

COMPORTAMIENTO DE LA CONEXIÓN TIPO ÁRBOL CON PLACA EXTREMO EXTENDIDA A PARTIR DE ANÁLISIS CON ELEMENTOS FINITOS

Hiram Jesús de la Cruz^{1,*}, Tiziano Perea Olvera¹ y Jorge Luis Varela Rivera²

¹Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco. Av. San Pablo 180. Col. Reynosa Tamaulipas, C.P. 02200. Ciudad de México.

²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte S/N, C.P. 97310, Mérida, Yucatán.

Fecha de recepción: 17 de octubre de 2019 - Fecha de aceptación: 11 de junio de 2020

Resumen

El desarrollo e implementación de modelos de elementos finitos en el análisis estructural de miembros, conexiones y sistemas representa una herramienta muy valiosa para la predicción de su respuesta y comportamiento. En este trabajo de investigación se presentan los resultados que se obtienen del análisis de elementos finitos de una serie de conexiones viga-columna con placas de extremo tipo árbol. Se considera en el modelo numérico las propiedades de los materiales, las condiciones de frontera y de aplicación de carga, interacciones por contacto normal y tangencial existentes entre los diferentes elementos de conexión, así como, se incorpora el efecto del pre-tensionado de los tornillos. La evaluación de los resultados, con base en las simulaciones numéricas de elementos finitos, confirma una buena correlación con la respuesta que se reporta en los ensayos experimentales, condición que posibilita su implementación para la predicción de la respuesta estructural en sistemas de marcos de acero estructural resistente a momento.

Palabras clave: Conexión en árbol, elementos finitos, conexión atornillada, análisis no lineal, elemento de contacto.

BEHAVIOR OF COLUMN-TREE MOMENT CONNECTIONS WITH EXTENDED END-PLATE BASED ON FINITE ELEMENT ANALYSIS

Abstract

The development and implementation of finite element models in the structural analysis of members, connections and systems represent a very valuable tool for the prediction of their

* hramjec@hotmail.com

response and behavior. Results obtained from the finite element analysis of column-tree connections with end plates are presented and discussed in this paper. Material properties, boundary conditions, load patterns and combinations, normal and tangential contact were considered in the numerical model, as well as the effect of the bolts pre-tensioning. The evaluation of the results, based on the numerical simulations with finite element analysis, confirms a good correlation with the response that is reported in the experimental tests, which allows its implementation for the prediction of the structural response in moment resisting frame systems.

Keywords: Column-tree moment connection; finite element; bolted connection; non-linear analysis; contact element

Introducción

Como consecuencia de lo ocurrido en el terremoto de 1994 en Northridge, y de 1995 en Kobe, los códigos a nivel internacional para el diseño de conexiones viga-columna resistentes a momento establecen requisitos relativos al diseño estructural, detallado adecuado de sus componentes, así como, al proceso de fabricación y montaje; en estos códigos, se destacan las recomendaciones enfocadas en reducir la cantidad de soldadura de campo que es requerida. En este sentido, las disposiciones del ANSI/AISC 358-16 proporcionan procedimientos y especificaciones de diseño de una serie limitada de conexiones viga-columna rígidas, denominadas “conexiones precalificadas”, que los ingenieros estructurales pueden emplear para el diseño sísmico de estructuras de acero. Sin embargo, la práctica profesional ha requerido el empleo de conexiones viga-columna cuya configuración no forma parte de esta especificación, y para las cuales ha sido necesaria la evaluación de su comportamiento mediante pruebas experimentales. Los resultados de algunas de estas pruebas han sido publicados en reportes técnicos o trabajos de investigación, los cuales proporcionan aspectos relevantes que pueden emplearse para determinar el desempeño de estas conexiones (e.g. Abel *et al.*, 1994, Astaneh, 1997; Sumner 2003, Lozano, 2007; Jesús *et al.*, 2010; Vivas *et al.*, 2012, entre otros).

La conexión viga-columna tipo árbol se caracteriza por incluir una primera conexión soldada de vigas de unión cortas (también llamadas vigas muñón) a la columna que se realiza en taller, y una segunda conexión atornillada de las vigas de carga a las vigas muñón que se efectúa en campo. La conexión entre viga de carga y viga muñón se realiza con diferentes configuraciones, y una de ellas es mediante el uso de placa extremo extendida atornillada, que puede estar sin atesar como se muestra en la figura 1(a), o bien, con placa extremo atesada como se muestra en la figura 1(b). La viga muñón se extiende a una corta distancia de la columna; Astaneh (1997) recomienda una longitud no mayor del 15% del claro libre.

Esta configuración representa una alternativa muy conveniente en la construcción de estructuras de acero debido a su facilidad de fabricación y montaje, así como, al uso de juntas atornilladas que no requieren soldadura de campo, con lo cual se obtiene una reducción del tiempo de construcción y del costo de la estructura.

El sistema de conexión viga columna en árbol con placa de extremo está conformado por: *Columna de soporte* (generalmente de sección IR, cajón, HSS o cruciforme) a la cual se sueldan las vigas unión. *Viga unión* es el tramo corto de viga (generalmente del mismo peralte de la viga de carga) que se suelda en el taller al patín o al alma de la columna de soporte, mientras que en campo se acopla a la viga de

carga mediante un empalme atornillado con placa extremo. *Viga de carga* es el segmento de viga que cubre el claro libre comprendido entre las dos vigas de unión. *Placas de extremo* las cuales tienen un patrón de perforaciones específico que permite la unión atornillada entre la viga unión y la viga de carga. La porción de las placas de extremo que sobresale de los patines de las vigas puede disponer o no de atiesadores como se muestra en la figura 1.

Lozano (2007), realizó un estudio de la conexión viga-columna en árbol con placas de extremo mediante la prueba experimental de un espécimen sujeto a carga monotónica, en el que consideró únicamente la influencia del espesor

de la placa de unión en el comportamiento de la conexión para predecir su resistencia a flexión. Implementó un modelo analítico de la placa con base en el método de líneas de fluencia usado por Srouji (1983) para el análisis de placas de conexión. Con base en los resultados, Lozano (2007) concluyó que el comportamiento de la conexión tipo árbol en términos de la capacidad a flexión de las placas de unión podía ser descrito empleando el modelo analítico correspondiente al de una conexión viga-columna con placas de extremo. Sin embargo, en esta investigación no se estableció la influencia de las variables que intervienen en el comportamiento, y únicamente se ensayó un espesor de placa.

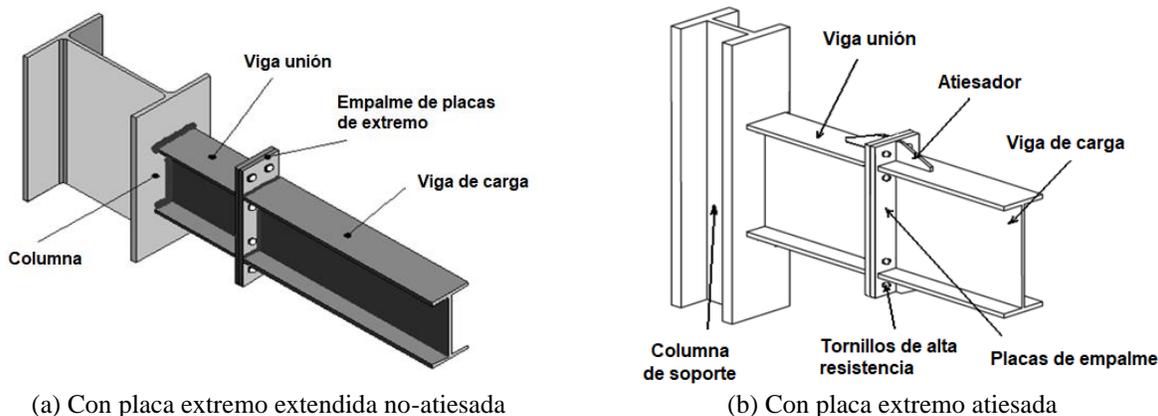


Figura 1. Conexiones tipo árbol

Jesús *et al.* (2010) realizan un programa de prueba experimental para evaluar el comportamiento de la conexión tipo árbol ante cargas cíclicas reversibles, que consistió en el ensaye experimental de tres especímenes de la conexión tipo árbol con placas extremo extendida no atiesadas, como se ilustra en las figuras 2 y 3, con cuatro tornillos en la zona de tensión y cuatro en la zona de compresión, ambas zonas sin algún atiesador. La viga de carga y la viga de unión (muñón) consisten en un perfil laminado en caliente IR152×18 (W6×12) de acero ASTM A572 grado 50 con

una longitud de, respectivamente, 95 cm. y 30 cm. (*i.e.* longitud total de 1.25 m.).

Todas las placas extremo son de acero ASTM A36 laminadas en caliente con los espesores que se muestran en la Tabla 1. Los tornillos son de alta resistencia ASTM F3125 Gr. A325 de 13 mm. (½ pulg.) de diámetro; como se resume en la Tabla 1, la pretensión de los tornillos solo se aplicó en los especímenes E-02 y E-03, mientras que para el espécimen E-01 solo se efectuó un apriete ajustado. Los esfuerzos de fluencia, F_{ye} , y esfuerzos últimos, F_{ue} , en esta tabla corresponden a los valores promedio que

se obtienen y reportan de los ensayos de materiales.

Tabla 1. Matriz de especímenes que ensayada Jesús *et al.* (2010)

Espécimen	Vigas	Placas extremo	Tornillos
E-01	IR152×18 (W6×12)	6.3 mm (1/4 pulg.)	A325
E-02		4.7 mm (3/16 pulg.)	A325-SC
E-03		6.3 mm (1/4 pulg.)	A325-SC
F_{ye}	3792 kg/cm ² (371.9 MPa)		---
F_{ue}	4492.5 kg/cm ² (440.6 MPa)		8400 kg/cm ² (824 MPa)

El montaje experimental de este estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. La figura 2 muestra la configuración del sistema de que se usó para los ensayos, el cual consiste en un marco de reacción, al cual se conecta un dispositivo atornillado de acero que simula una condición de continuidad (conexión con la columna) en el extremo izquierdo. Por su parte, en el extremo derecho, se conecta a un actuador

hidráulico de dos vías que aplica desplazamiento en dirección vertical y que forma parte de un sistema biarticulado. El desplazamiento aplicado por el actuador hidráulico se considera positivo cuando el sentido del movimiento se produce hacia arriba. Adicionalmente, se dispuso de un sistema de soporte lateral para evitar la incidencia de inestabilidad lateral del espécimen durante la prueba.

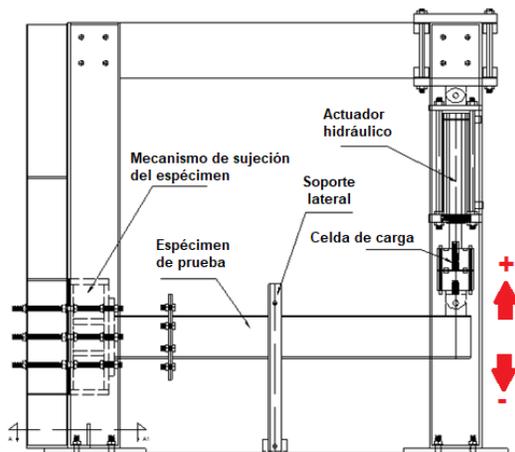


Figura 2. Montaje experimental

En la figura 3 se muestra la instrumentación para cada espécimen, la cual consiste en medidores de desplazamiento lineal (de 50 mm y 127 mm) y galgas extensométricas para obtener el registro de las deformaciones

unitarias en puntos específicos del espécimen de prueba. Para el registro de la carga cíclica se empleó una celda de carga tensión-compresión con capacidad de 6.8 toneladas (66.7 kN). Así mismo, se aplicó un recubrimiento frágil en la

zona del empalme de placas, elaborado mediante lechada de cal, para evidenciar zonas

de fluencia incipiente durante la prueba experimental.

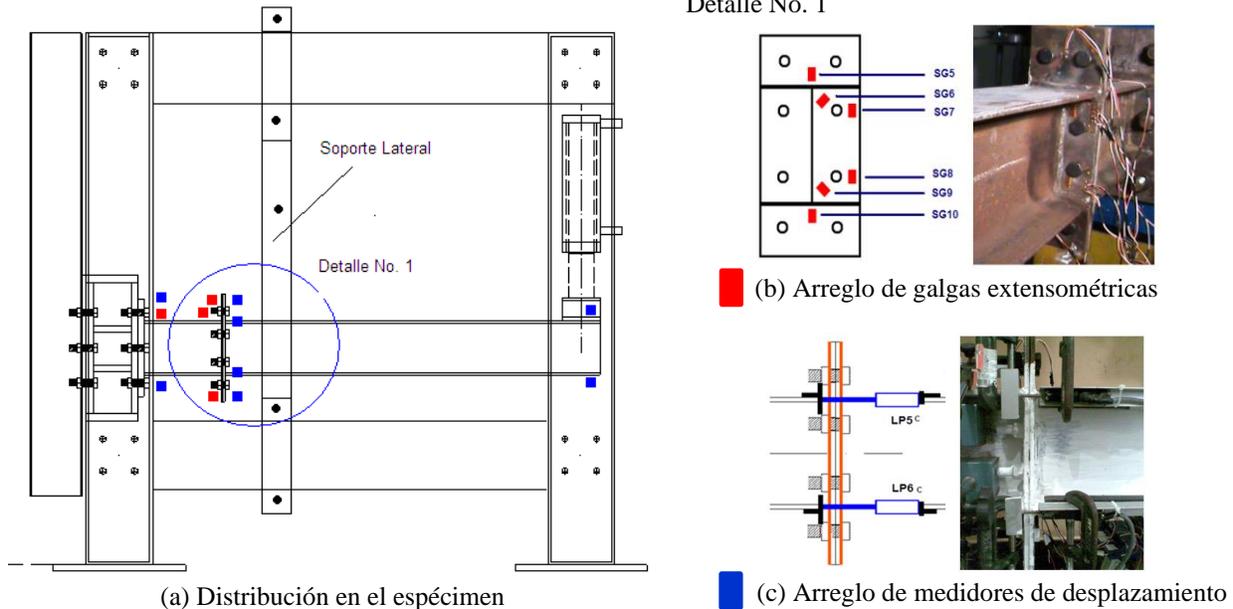


Figura 3. Sistema de instrumentación

En la actualidad se pueden desarrollar e implementar modelos de elementos finitos como herramienta para la predicción y comportamiento de sistemas estructurales (i.e. desplazamientos, esfuerzos, deformaciones, etc.), y así realizar simulaciones bajo condiciones distintas a las que se tomaron de referencia para su calibración. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo presentar el desarrollo de modelos de elementos finitos de las pruebas realizadas por Jesús *et al.* (2010) para simular el comportamiento experimental de las conexiones viga-columna tipo árbol, tomando en consideración en las pruebas las condiciones reales de: propiedades de los materiales, condiciones de apoyo y de carga, así como, las interacciones y contactos existentes entre los componentes de la conexión.

Metodología

Descripción del modelo de elementos finitos

Los modelos de elementos finitos (MEF), que se elaboran en ABAQUS (2016), se calibran para reproducir la respuesta experimental de los especímenes E-02 y E-03 ensayados por Jesús *et al.* (2010), y que se describen en la Tabla 1. No se considera en este análisis el espécimen E-01, tomando en cuenta que el espesor de la placa extremo es igual a la del espécimen E-02, aunado al hecho que solo se realizó un apriete ajustado de los tornillos que no fue determinado cuantitativamente. La geometría, secciones y materiales de cada una de las partes que integran estas conexiones corresponden a lo que se reporta en el estudio experimental.

La figura 4 muestra diferentes vistas del ensamble del MEF, en el que cada parte se modela de forma individual para posteriormente ensamblarse. En la creación del modelo se consideran características geométricas tales como: tamaño de agujeros, cortes en patines y alma, tamaño de tornillos y tuercas, y alineación entre componentes; sin embargo, en el modelo no se considera la geometría de las soldaduras que unen vigas con las placas de extremo, así como, las cuerdas de tornillos y tuercas. El modelo puede reproducir la distribución de los esfuerzos y las deformaciones en los componentes de la conexión, incluyendo la secuencia en la fluencia y el pandeo local de las componentes, aunque no reproduce la fractura o desgarre de las placas, tornillos u otros elementos de la conexión.

Condiciones de frontera

La figura 4 muestra las condiciones de frontera impuestas en el MEF. En el extremo se asigna restricción total a los desplazamientos lineales para simular condiciones similares a las reportadas para las pruebas. Al igual que en los especímenes de prueba, en la parte central de la longitud de la viga de carga se implementaron restricciones en ambos patines ante desplazamientos laterales para evitar la posible incidencia de fenómenos de inestabilidad lateral durante el análisis. El protocolo de carga que se emplea en los experimentos y para estos análisis consiste en aplicar una secuencia de desplazamientos de forma cíclica en el extremo libre del modelo.

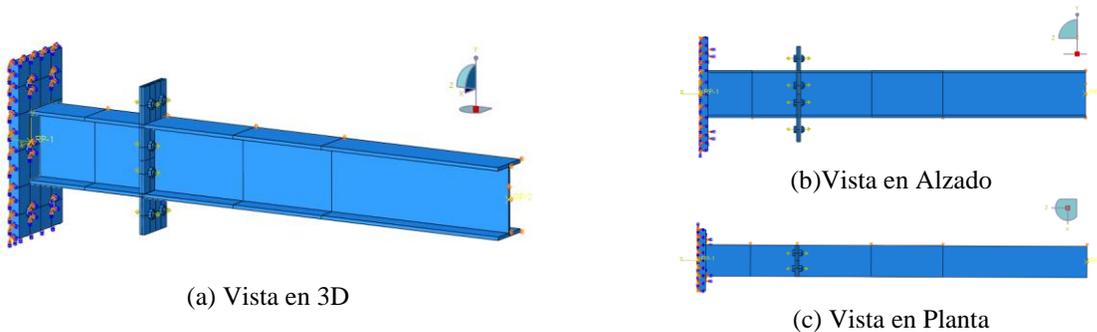


Figura 4. Configuración del modelo de elementos finitos

Interacciones y contactos

Con el objetivo de simular las condiciones de la prueba experimental en la figura 5, se muestra cómo se incorporan en el modelo las diferentes interacciones por contacto que fueron identificadas, y entre las que se incluyen las superficies de contacto normal y tangencial entre placas de extremo, así como, los contactos normal y tangencial entre la cabeza, tuerca y vástago de los tornillos con las placas de extremo. Para las superficies en contacto normal se emplea el algoritmo de contacto duro que minimiza la penetración de la superficie

esclava en la superficie maestra en las ubicaciones de restricción y, además, no permite la transferencia de esfuerzos de tensión entre las superficies de contacto. Para las superficies en contacto tangencial se considera el modelo clásico de fricción isotrópica de Coulomb con un coeficiente de fricción de 0.13.

En la secuencia de análisis se realiza un primer paso en el cual se simula el efecto de pretensionado de los tornillos (figura 6), seguido por el de la aplicación del protocolo de

carga cíclico empleado para la prueba. La pretensión de los tornillos solo se considera en los MEF para los especímenes E-02 y E-03 que, como se ilustra en la figura 6, se realiza al aplicar una carga axial de apriete con el valor correspondiente para tornillos ASTM F3125

Gr. A325 de 13 mm ($1/2$ pulg.) de diámetro conforme con la especificación ANSI/AISC (2016), y como se aplicó en los especímenes de prueba con un tercio de vuelta por encima del apriete ajustado.

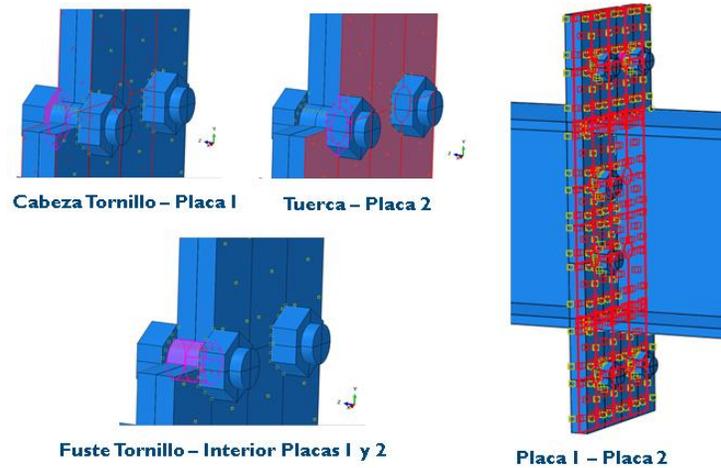


Figura 5. Interacciones entre las superficies de contacto

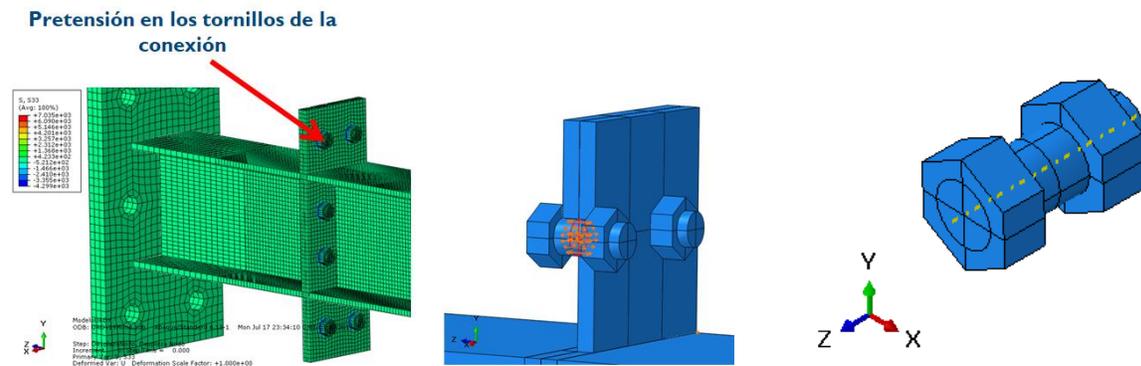


Figura 6. Modelado y aplicación del pretensionado de los tornillos

Efectos de esfuerzos residuales o por cambios de temperatura

No se considera en el modelo de elementos finitos los efectos térmicos asociados a los procedimientos de aplicación de soldadura o por esfuerzos residuales en la sección de los componentes de la conexión debido a los efectos de laminación y conformado. Por tanto, se considera que el análisis se tienen

condiciones que son independientes de los efectos de la temperatura.

Propiedades y configuración de la malla

Los elementos finitos que se emplean en el modelo, tanto en el dominio de acero como para los elementos de contacto son hexaedros 3D continuos deformables con 20 nodos, cada uno con tres grados de libertad de desplazamiento, y una técnica de integración

reducida (C3D20R) que minimiza el tiempo de ejecución a la tercera parte respecto a la de elementos de integración completa. Estos elementos son eficientes para análisis no lineales complejos que involucran contacto, plasticidad y grandes deformaciones. Así, en la figura 7 se muestra la configuración de la malla estructurada que se emplea para el modelo con elementos de 1.5 cm de longitud, en la cual se

puede observar una mayor densidad de la malla en la zona de interés y en donde se esperan mayores variaciones de esfuerzos y deformaciones (*i.e.* zona de empalme de la conexión árbol con placa extrema) con tamaños de 1 cm, y de hasta 0.25 cm para los tornillos. La relación de aspecto siempre fue menor que 5 para todos los elementos.

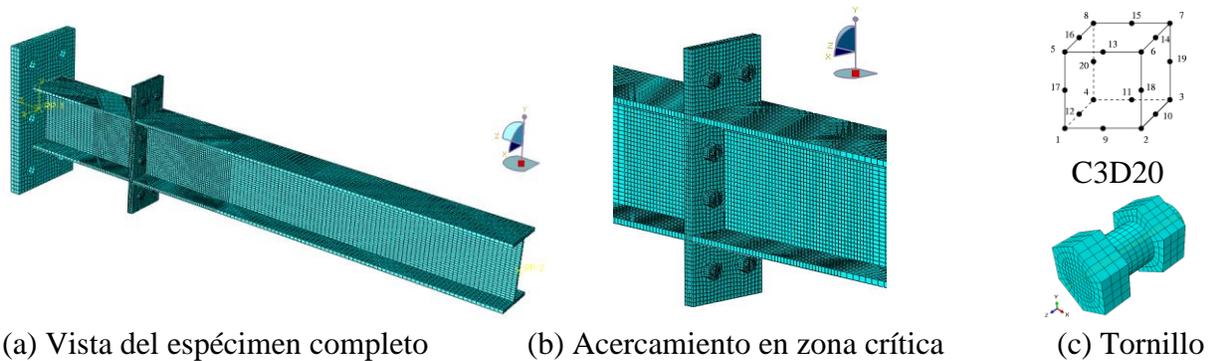


Figura 7. Densidad de la malla de sólidos

Propiedades de los materiales

Las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de aceros que se emplean en los análisis corresponden a los valores reportados de los ensayos de materiales (Tabla 1), los cuales para ser implementados en ABAQUS fueron convertidos a relaciones esfuerzo–deformación

reales o efectivas. Asimismo, se adopta una ley constitutiva de plasticidad cíclica desarrollada por Chaboche (1989) que combina endurecimiento isotrópico y cinemático, para la que se consideran los parámetros de plasticidad sugeridos por Morrison (2015) los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de plasticidad con endurecimiento combinado (Morrison, 2015)

Parámetro	Vigas IR ASTM A572 Gr. 50	Placas de extremo ASTM A36	Tornillos ASTM F3125 Gr. 325
E (kg/cm ²)	1,952,815	1,905,460	2,038,910
σ_0 (kg/cm ²)	2570	2670	7930
C_1 (kg/cm ²)	1,278,890	1,223,630	2,086,510
C_2 (kg/cm ²)	294,380	110,875	1,552,525
C_3 (kg/cm ²)	27,280	5,485	1,033,165
C_4 (kg/cm ²)	1,477	703	328,545
γ_1	4,585	1,035	4,145
γ_2	325	130	285
γ_3	42	5	107
γ_4	0	0	0

Programa de prueba experimental e historia de carga

El programa de prueba experimental realizado consiste en dos fases:

FASE I. Está definida por una serie de nueve ciclos con control de carga conformados por tres ciclos en los cuales se aplican incrementos de $1/3 P_u$ hasta alcanzar P_u , (Tabla 3). Dónde: P_u es la carga vertical concentrada aplicada al extremo libre del espécimen que determina la resistencia a flexión nominal de la placa de extremo de la conexión. Para el E-01 y E-03, esta carga P_u es de 1,275 kg, y para el E-02 P_u es de 714 kg.

FASE II. Corresponde a ciclos con control de desplazamiento, cada dos ciclos se realiza el

incremento en 1 cm del desplazamiento vertical del extremo libre del espécimen respecto al anterior. (Tabla 4).

El final de la prueba se define cuando se alcanza una pérdida de resistencia mayor al 10% con respecto al ciclo anterior, o por la incidencia de algún evento tal como la fractura de la placa de extremo o de alguno de los tornillos de la conexión. Durante toda la prueba la aplicación de la carga se realizó de forma lenta.

Tabla 3. Fase I del programa de prueba

No. Ciclos	Carga aplicada	Desplazamiento
3	$1/3 P_u$	Δ_1
3	$2/3 P_u$	Δ_2
3	$3/3 P_u$	Δ_3

Tabla 4. Fase II del programa de prueba

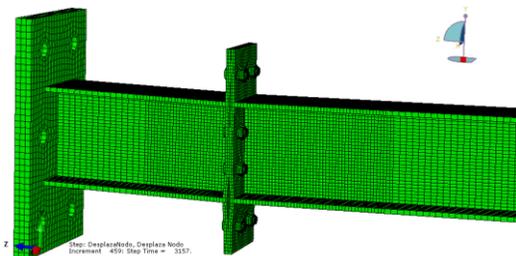
No. Ciclos	Carga aplicada	Desplazamiento
2	-	$\Delta_4 = \Delta_3 + 1 \text{ cm}$
2	-	$\Delta_5 = \Delta_4 + 1 \text{ cm}$
2	-	$\Delta_n = \Delta_{(n-1)} + 1 \text{ cm}$

Resultados

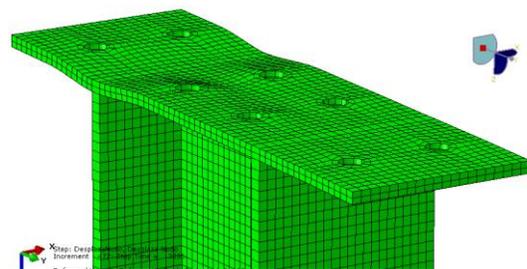
Configuración deformada

La figura 8 ilustra la configuración deformada de la placa de extremo de la conexión tipo árbol

que se obtiene con del análisis del modelo de elementos finitos, la cual reproduce lo observado en la prueba experimental de los especímenes de conexiones ensayados.



(a) Deformación global espécimen



(b) Deformación placa de extremo

Figura 8. Configuración deformada del modelo de elementos finitos E-03

Respuesta carga – desplazamiento lateral

El comportamiento cíclico global simulado del análisis de los modelos de elementos finitos se ilustra en la figura 9 mediante las curvas de

carga – desplazamiento lateral de cada uno de los especímenes de la conexión ensayados experimentalmente.

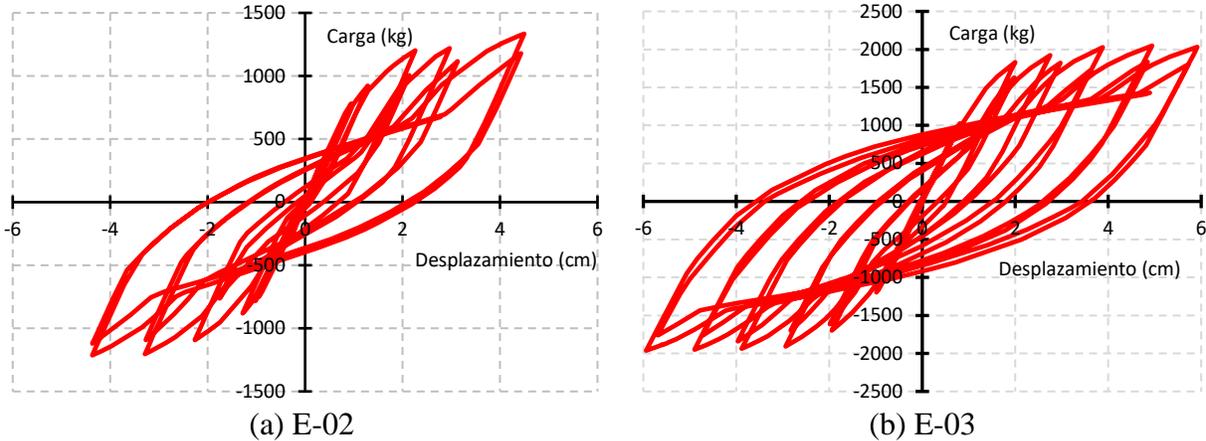


Figura 9. Curvas carga – desplazamiento lateral modelos elementos finitos

Respuesta momento – distorsión

En la figura 10 se presenta la respuesta momento-distorsión que se obtiene en el análisis de los modelos de elementos finitos. El momento aplicado en la conexión se determina como la carga que se aplica multiplicada por la distancia entre el punto de aplicación de ésta y

el empalme de placas la conexión. Por su parte, la distorsión de la conexión se obtiene como la relación entre el desplazamiento vertical, medido en el extremo libre de la viga, y la distancia desde el punto de aplicación de la carga al empalme de placas.

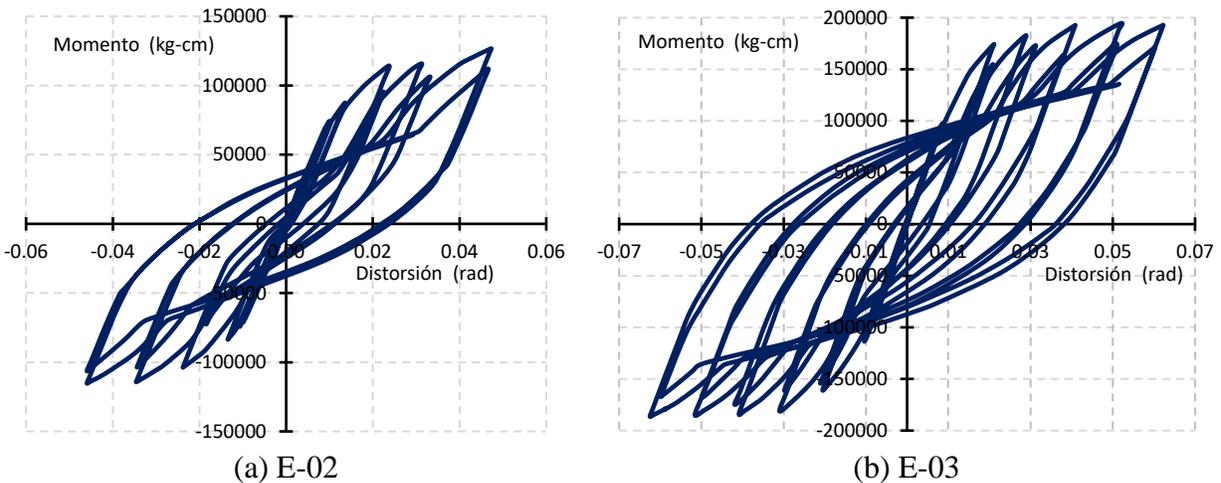


Figura 10. Curvas momento-distorsión modelos elementos finitos

Respuesta carga – deformación placa de extremo

La figura 11 muestra las curvas carga – deformación placas de extremo, de la conexión tipo árbol a la altura de los patines de la viga de carga obtenida del análisis de elementos finitos de los modelos E-02 y E-03. La deformación de las placas de extremo de la conexión es una medida indirecta obtenida de la separación que

se presenta en ellas a la altura de los patines de la viga, mediante el arreglo de medidores de desplazamiento lineal que se muestra en la figura 3(c). Esta deformación puede emplearse para caracterizar el comportamiento no lineal del sistema de conexión tipo árbol. Los pequeños valores negativos que se observan en la gráfica de la figura 11 (menores a 0.1 mm) se deben a pequeñas deformaciones

entre las placas de extremo, generadas durante el proceso de fabricación y que no permitieron que estas se empalmaran completamente. Por su parte, el comportamiento descrito en la

figura 11 se debe al mecanismo de apertura y cierre que se presenta entre las placas de extremo durante la prueba cíclica, evento que analiza y discute Jesús *et al.* (2010).

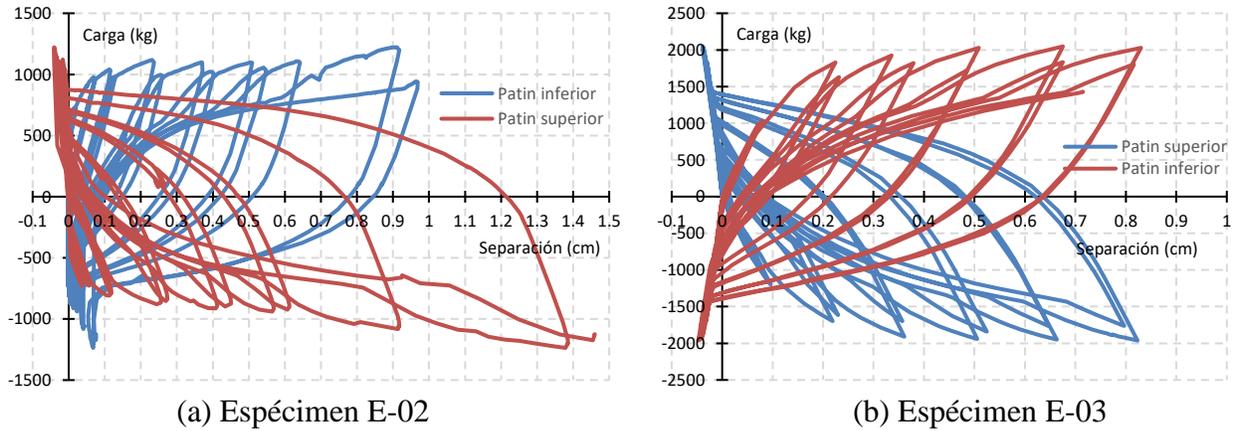


Figura 11. Carga-deformación placas de extremo

Discusión

Comportamiento cíclico de la conexión tipo árbol

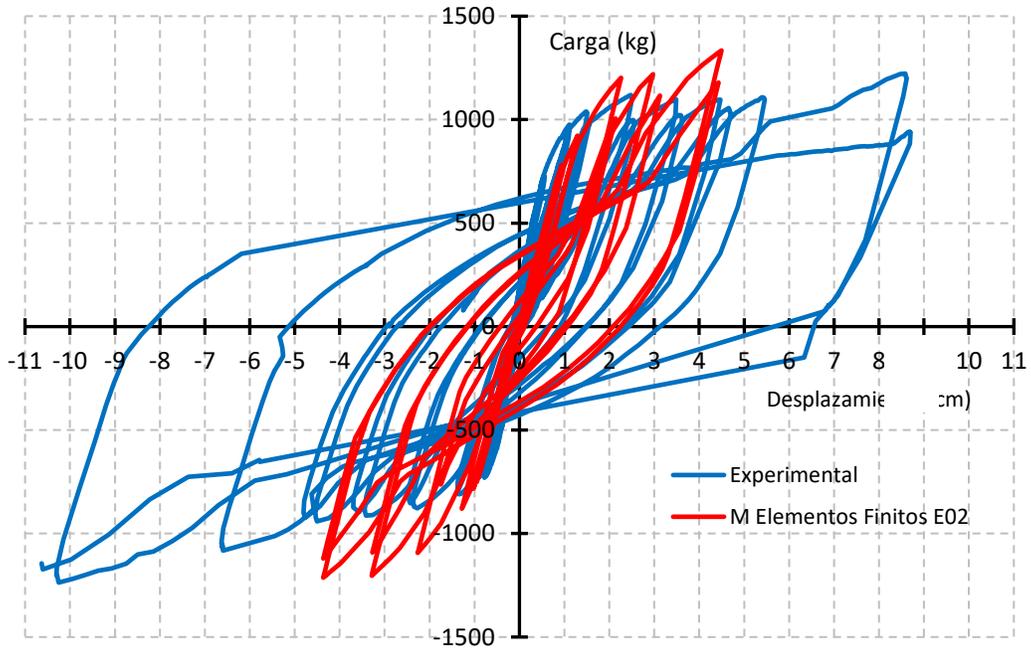
En la figura 12 se presenta la curva carga – desplazamiento lateral para los especímenes E-02 y E-03, de la conexión. A partir de la relación entre los resultados experimentales y analíticos obtenidos para cada ciclo se determinó una variación máxima del 17%.

El análisis de elementos finitos permite reproducir el comportamiento cíclico de las conexiones hasta un desplazamiento lateral del orden de 5 cm para el E-02 y de 6 cm para el E-03; posterior a estos niveles de desplazamiento lateral las placas de extremo de la conexión tipo árbol exhiben condiciones de plastificación, asociadas a la formación de una articulación plástica en ellas lo cual no permite su simulación numérica.

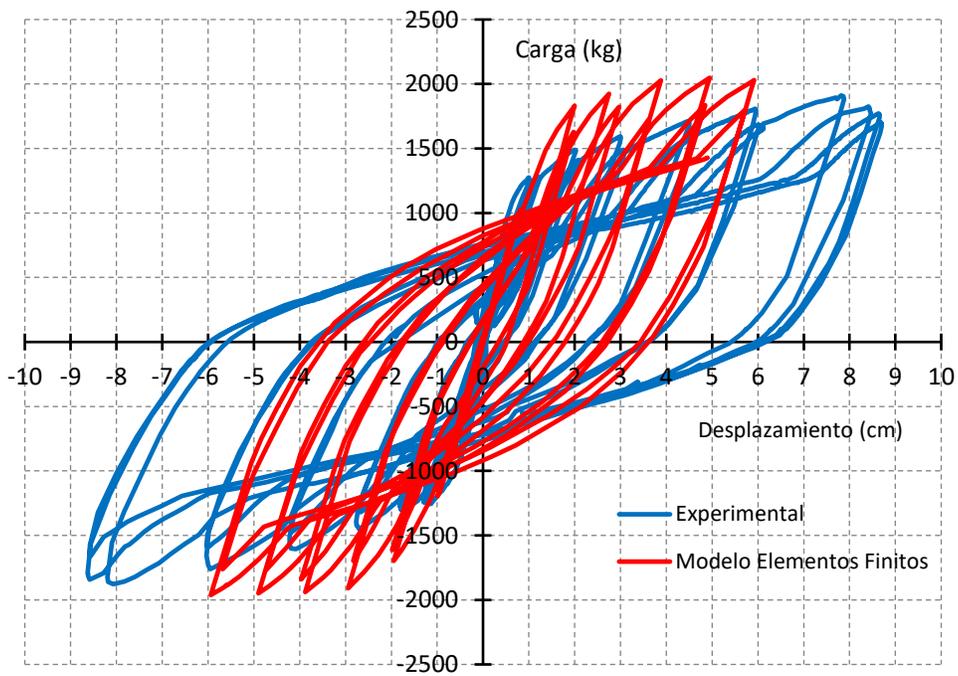
Configuración deformada de los componentes de la conexión

A partir de los resultados del análisis de elementos finitos, y con el propósito de entender el comportamiento de la conexión tipo árbol, se realiza una evaluación comparativa con la respuesta cíclica experimental de este tipo de conexión.

En la figura 13 se presenta una comparativa de la deformación de la placa de extremo de la conexión tipo árbol que se presenta durante la prueba experimental, respecto de la deformación que se reproduce a partir del análisis del modelo de elementos finitos para la misma condición. Se observa que el modelo de elementos finitos reproduce adecuadamente la configuración deformada que fue observada experimentalmente.

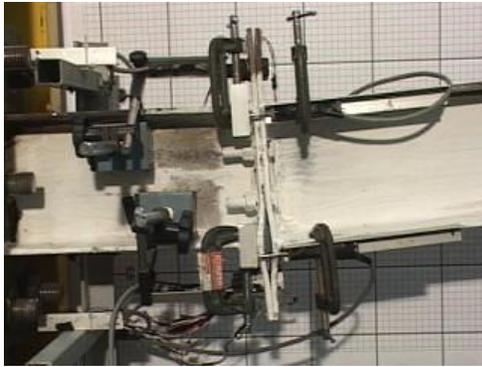


(a) Especimen E-02

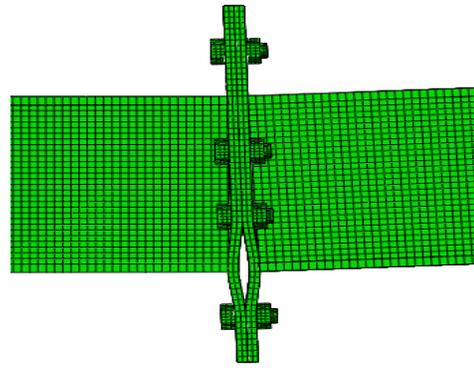


(b) Especimen E-03

Figura 12. Comparativa carga-desplazamiento lateral. Experimental vs. Analítica



(a) Prueba experimental (Jesús *et al.*, 2010)



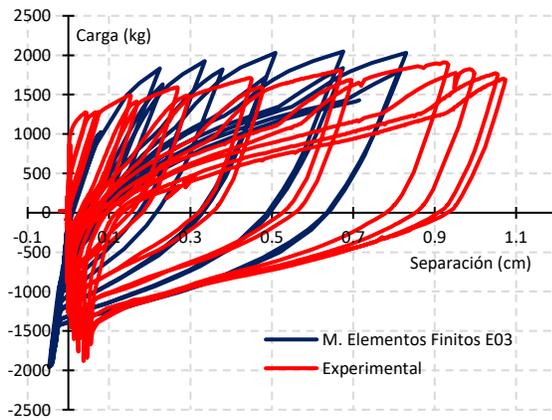
(b) Análisis de elementos finitos

Figura 13. Comparativa en la deformación de la placa de extremo de la conexión E-02

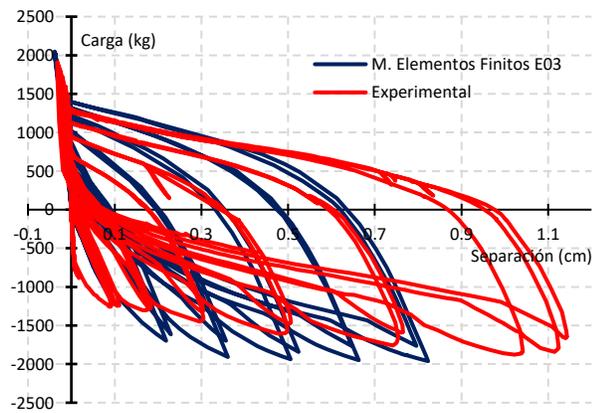
Deformación de la placa de extremo

Por su parte, en la figura 14 se presenta una comparativa entre las curvas carga-deformación placa de extremo obtenida de la prueba experimental y de la simulación del modelo de elementos finitos del espécimen E-03. Con base en la relación de resultados

experimentales y analíticos obtenidos para cada ciclo se determinó una variación máxima del 26%. A partir de ello, se concluye que el MEF del espécimen E-03 reproduce adecuadamente el comportamiento experimental.



(a) Patín superior



(b) Patín inferior

Figura 14. Comparativa carga-deformación placa de extremo E-03. Experimental vs. Analítica

En la figura 15(a) se presenta la condición deformada final del espécimen E-03 en las placas de extremo conectadas a las vigas de carga y de unión, y en la figura 15(b) la simulación que se obtiene con el análisis de elementos finitos. En la simulación de elementos finitos, así como, en la prueba experimental se presenta una deformación en los bordes de las perforaciones de la placa de

extremo de la conexión. Este efecto, es ocasionado por el pretensionado inicial que se aplica a los tornillos, el cual restringe los desplazamientos en la zona de contacto entre la tuerca y la placa de extremo, así como, entre la cabeza del tornillo y la placa de extremo. Debido a la naturaleza cíclica reversible, la deformación elástica y posteriormente inelástica en estas zonas está asociada a

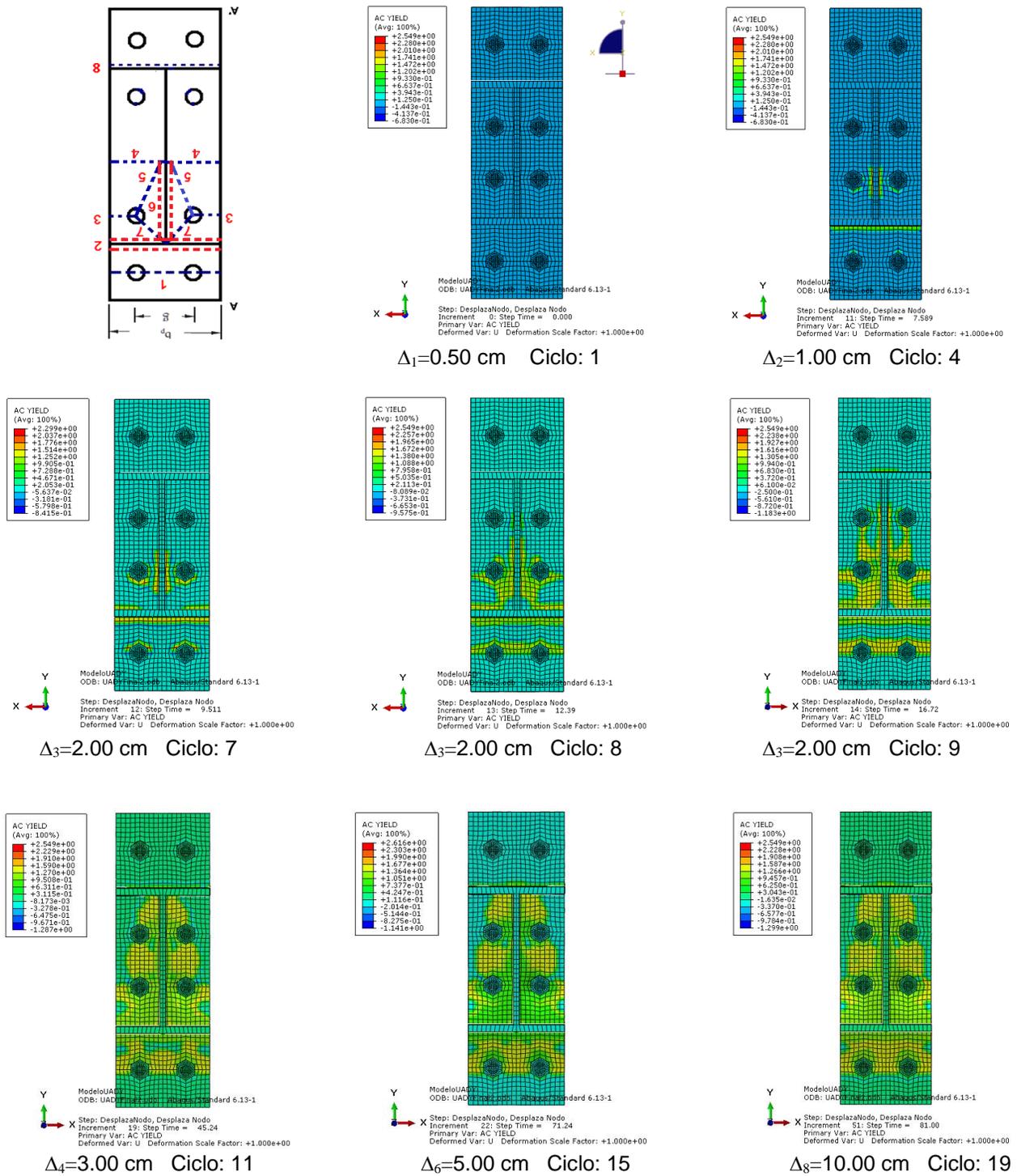


Figura 17. Secuencia de formación de zonas de fluencia en la placa de extremo E-03 en momento positivo

Conclusiones

El presente artículo se presenta un modelo analítico que permite caracterizar la respuesta cíclica cuasi estática de la conexión tipo árbol empleando el método de elementos finitos, que posteriormente se calibra a partir del programa de prueba experimental realizado por Jesús *et al.* (2010). La comparación entre todos los resultados experimentales disponibles y los que se obtienen del modelo de elementos finitos muestran una buena correlación entre ellos. A partir de las simulaciones del modelo de elementos finitos se verifica la validez del mecanismo de líneas de fluencia propuesto por Jesús *et al.* (2010)) para determinar la capacidad a flexión de las placas de extremo de la conexión tipo árbol. La evaluación del modelo analítico propuesto confirma su potencial aplicación para el análisis de sistemas estructurales de acero que puedan incorporar la influencia de este tipo de conexiones

implícitamente en el análisis. El desarrollo e implementación de un modelo de elementos finitos propuesto en este artículo forma parte de un estudio integral que pretende generar recomendaciones para el análisis y diseño de sistema de conexión viga-columna tipo árbol, y permitir su potencial aplicación como conexión calificada en marcos dúctiles de acero en zonas sísmicas.

Agradecimientos

El trabajo descrito en este artículo es parte de un proyecto de investigación colaborativa desarrollado por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY). El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT) por la beca que le permitió realizar sus estudios de maestría en la UADY y de doctorado en la UAM.

Referencias

- Abaqus (2016). Abaqus Analysis User's Guide. Dassault Systems, SIMULIA Corporation. Fremont, California, USA.
- Abolhassan Astaneh-Asl, Ph.D., P.E. (1997) "Seismic Design, of Steel Column-Tree Moment-Resisting Frames", Structural Steel Educational Council.
- Abel, M., Murray, T. M. (1994). Analytical and experimental investigation of the extended unstiffened moment end-plate connection with four bolts at beam flange. Report No. CE/VPI-ST 93/08, Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, USA.
- ANSI/AISC 360-10 (2010). Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois.
- ANSI/AISC 341-16 (2016), Seismic Provisions for Structural Steel Building. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois, USA.
- ANSI/AISC 358-16, (2016). Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications. Chicago, Illinois, USA
- Chaboche, J. L. (1989). "Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity".

International Journal of Plasticity, 5, pp 247-302.

Jesús H. (2010). Comportamiento de conexiones tipo árbol sometidas a cargas cíclicas cuasi-estáticas. Tesis de Maestría. Asesores: Vivas J.A. y Varela J.L. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

Lozano S. V. (2010) "Comportamiento, análisis y diseño del sistema de conexión de árbol con placas de extremo para marcos rígidos" Tesis de Maestría. Asesores: Vivas J.A. y Varela J.L. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.

Morrison, M. L. (2015). "Innovative seismic performance enhancement techniques for steel building moment resisting connections." Raleigh, North Carolina, Estados Unidos.

Sumner E.A. (2003). Unified design of extended end plate moment connection subject to cyclic load. Ph.D. Thesis. Advisor: Thomas Murray. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, USA.

Srouji, R., Kukreti, A.R., Murray, T.M. (1983). "Yield-Line Analysis of End-Plate Connections with Bolt Force Predictions," Research Report No. FSEL/MBMA 83-05, Fears Structural Engineering Laboratory, School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, Norman, Oklahoma.

Vivas J.A., Jesús H., Varela, J.L. (2012). Comportamiento de conexiones tipo árbol sometidas a cargas cíclicas. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (SMIE). Acapulco, Guerrero, México.