extremo para empalmar columnas metálicas en perfiles tipo H, debido a que cumple con los requisitos de resistencia establecidos en la norma, comprobado con los ensayos experimentales realizados en escala real.

Con la metodología de simulación utilizada considerando el modelo constitutivo de plasticidad isótropo bilineal se logró una buena aproximación (2%-8%) con los resultados experimentales, por lo tanto, esta metodología puede utilizarse para extrapolar este tipo de conexión con diferentes secciones a las ensayadas.

La simulación de la pretensión en los pernos no afecta el comportamiento determinado en los modelos numéricos, las curvas de histéresis son iguales con o sin pretensión en los pernos.

De acuerdo con los resultados experimentales y la simulación numérica, el tipo de soldadura utilizada en la conexión, soldadura a CJP o soldadura de filete, no influye en su comportamiento.

La metodología propuesta para el diseño de las conexiones tipo placa de extremo para empalmar columnas con perfiles H a partir de los estados límite es apropiada, dado que describe adecuadamente los estados límite que posee y permitiendo un diseño de la conexión confiable.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia y a su personal que brindaron su apoyo y esfuerzo para la realización de los ensayos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FEMA-351, "Performance evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment frame buildings", pp. 3-1,3-42, California, 2000.
- [2] J. H. Edwards, "Transverse tests of H-section column splices", Bureau of Standards Journal of research vol 4, pp. 395-418, 1930.
- [3] A. Kanvinde & S. Shaw, "Seismic performance of partial joint penetration welds in column splices", Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska, 2014.
- [4] H. Hua, C. Huangb, Z. Chena, "Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination", Journal of constructional Steel research, pp. 3-6, 2004
- [5] F. Ladani, "Effects of column splice properties on seismic demands in steel moment frames", NZSEE 2014 paper P33, New Zealand, 2014
- [6] F. Flores, F. Charney, D. Lopez, "The influence of gravity column continuity on the seismic performance of special steel moment frame structures", Journal of Constructional Steel Research, vol. 118, pp. 217-230, 2016
- [7] H. Snijder, J. Hoenderkamp, "Experimental tests on spliced columns for splice strength and stiffness requirements", Report O-2005.19, Eindhoven University of Technology, Netherlands, 2005, 2006
- [8] Bruneau&Mahin, "Full-Scale Tests of Butt-Welded Splices in Heavy-Rolled Steel Sections Subjected to Primary Tensile Stresses", Engineering journal, pp. 1-12, 1991
- [9] M. Uribe & G. Valencia, «Evaluating a steel beam's rigid connection to a concrete filled tubular column» Revista ingeniería e investigación vol. 29 No. 1, pp. 23-34, 2009.