



**Encuentro Internacional de
Educación en Ingeniería ACOFI**

Innovación en las facultades de ingeniería:
el cambio para la competitividad y la sostenibilidad

Centro de Convenciones Cartagena de Indias

4 al 7 de octubre de 2016



MODELACIÓN DE FENÓMENOS ELÁSTICOS E INELÁSTICOS EN MIEMBROS DE ACERO, SIN ACERO

**María Camila González Rincón, Mauricio Alexander Mariño Salamanca, Jeisson Dubier Hurtado
Tinoco, Federico Alejandro Núñez Moreno**

**Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C, Colombia**

Resumen

El estudio de estructuras metálicas es un tema apasionante tanto para profesores, como para estudiantes de pregrado debido al tipo y geometría de estructuras que se pueden lograr a nivel arquitectónico. En los últimos años, la construcción de estructuras metálicas en Colombia ha tenido un especial auge, en proyectos institucionales, educativos y de infraestructura nacional y es importante que los estudiantes más allá de clases magistrales de diseño estructural, puedan tener contacto directo con los fenómenos limitantes de diseño en columnas, vigas y conexiones. Sin embargo, es difícil en nuestro medio contar con laboratorios equipados con las máquinas y la rigurosidad necesaria para poder observar fenómenos como el pandeo de columnas, efectos de longitud en pandeo lateral torsional en vigas y más complicado aún, poder modelar ovalamiento y fractura en conexiones de este tipo de estructuras. En el periodo 2016-1 en el programa de pregrado de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, se generó una serie de ensayos de modelos geométricos simulando elementos metálicos, con una variante desafiante: Los modelos no estaban hechos de acero, sino de cartón paja (cardboard). Se ensayaron tres tipos de modelos: i) Elementos en compresión con diferentes alturas, ii) Elementos a flexión con diferentes longitudes de apoyo y iii) conexiones con diferente número de pernos pero con la misma área de cortante. Los resultados de los comportamientos estructurales de falla de los diferentes elementos simularon de manera precisa fenómenos que se pueden observar en elementos ensayados a escala real en estructuras hechas de acero. De la misma manera, los resultados de la falla de las conexiones, simularon el fenómeno de la fractura de una manera sorprendente y se ajustan a los resultados reportados por Bjorhovde en los ensayos reportados por la Universidad de Arizona los cuales son la base del diseño de bloque de cortante en conexiones (Bjorhovde & Hardash, 1984). Los resultados específicamente de las fallas modeladas de ovalamiento y fractura siguiendo el bloque de Whitmore fueron utilizados para ilustrar los conceptos en la clase de diseño de estructuras metálicas del programa.

Estudiantes de varios semestres se vieron involucrados en el desarrollo de este proyecto de aplicación de un material de uso común, para poder observar fenómenos que solo es posible observar con equipamientos especiales. Los tiempos de ensayo correspondieron a actividades extra-curriculares lo que hace la participación de los estudiantes aún más valiosa.

Los resultados muestran cómo es posible utilizar este material de manera didáctica para complementar los conceptos de diseño estructural con un bajo costo, involucrando activamente a los estudiantes y generando espacios atractivos para iniciar a estudiantes de pregrado en el mundo de la investigación experimental en modelos.

Palabras clave: modelos físicos; estructuras metálicas; aprendizaje activo; conexiones metálicas; investigación extra-curricular

Abstract

Steel structures design is a passionate topic for both undergraduate students as to instructors due to the big range of architectural designs that can be achieved for construction projects. Recently, steel construction had a boom among institutional, academic and private projects in Colombia and became important for students to have beyond experience apart from class room with the governing phenomena for columns, beams and connections. However, in our country is hard to get equipment big enough and with the appropriate technology to observe failure from variables such as buckling for column capacity, lateral torsional buckling in beams, and further bearing and fracture capacity of connections. In the 2016-1 academic term of the civil engineering department of the Pontificia Universidad Javeriana of Bogotá, a series of tests applied to models that simulated steel cross sectional members, had a particular challenge: models were not made of metal, they were made of cardboard. Three types of models were tested: i) compression members with variable height, ii) members under bending moment with variable span length, and iii) connections with variable number of bolts with the same shear resisting area. Geometric results from the loaded models simulated in an accurate way the structural failure of real steel members under test. Similarly, connection failures are according to what was reported by Bjorhovde in tests performed at the University of Arizona which are nowadays the basis of shear block design in connections and tension elements (Bjorhovde & Hardash, 1984). Said failures on the cardboard connections follow the Whitmore last line of bolts and were used to illustrate said theory during class. Students of sophomore and senior years were involved in the development of this project in which, by using a simple material, models allowed to observe structural responses that are only possible through special modeling equipment. The time frames in which students built the specimens and performed the tests correspond to extra-curricular time, which is a more valuable scenario. In summary, it is possible to use this material in a didactical way to complement concepts of limit states in steel design, involving actively students which create a special undergraduate experience to reinforce concepts through experimental modeling research.

Keywords: physical models; steel structures; active learning; steel connections; extra-academic work

1. Introducción

La simulación de estados límite en el entendimiento del diseño de estructuras metálicas, es de principal importancia para el correcto uso de las ecuaciones que describen dichos comportamientos límite. Existen métodos matemáticos como los elementos finitos, o de manera física ensayos hechos basados en fotoelasticidad que han permitido entender la concentración de esfuerzos en platinas pernadas de conexión en uniones viga-columna de acero (de Lima, Freire, Vellasco, Andrade, & Silva, 2009). Pero más importante que conocer las ecuaciones que describen dichos fenómenos, es el entendimiento de los límites que gobiernan el comportamiento entre zonas elásticas e inelásticas. En el caso de vigas, existen algunos ensayos a escala real, (Shokouhian & Shi, 2015) donde se han logrado generar estados de falla generalmente plásticos, donde alguno de los dos (o los dos) elementos que forman el elemento estructural entra en estados de esfuerzos superiores al esfuerzo de fluencia del material (F_y). La importancia de estos ensayos es poder observar como estos elementos estructurales pierden capacidad, mostrando las zonas en donde se pierde estabilidad de manera local. Pero más interesante que los fenómenos de falla inelástica y/o fractura, son los fenómenos de falla elástica, en donde el elemento estructural pierde parcialmente la capacidad de sostener carga, debido a una combinación crítica de longitudes no soportadas en regiones del elemento estructural que debido a las cargas externas, entran en compresión.

De esta manera se tienen fenómenos como el pandeo torsional lateral en elementos en flexión, o pandeo local y global en elementos en compresión, los cuales hacen que una sección transversal tenga menor capacidad de lo esperado. De esta manera, los códigos de diseño estructural piden al diseñador estructural, identificar esta longitud no soportada para poder tener en cuenta hasta que geometría la capacidad de carga se puede ver comprometida y perderse de manera logarítmica.

2. Materiales y Metodología

Para la elaboración de las probetas de ensayo, se utilizó cartón paja y como elemento de unión de las láminas que simulaban los cortes de acero estructural, se utilizó pegante blanco de aplicaciones generales. El detallado estructural se logró gracias a la comunicación que existe entre el programa AutoCAD y las cortadoras laser. De tal manera, la geometría teórica de estos elementos tiene un muy bajo margen de variación.

Los estudiantes involucrados ensayaron alrededor de 20 modelos de tres diferentes tipos de longitudes (30cm, 20cm, 10cm) en cargas de flexión, 20 modelos cada altura para elementos que funcionaron como columnas (15cm, 10cm, 20cm), y 10 modelos de 4 tipos diferentes de geometrías de conexiones (un perno, dos pernos, cuatro pernos y seis pernos que en todos los casos mantenían la misma área de resistencia en cortante). En todos los casos, la maquina utilizada fue una INSTRON 3369, que permitió controlar la carga por desplazamientos (3mm/min), ya que no se podía determinar el control de carga por esfuerzos u otro tipo de medida. La velocidad de carga se utilizó exactamente el doble que la velocidad reportada como velocidad de trabajo promedio en los ensayos realizados por (Bjorhovde & Hardash, 1984). Sin embargo, debido a que el material es desde todo punto

de vista diferente, la velocidad disminuyó el tiempo de ensayo de manera sustancial. Sin embargo, para las columnas, esta velocidad se disminuyó a la mitad, para poder tomar fotografías y registros de video de las fallas, ya que el ensayo terminaba de manera muy rápida.

Para las vigas de 30cm y 20cm, se logró aplicar carga utilizando cuatro puntos de aplicación, generando una zona de momento teórico puro en el centro de la luz. Sin embargo, para las vigas de 10cm fue imposible por su pequeña luz, aplicar carga de esta manera y se optó por carga central a tres puntos. Para las conexiones, la velocidad de desplazamiento de la cabeza de aplicación de carga también fue de 3mm/min. En todos los casos, la falla se obtuvo bien por separación en el caso de las conexiones o aplastamiento en el caso de las columnas, o por excesiva deflexión en el caso de las vigas y de algunas columnas que estaban gobernadas por efectos de elasticidad y pandeo.

En los tres casos, las geometrías de falla son registradas, las máximas cargas determinadas de las curvas "Carga vs Desplazamiento" y en el caso de los especímenes de conexiones, se analiza el lugar de ocurrencia de falla, y la presencia de comportamientos no elásticos como ovalamiento y avance de fisuras. Los resultados se discuten y son comparados con referentes de fallas estructurales contraladas en laboratorios a nivel mundial y luego se indican conclusiones respecto de la capacidad del material de modelar fallas y comportamiento de pandeo.

3. Montaje Experimental

Para el montaje experimental de falla se utilizaron los aditamentos propios de INSTRON 3369, para flexión a tres y a cuatro puntos, así como para compresión. Sin embargo para las conexiones, se mandaron hacer sistemas de anclaje especialmente diseñados para este trabajo, con diferentes diámetros de pernos (Ver Figura 1). Sin embargo, el área en cortante corresponde a una constante de 314.16mm², por lo que el esfuerzo teórico en cortante se mantuvo constante con 1 perno de 20mm de diámetro, dos pernos de 14.1mm de diámetro, cuatro pernos de 10mm de diámetro y seis pernos de 8.17mm de diámetro. Las platinas de unión con área de cortante constante se muestran en la Figura 1.

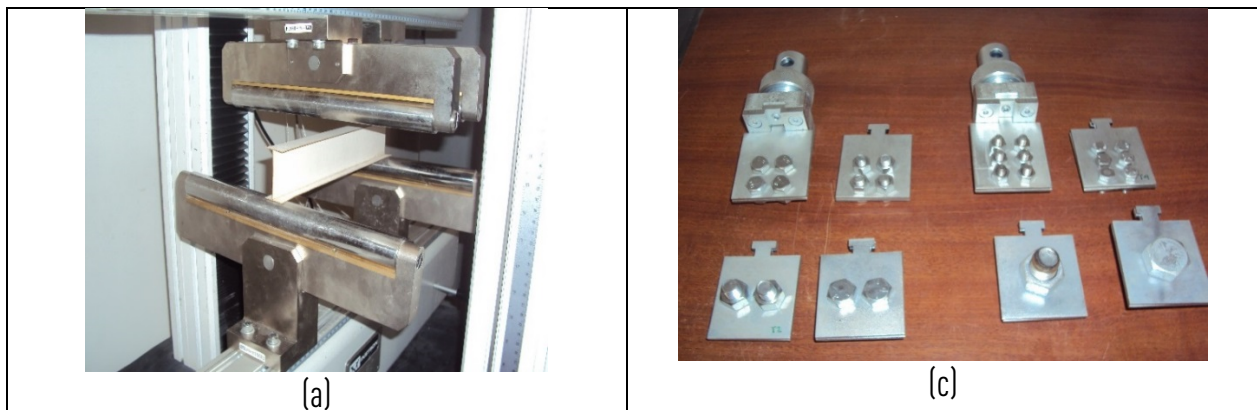




Figura 1. a) Montaje a cuatro puntos para elementos en flexión, b) Montaje para compresión, c) Sistema de conexiones con área constante 314.16mm^2 para mantener el esfuerzo de cortante similar en los modelos de papel que simulan las conexiones, d) Modelo de elementos conectados en tensión para dos pernos de 14.1mm de diámetro.

4. Resultados

Los resultados de la investigación consisten en el registro de las fallas y su comparación con referentes de ensayos en elementos de acero. Las gráficas de “Carga vs. Desplazamiento”, contienen también información importante que vale la pena estudiar, ya que dichas gráficas contienen información similar al comportamiento de los elementos estructurales que simulan los elementos de cartón del presente trabajo.

4.1 Fallas en Elementos Sometidos a Flexión.

En la Figura 2 se muestran el daño por capacidad plástica de la sección transversal, que lleva a una falla por pandeo de la aleta superior en el centro de la luz. En dicha figura se muestra un ensayo hecho en laboratorio por (Shokouhian & Shi, 2015) a una viga de acero en escala real hecha de acero con $E=206.8\text{GPa}$ y un $F_y= 545.1\text{MPa}$ y se muestra también el daño correspondiente modelado con las secciones transversales de vigas de cartón paja de 10cm de luz. (Ver Figura 2b) Las deformaciones en flexión para elementos de mayor longitud, están acompañadas del fenómeno de pandeo lateral torsional; una vez la carga era retirada, no era permanentes. En el caso de vigas con menor luz, las cargas generaban deformaciones permanentes, debido a la que el material podía llegar a la capacidad máxima para la sección transversal elegida.

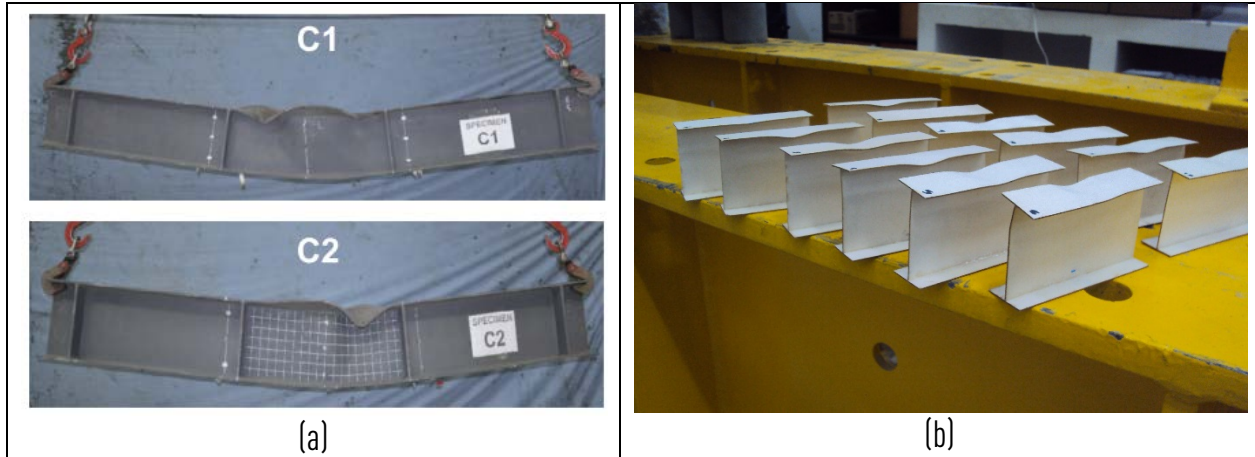
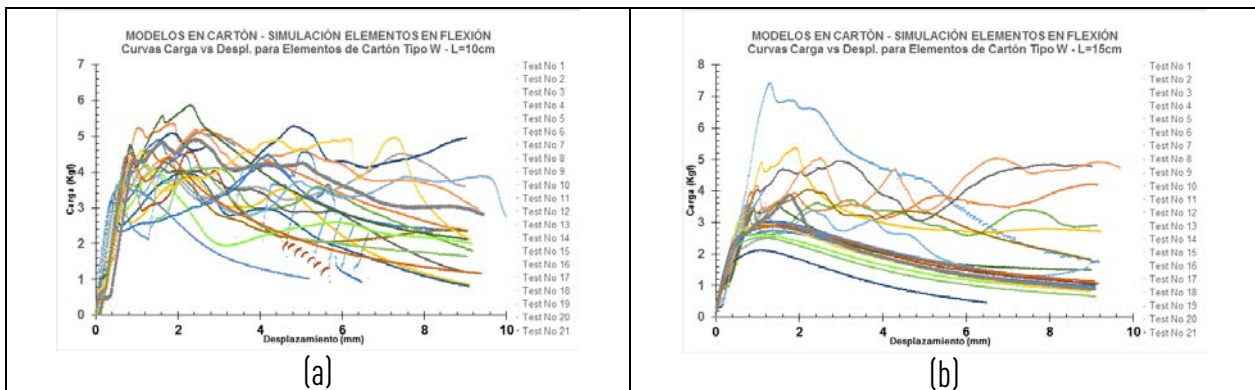


Figura 2. Fallas típicas en elementos sometidos a flexión, a) Pandeo local de aleta debido a gran concentración de momento en el centro de la luz en especímenes C1 y C2 de acuerdo con (Shokouhian & Shi, 2015), b) plastificación de modelos de cartón paja en la aleta superior.

Los modelos fueron capaces de mostrar, el fenómeno del pandeo lateral torsional (LTB), acompañado de la carga remanente y/o capacidad post-pandeo de secciones transversales que por su geometría podrían perder capacidad por efectos geométricos. Es así que en la Figura 3, se muestra la evolución de este fenómeno, partiendo de capacidades altas y comportamientos plásticos erráticos que dependen solo de la sección transversal y del material Figura 3a) y Figura 3b), así como un comportamiento más similar entre ensayos, debido principalmente a que a mayor luz libre de ensayo, menor capacidad plástica se demanda de la sección transversal (el comportamiento es más elástico).

En la Figura 4 se observa de manera general los cuatro fenómenos mecánicos que gobiernan a las vigas: i) Inelasticidad primaria, ii) Elasticidad Principal, iii) Inelasticidad, iv) Capacidad remanente post pandeo. La Figura 4d) muestra el comportamiento de falla inelástica por pandeo del alma de la sección transversal. El pegante utilizado entre láminas de cartón paja funcionó perfectamente como lo hace la soldadura en elementos de acero, para poder dar continuidad a la transmisión de esfuerzos de cortante y de tensión local entre las aletas, a través del alma de la sección transversal.



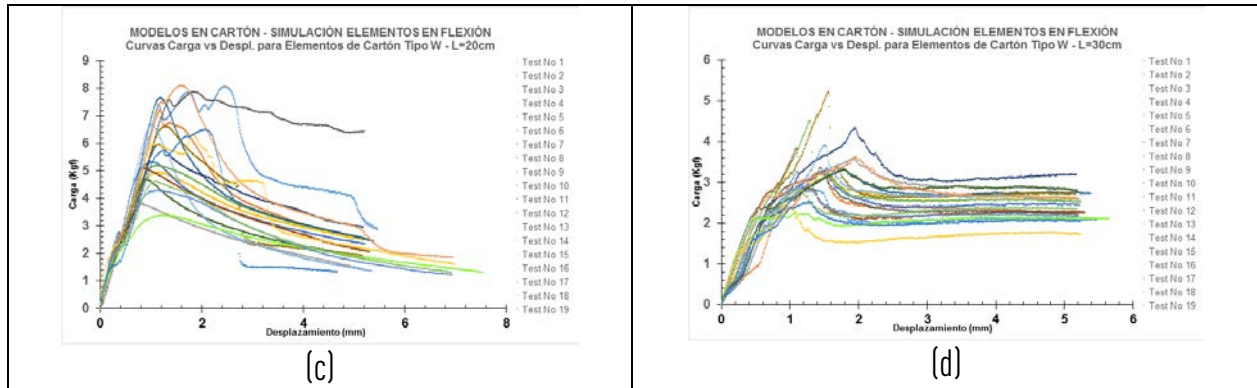


Figura 3. Comportamiento de los 20 ensayos por tipo de luz ensayados en laboratorio y comportamiento Carga vs. Desplazamiento, para elementos sometidos a flexión hechos en cartón paja. a) Vigas de 10cm de luz, b) Vigas de 15cm de luz, c) Vigas de 20cm de luz y d) Vigas de 30cm de luz.

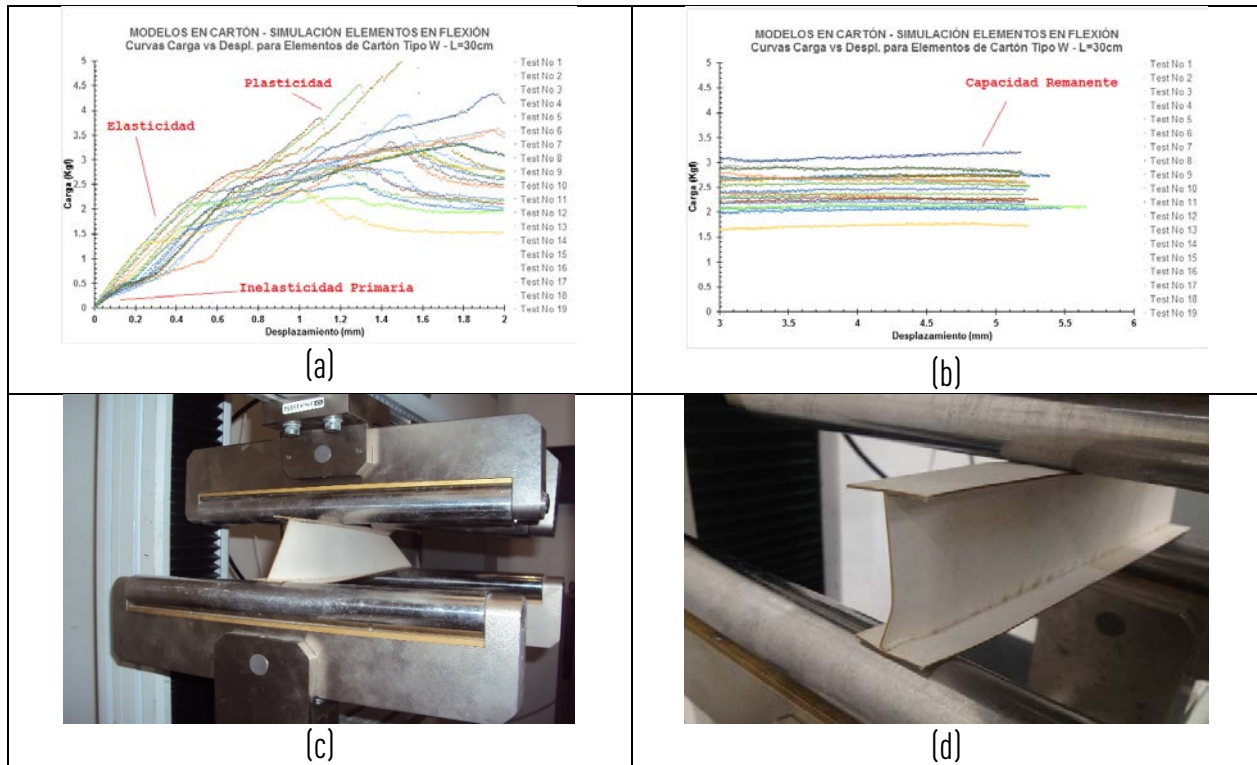


Figura 4. Tipologías de información resultante de ensayos de modelos en cartón paja sometidos a flexión. a) Detalle de las zonas de comportamiento mecánico (zonas de elasticidad), b) detalle de la carga remanente después de presentarse el fenómeno de LTB, c) fenómeno de LTB en elementos de 30cm de longitud, d) fenómenos de plasticidad en elementos de 20cm de longitud.

4.2 Fallas en elementos sometidos a Compresión

Los elementos en compresión mostraron la formación de las zonas de inestabilidad local, debido a que la sección transversal no es compacta (la geometría de alma y aleta es muy esbelta), y después el modelo del miembro estructural muestra como función del tiempo la formación de la zona de plastificación y posterior falla. En la

Figura 5 se puede observar la evolución de uno de los ensayos en columnas de 30cm de altura, en comparación con un ensayo a escala real, hecho en acero austenítico laminado en caliente con un esfuerzo de fluencia $F_y=282\text{MPa}$. En dicho ensayo de escala real, la falla ocurre por pandeo de la aleta en compresión (Yang, Zhao, Chan, Shang, & Xu, 2016), de la misma manera que se observa para el tiempo de ensayo $T=16\text{seg}$.

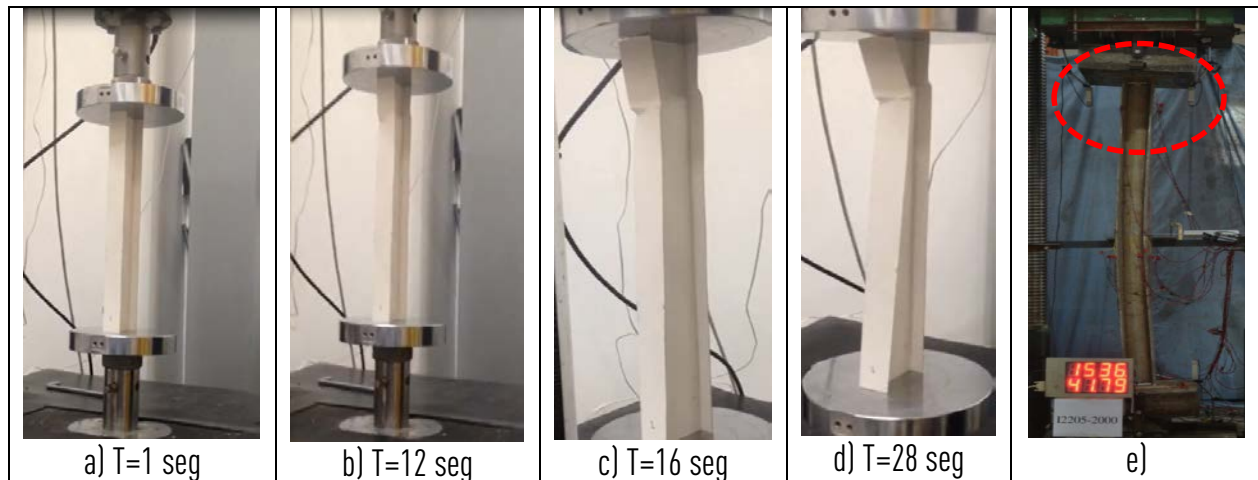


Figura 5. Fallas típica de elementos en cartón paja sometidos a compresión simulando inestabilidades locales. a) Inicio del ensayo, b) Inicio de inestabilidad local, c) Plastificación del alma, d) Falla total, e) Ensayos en columnas a escala real tomado de (Yang et al., 2016).

4.3 Fallas en elementos conexiones a tensión

Las fallas observadas en los elementos que modelaron zonas de conexión apernadas en tensión, mostraron de manera recurrente fallas perpendiculares al eje de acción del campo de tensiones. La fractura comenzó bien en la perforación o bien en el borde exterior, pero al final terminó en la separación del elemento estructural a través de los pernos, siguiendo la teoría de falla de Whitmore, y coincidiendo con los resultados reportados por (Bjorhovde & Hardash, 1984) y que sirvieron como la base de la teoría de capacidad de elementos perforados a tensión por bloque de cortante. En todos los ensayos con probetas donde existía más de una fila de pernos, la falla siempre ocurrió en la última fila de pernos (ver Figura 6 a, b, c y d), en una combinación de Ovalamiento más avance de cabeza de fisura, justo como ha sido reportado en dicha referencia. En la Figura 6f, se puede observar la falla típica reportada por Bjorhovde en los ensayos de platinas de conexión hechas en acero. Como se puede observar, la falla ha sido perfectamente modelada por los elementos de cartón paja, en donde la fractura también ocurre en la última fila de pernos de unión.

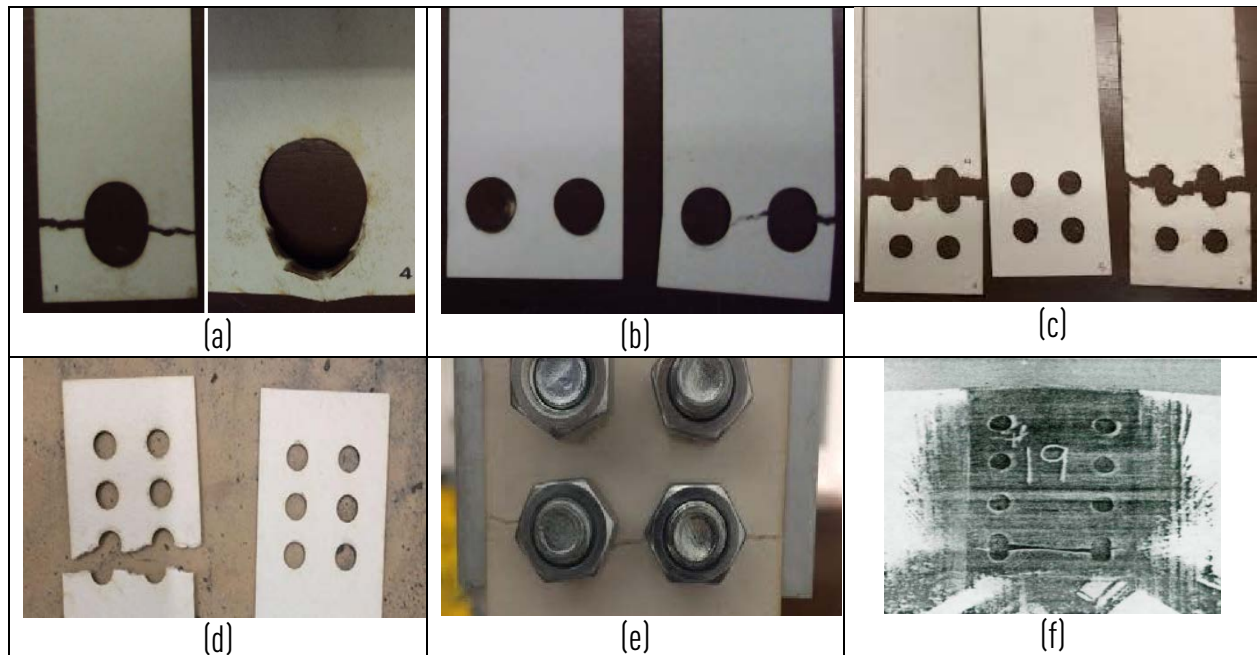


Figura 6. Fallas en conexiones en tensión. a) Falla en conexión 1 perno y ovalamiento, b) falla en conexión 2 pernos, c) falla en conexión 4 pernos, d) falla en conexión 6 pernos, e) Avance de cabeza de fractura entre pernos perpendicular a la dirección de carga, f) Fractura reportada en acero A283 Grado A, en tensión (Bjorhovde & Hardash, 1984).

5. Discusión y Conclusiones

Los modelos que se ensayaron en cartón paja, simularon de manera acertada fenómenos elásticos, inelásticos y avances de cabezas de fractura comparando los resultados con ensayos hechos en elementos a escala real en diferentes universidades del mundo, especialmente los resultados en platinas de unión reportados por (Bjorhovde & Hardash, 1984). La participación de estudiantes de varios semestres hizo que el proyecto fuera desde todo punto de vista enriquecedor para su aprendizaje, ya que lograron ver los fenómenos que dictaron las ecuaciones de diseño de elementos de estructura metálica. Esto se logró al observar la manera en la que los modelos de cartón paja fallaban de manera similar al acero sometido bien a flexión, compresión o tensión en elementos pernados.

6. Referencias

- Bjorhovde, R., & Hardash, S. (1984). *Gusset Plate Design Utilizing Block-Shear Concepts*. Tucson, Arizona. Retrieved from <https://www.aisc.org/WorkArea/showcontent.aspx?id=35282>
- de Lima, L. R. O., Freire, J. L. de F., Vellasco, P. C. G. da S., Andrade, S. A. L. de, & Silva, J. G. S. da. (2009). Structural assessment of minor axis steel joints using photoelasticity and finite elements. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(2), 466–478. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.030>
- Shokouhian, M., & Shi, Y. (2015). Flexural strength of hybrid steel I-beams based on slenderness.

Engineering Structures, 93, 114–128. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.029>

- Yang, L., Zhao, M., Chan, T.-M., Shang, F., & Xu, D. (2016). Flexural buckling of welded austenitic and duplex stainless steel I-section columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 122, 339–353. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.04.007>

Sobre los Autores

- **Maria Camila González Rincón:** Estudiante de Ingeniería Civil, VIII semestre énfasis en estructuras. mgonzalez_r@javeriana.edu.co
- **Mauricio Alexander Mariño Salamanca:** Estudiante de Ingeniería Civil. V semestre. marino.m@javeriana.edu.co
- **Jeisson Dubier Hurtado Tinoco:** Ingeniero Civil. Ingeniero de Calidad en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos Pontificia Universidad Javeriana. dubier.hurtado@javeriana.edu.co
- **Federico Alejandro Núñez Moreno:** Ingeniero Civil. Master of Structural Engineering (MSE). Doctorado en Ingeniería Civil del Illinois Institute of Technology. Profesor Asistente Pontificia Universidad Javeriana. fnunez@javeriana.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2016 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)