

MODELACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO DE UNIONES ATORNILLADAS EN ANGULARES DE ACERO CONFORMADOS EN FRÍO BAJO CARGAS DE TRACCIÓN

NUMERICAL MODELING OF THE BEHAVIOR OF BOLTED CONNECTION IN ANGULAR PROFILES OF COLD CONFORMED STEEL UNDER TRACTION LOAD

Autores: Evelyn Pérez Jeréz ¹

Rigoberto Antonio Pérez Reyes ²

Jorge Douglas Bonilla Rocha ²

Institución: ¹ Empresa de Construcción y Montaje de Ciego de Ávila, Cuba

² Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Cuba

Correo electrónico: rigoberto@unica.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio del comportamiento de las uniones atornilladas en angulares de acero conformados en frío bajo cargas de tracción, mediante la modelación numérica. Los modelos desarrollados están basados en ensayos experimentales llevados a cabo por de Paula (2006), teniendo como objetivo la obtención de la influencia del efecto que ejerce la distancia del borde del perfil hasta el primer tornillo en la dirección de la sollicitación sobre la carga de ruptura de la sección neta en perfiles con dos o más tornillos por sección. Para el estudio de dichos elementos estructurales se utilizó la herramienta computacional ABAQUS/CAE (versión 6.14-5) ejemplificando la modelación de la geometría, las condiciones de borde y todo el proceso de calibración y validación. Los principales resultados muestran una simulación numérica que reproduce adecuadamente el comportamiento realista de la unión atornillada, los valores de distancias mínimas están en contradicción con lo especificado en las principales normas internacionales y la eficiencia de la unión (capacidad de carga) se incrementa al emplear una fila de conectores en lugar de dos, manteniendo constante el área de los tornillos expuesta al cortante.

Palabras clave: Uniones atornilladas, Modelación numérica, Acero conformado en frío.

ABSTRACT

In the present work a study of the behavior of the bolted connection in cold formed steel angles under tensile loads is made, through numerical modeling. The developed models are based on experimental tests carried out by de Paula (2006), with the objective of obtaining the influence of the effect exerted by the distance to the edge of the profile up to the first connector in the direction of the solicitation on the breaking load of the net section in profiles with two or more connector per section. For the study of these structural elements, the computational tool ABAQUS/CAE (version 6.14.5) was used, exemplifying the modeling of the geometry, the edge conditions and the entire calibration and validation process. The main results show a numerical simulation that adequately reproduces the realistic behavior of the bolted connection; the values of minimum distances are in contradiction with what is specified in the main international standards; and the efficiency of the union (load capacity) is increased by using one row of connectors instead of two, keeping the area of the connector exposed to the shear constant.

Keywords: Bolted connection, Numerical modeling, Cold-formed steel.

INTRODUCCIÓN

Las construcciones metálicas ofrecen la posibilidad de trabajar con perfiles de gran variedad de dimensiones, formas y aplicaciones dependiendo del método de obtención, poseen como características un bajo peso propio y la facilidad de ser producidos económicamente con secciones transversales poco usuales, lo cual ha permitido emplearlos tanto en aplicaciones importantes desde el punto de vista estructural, como en elementos estructurales de pequeño y mediano porte (Mac Donald y Kulatunga, 2013; Lee et al., 2014; Ding, 2015).

Estas estructuras son unidas entre sí a través de tornillos que permiten mayor facilidad en el montaje y desmontaje y pueden ser utilizadas en cualquier ambiente constructivo, ya sea urbano o rural, pues no necesita una fuente de energía como la soldadura y además, poseen un mejor comportamiento bajo cargas cíclicas. Por tal motivo se hace necesario entender adecuadamente el comportamiento de las uniones atornilladas haciendo énfasis en los perfiles conformados en frío, los cuales muestran hoy en día un aumento gradual del consumo per cápita de acero en las construcciones.

El uso de acero de alta resistencia es importante pues este tipo de material posee composición química y ductilidad diferente al resto de los aceros de construcción y ha tenido un amplio uso en los últimos años, por lo que se torna importante el estudio del comportamiento de las uniones atornilladas en perfiles conformados en frío con este material, desde el punto de vista del efecto sobre la resistencia y la excentricidad (Bjorhovde, 2004).

El resultado de las investigaciones indican que los cuatro tipos principales de modos de falla que pueden ocurrir en estos tipos de uniones en chapas y perfiles son los siguientes (Konkong, 2017):

- Desgarramiento de la sección entre agujeros y entre los agujeros y el borde (ver figura 1.a).
- Aplastamiento de la chapa junto con el tornillo (ver figura 1.b).
- Ruptura de la sección neta (ver figura 1.c).
- Cizallamiento o cortadura del tornillo (ver figura 1.d).

Además, de estos cuatro tipos de fallas, en perfiles de chapas finas puede ocurrir la ruptura por desgarramiento de la parte conectada, también llamada bloque cortante o de cizallamiento del bloque (*block shear*), tal como se representa en la figura 2.

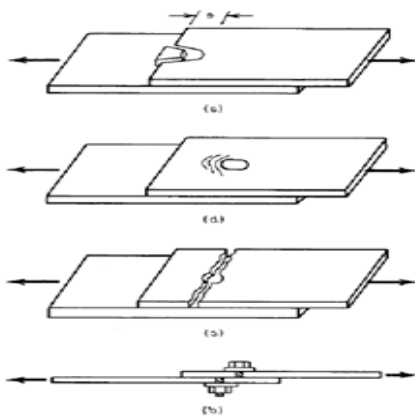


Figura 1. – Modos de fallas típicas en uniones atornilladas en chapas de acero conformadas en frío (Konkong, 2017).

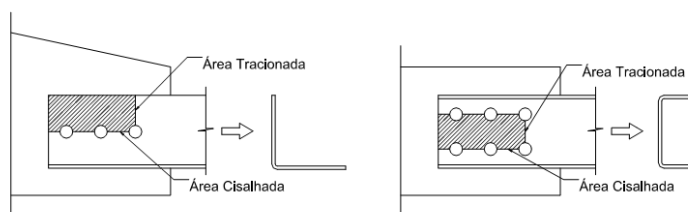


Figura 2. – Ruptura por bloque cortante en angulares y en perfiles U (Yu, 2000).

Un análisis bibliográfico detallado revela que existen pocas investigaciones realizadas que estudien el tema del comportamiento de las uniones atornilladas en perfiles conformados en frío, según Post (2012), Rautenbach (2016) y Mesquita (2016), algunos fenómenos que influyen directamente en los resultados de las resistencias a diferentes esfuerzos de estas conexiones todavía no son completamente conocidos y formulados matemáticamente. Uno de estos fenómenos se refiere al efecto que ejerce la distancia al borde del perfil hasta el primer tornillo en dirección de la sollicitación sobre la carga de ruptura. Las primeras investigaciones en este sentido fueron realizadas en la década del 90 por La Boube y Yu (1995), analizando la ruptura de 27 angulares y tomando de referencia para los ensayos la norma americana para perfiles conformados en frío (*American Institute of Steel Construction. AISC*).

El presente trabajo parte de la necesidad estudiar el comportamiento de uniones atornilladas en angulares de acero conformadas en frío como problema actual que se presenta en la evaluación de una adecuada utilización de estos perfiles bajo determinadas condiciones de explotación. Este aspecto es de gran interés para la investigación científica ya que no existen relatos de la verificación de las ecuaciones prescritas para la obtención de la resistencia de la sección neta en la unión. El objetivo general que se persigue es estudiar el comportamiento estructural de uniones atornilladas en angulares de acero conformados en frío bajo carga de tracción, a través de la modelación numérica para la obtención del efecto que ejerce la distancia del borde del perfil hasta el primer tornillo en la dirección de la sollicitación sobre la carga de ruptura de la sección neta en perfiles con dos o más tornillos por sección.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para modelar el comportamiento tenso-deformacional del acero se tuvo en cuenta los trabajos de Yip y Cheng (2000); Maiola (2004); de Paula (2006); Pirmoz et al. (2008); Díaz (2010); Boladin et al. (2013); Konkong (2017) sobre el desempeño estructural de las uniones atornilladas cuando los elementos estructurales son sometidos a esfuerzos de tracción, con la consideración de las no linealidades

físicas y geométricas (grandes deformaciones). La modelación de los perfiles seleccionados (ver Tabla 1) se realiza mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) con criterio de rotura de Von Mises. Para aplicar este comportamiento se utiliza el comando *PLASTIC del código ABAQUS.

Núm. Ensayo	Perfil	bc (mm)	bd (mm)	t (mm)	Lperfil (mm)	d (mm)	A (mm)	An (mm)	x (mm)	L (mm)
1	A111	50	50	2.25	598	12.7	216.68	184.73	13.54	0.00
2	A121	50	50	2.23	598	12.7	214.83	183.16	13.53	38.10

Tabla 1- Características geométricas de los perfiles objetos de estudio.

Se decide adoptar la modelación tridimensional de la probeta (3D), gracias a las bondades en cuanto a representación geométrica que brinda ABAQUS/CAE, siendo consecuente con la configuración de la probeta en el ensayo experimental.

El modelo constitutivo desarrollado está compuesto por un perfil de acero conformado en frío, una placa de acero y un tornillo de media pulgada ($\frac{1}{2}$ " de diámetro. En el análisis se considera el perfil como un material elasto-plástico y la placa y el tornillo como un material elástico. Cada uno de estos cuerpos es construido en el módulo *Part*, donde se le da la configuración a cada uno por separado. Luego de recibir las propiedades mecánicas cada una de las partes o cuerpos se ensamblan en el módulo *Assembly* conformándose la probeta a modelar. Dado la experiencia en otras investigaciones en cuanto al costo computacional que produce simular en ABAQUS la totalidad de la probeta, se decide aplicar la simplificación por simetría, modelándose solo la mitad de la geometría de la probeta. Esta facilidad ha sido empleada en varias investigaciones, teniendo los trabajos de Bonilla et al. (2012); Bolandin et al. (2013); Martínez et al. (2015); Sánchez et al. (2016); Konkong et al. (2017) entre los más relevantes.

Tornillo: Estructura de acero, construida por dos cilindros de diferentes diámetros representando el vástago y la cabeza. Es el encargado de transmitir los esfuerzos del perfil a la placa. En el mismo existen tres superficie de interacción, una garantizando la unión tornillo-perfil, otra la unión tornillo-placa y otra referente al contacto ente la cabeza del tornillo y el perfil. La unión tornillo-placa es tratada como una unión rígida tipo *Tie*, pues en la probeta real esta se logra mediante un apriete con tuerca en todo el perímetro que circunda la base del tornillo. La interface tornillo-perfil fue tratada

como una interacción superficie a superficie (*surface to surface*), pues se sabe que en la realidad no hay una continuidad total entre los dos materiales, pero sí una importante fuerza de fricción en zonas de la superficie de contacto entre los dos elementos, debido a los elevados esfuerzos normales que se originan durante el apriete, sobre todo en vecindades de la base de la cabeza del tornillo.

Placa de acero: A la placa se le asignan las condiciones de contacto o interacciones entre las partes que conforman el elemento o probeta a simular, así como para general un correcto mallado. En la zona donde existen contacto entre la placa y el perfil se supone que exista solo contacto o esfuerzo normal porque en el modelo experimental no se considera fuerza de rozamiento o contacto tangencial.

Perfil L: Estructura de acero conformado en frío en forma de L con alas iguales. Aquí es donde aparecen los vínculos a tierras o apoyos. Teniendo en cuenta la simplificación por geometría aplicada al modelo experimental se considera para la mitad de la probeta a modelar un apoyo articulado, restringiéndose los desplazamientos en los ejes X e Y, y permitiendo el desplazamiento en Z como se observa en la Figura 3.

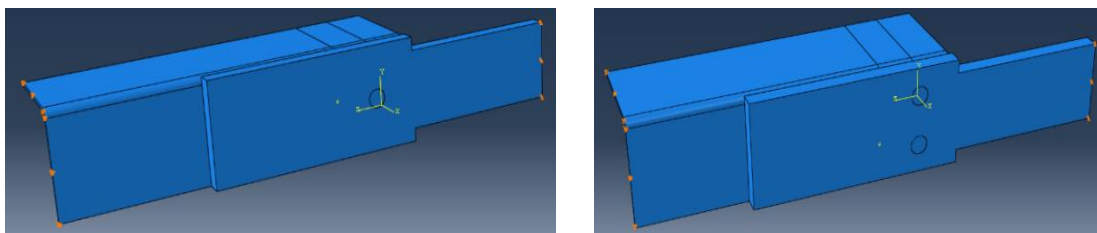


Figura 3. Condiciones de apoyo.

La carga es aplicada de forma distribuida en un área al centro de la placa para evitar altas concentraciones de tensiones en la zona de aplicación de la carga e intentando simular el experimento real. Los incrementos de carga son aplicados a pequeños intervalos, donde el tamaño de estos es seleccionado automáticamente por el programa basado en las condiciones de convergencia numérica. En este caso, la carga inicial es aplicada utilizando el algoritmo *Static General* modificado y la carga última en *Static Riks* modificado. La base de dicho algoritmo es el método de Newton y es generalmente utilizado para predecir la inestabilidad no lineal y el colapso de una estructura. Se analizan tres densidades de malla diferentes en cada una de las partes o elementos que constituyen el modelo (tornillo, placa y angular).

En el tornillo se realiza una discretización de la malla constante, no así para la placa y el perfil, en los cuales se densificó la malla hacia la zona de contacto con los tornillos ya que este es el lugar de mayor concentración de tensiones y por tanto mayor interés de estudio (ver figuras 4 y 5).

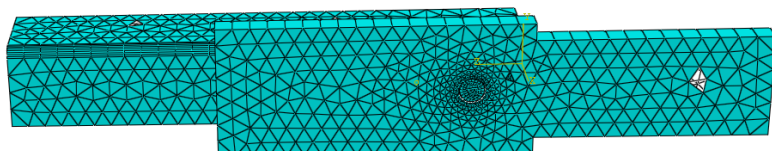


Figura 4 - Modelo discretizado del perfil A111.

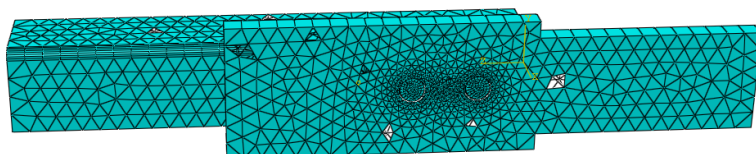


Figura 5 - Modelo discretizado del perfil A121.

Para validar el modelo numérico con los resultados experimentales obtenidos por de Paula (2006) se realizan dos corridas numéricas con diferentes perfiles como se representa en la Tabla 2. Durante el proceso se ajusta la densidad de malla óptima y se tiene en cuenta las iteraciones entre las superficies de contacto en los elementos placa, tornillo y perfil.

No	Perfil	Ensayo experimental		Modelo numérico	
		P última (kN)	Falla	P última (kN)	Error (%)
1	A111	38,27	Deformación	34,42	4,83
2	A121	54,83	Rot. Secc. Neta.	53,04	3,30

Tabla 2 -Resultados de la validación del modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de la unión atornillada sometida a tracción.

En la figura 6 se observa el comportamiento de los modelos validados en cuanto a la relación entre la carga última y la distancia al borde. En la misma se aprecia que la

probeta A121 posee una mayor capacidad de carga al tener dos tornillos en línea, lo cual coincide con los estudios de Paula (2006) y corrobora los criterios de otros investigadores y la mayoría de las normativas y reglamentaciones internacionales.

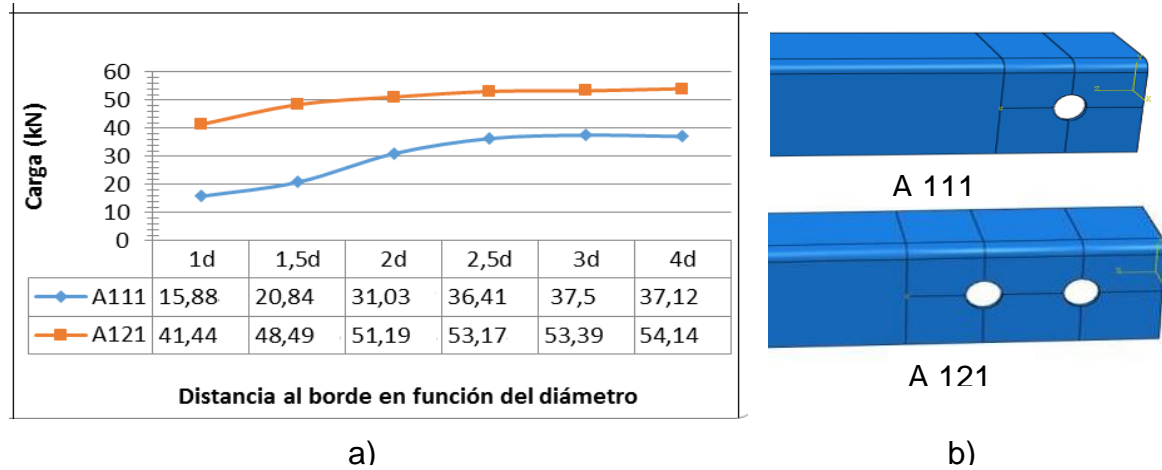


Figura 6) – a) Gráfico carga - distancia al borde de los modelos validados.
 b) Perfiles A111 y A121 utilizados en la validación del modelo.

El resultado de las corridas numéricas correspondientes al estudio paramétrico con diferentes distancias al borde, en función del diámetro del tornillo, con valores de una vez el diámetro (1d) hasta cuatro veces el diámetro (4d) se aprecia en las figuras 7 y 8. En este caso se aprecia un comportamiento desfavorable del perfil modificado transversalmente para valores de distancia al borde entre 1,5 y 3 veces el diámetro, mostrando menor capacidad de carga resistente última en igualdad de condiciones.

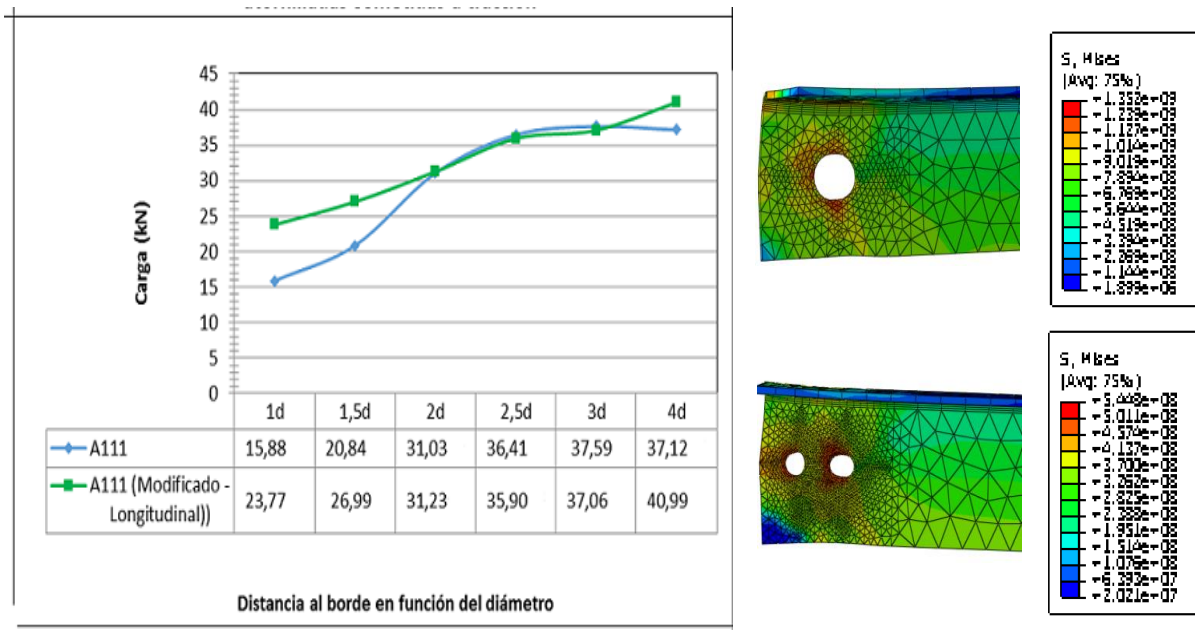


Figura 7- Gráfico carga - distancia al borde y diagrama de distribución de las tensiones para perfil A111 y el modificado longitudinalmente.

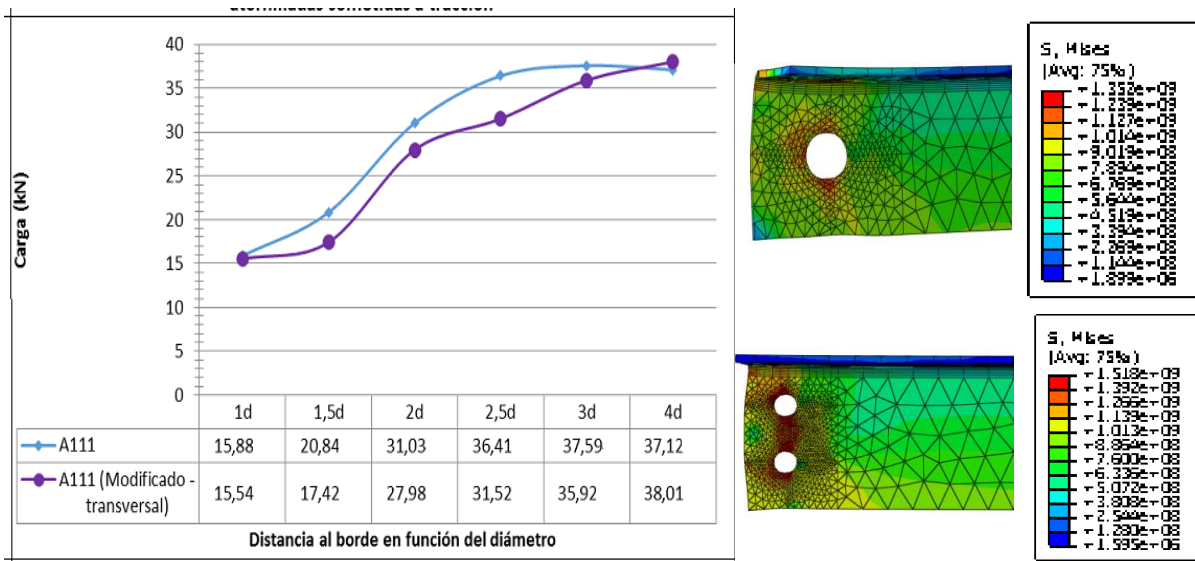


Figura 8 - Gráfico carga - distancia al borde y diagrama de distribución de las tensiones para perfil A111 y el modificado transversalmente.

Una comparación de los tres perfiles se muestra en la figura 9, donde, además, se ilustran las líneas verticales que definen la distancia al borde mínima, según normativas internacionales y el resultado del modelo numérico. Aquí es de destacar que con relación a la distancia al borde se alcanza un valor óptimo cuando esta magnitud es igual a dos veces y media el diámetro del tornillo ($\delta=2,5d$), valor a partir del cual no se observa una variación importante en los valores de la carga resistente

última. Para valores menores a $2,5d$ las magnitudes de carga disminuyen considerablemente a medida que esta distancia se hace menor. Este fenómeno se refleja igual en el resto de los estudios realizados que incluyen la variación en la distribución de los pernos, lo cual entra en contradicción con lo establecido en la mayoría de las normas internacionales que plantean como valores límites a $\delta=1,5d$ (inferior) y $\delta=3d$ (máximo). En los trabajos de Paula (2006) la normativa brasileña (NBR 14.762-2001) establece que esta distancia no debe ser menor de 1.5 veces el diámetro nominal del tornillo (d) y la norma americana (AISC), consultada en los trabajos de Bonilla et al. (2012), plantea valores específicos para cada diámetro de tornillo.

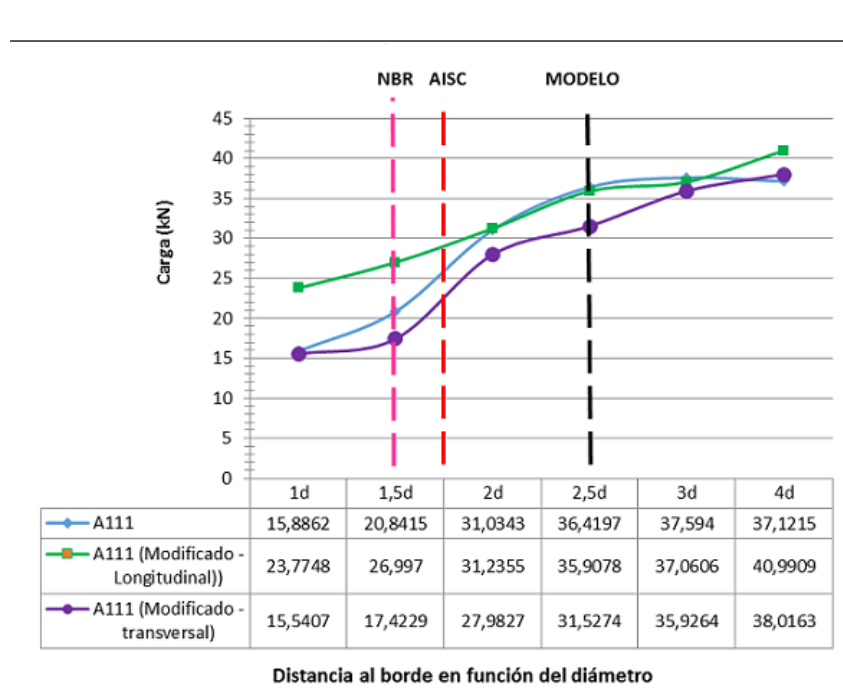


Figura 9- Gráfico carga - distancia al borde para el perfil A111 y los modificados longitudinal y transversalmente.

Comportamiento del modelo validado A121 con diferente distribución de pernos. Para este perfil la nueva distribución de pernos se logró sustituyendo los dos pernos de media pulgada ($\frac{1}{2}$ ") por cuatro de un cuarto de pulgada ($\frac{1}{4}$ ") colocados longitudinal y transversalmente (dos y dos) y otra distribución con uno de una pulgada.

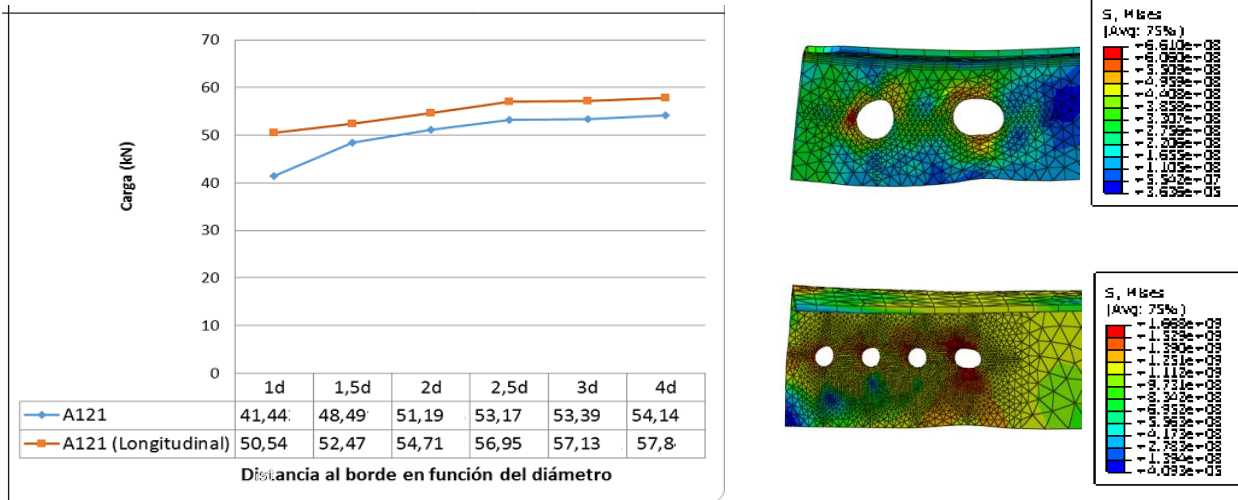


Figura 10- Gráfico carga - distancia al borde y diagrama de distribución de las tensiones para perfil A121 y el modificado longitudinalmente.

En la figura 10 se observa un mejor comportamiento del perfil modificado longitudinalmente en relación al modelo validado en cuanto a capacidad de carga, existiendo diferencias notables entre los valores de carga resistente última para valores pequeños de distancia al borde, menores a dos veces el diámetro. Aquí la distribución de las tensiones muestra una falla similar al bloque cortante.

En la figura 11, se ratifica un comportamiento desfavorable del perfil modificado transversalmente con relación al perfil original para todos los valores de distancia al borde, mostrando menor capacidad de carga límite, similar al análisis realizado con el perfil A111.

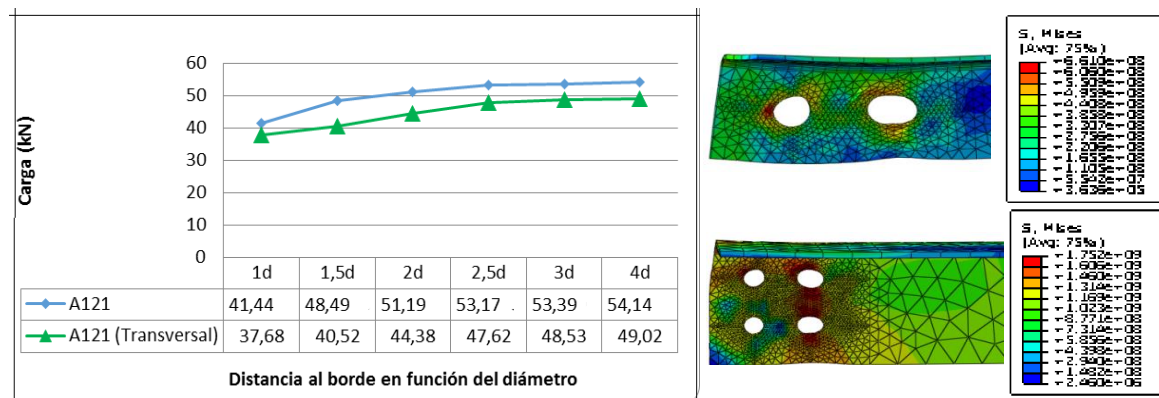


Figura 11- Gráfico carga - distancia al borde y distribución de las tensiones para perfil A121 y el modificado transversalmente.

La figura 12 representa el comportamiento más desfavorable del perfil modificado con relación al modelo original, corroborando lo obtenido en el análisis de las figuras 7 y 10 en relación a un mejor comportamiento de la unión con una distribución horizontal de dos tornillos con relación a una distribución de un solo tornillo, aún sin sufrir variación el área neta de los mismos.

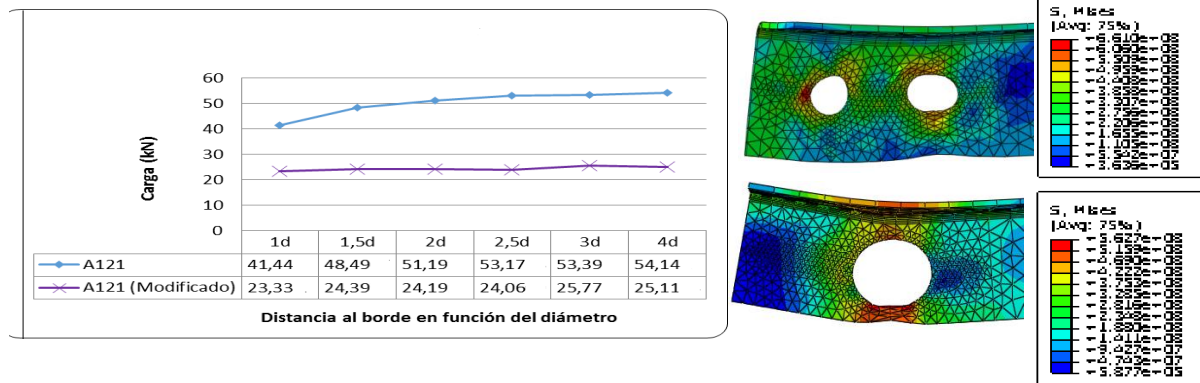


Figura 12 - Gráfico carga - distancia al borde y distribución de las tensiones para perfil A121 y el modificado

En la figura 13 aparece una comparación entre todos los modelos y se ilustran también las líneas verticales que definen la distancia al borde mínima, según normativas internacionales y el resultado del modelo numérico, alcanzando un valor óptimo cuando esta magnitud es igual a dos veces y media el diámetro del tornillo ($\delta=2,5d$) como mismo ocurre en la figura 7 con el análisis del perfil A111 y los modificados. En este caso, solo el perfil A121 modificado posee un comportamiento lineal para todas las distancias analizadas, pero con muy baja capacidad de carga, debido a las dimensiones del tornillo con relación al ala del perfil.

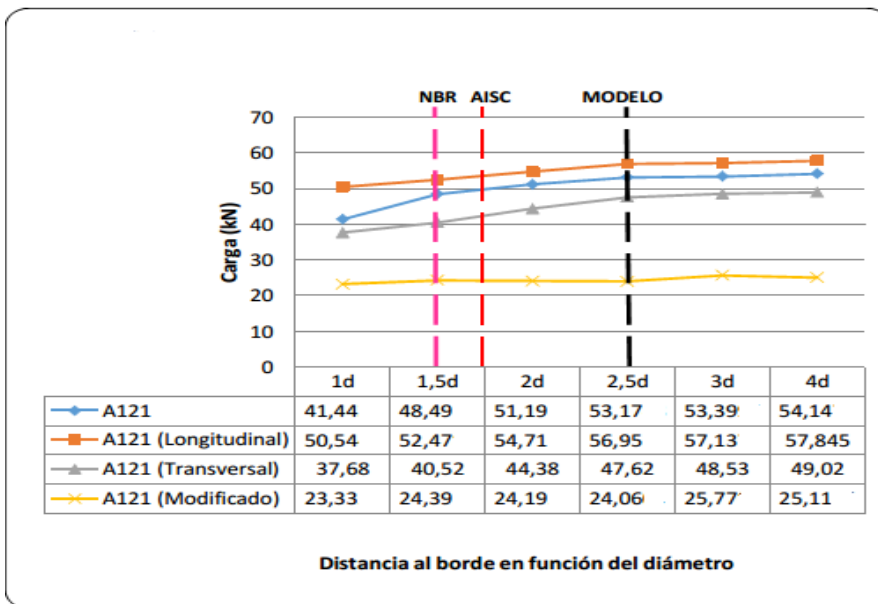
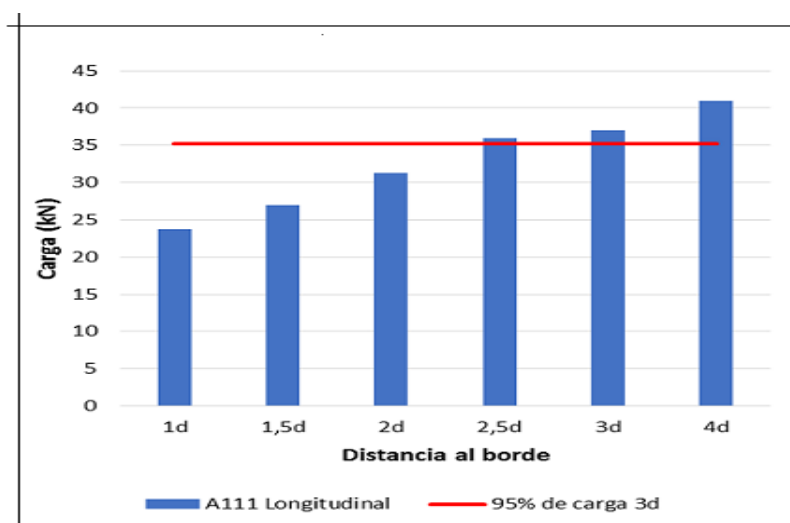


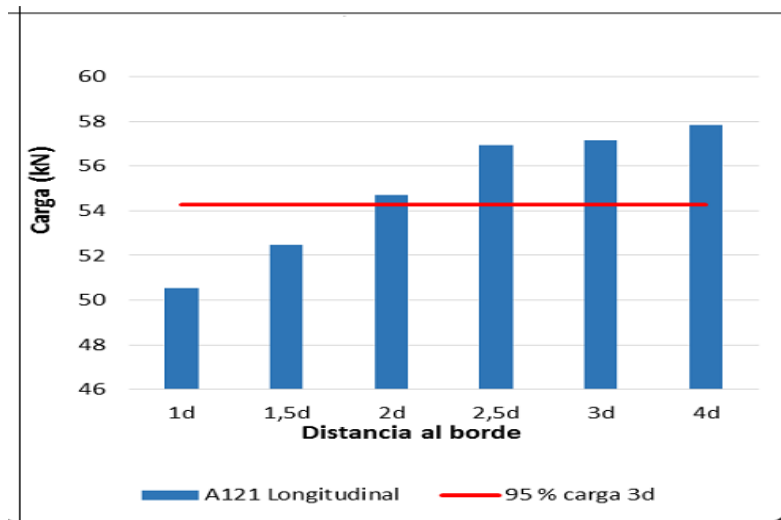
Figura 13 - Gráfico carga - distancia al borde para perfil A121 y los modificados.

Comportamiento de los modelos modificados con diferentes espesores de perfil.

Como se conoce, las normas indican como límite inferior de distancia al borde 1,5d para garantizar una adecuada capacidad de carga de la unión, y como límite superior 3d, pues a partir de esta magnitud el valor de la capacidad de carga no alcanza variaciones significativas. La figura 14 representa las distancias al borde mínimas para los perfiles A111 modificado longitudinal (dos tornillos por sección) y A121 modificado longitudinal (más de dos tornillos por sección) respectivamente, donde se observa que para el primer caso la distancia al borde mínima es de $\delta=2.5d$ y para el segundo es de $\delta=2d$.



Figuras 14. a) - Distancia al borde mínima para los perfiles A111



Figuras 14. b) - Distancia al borde mínima para los perfiles A121

CONCLUSIONES

La simulación numérica reproduce adecuadamente el comportamiento de la unión atornillada, en correspondencia con el ensayo físico, observándose errores inferiores al 5 % en todos los casos y apreciándose que la capacidad de carga de la unión depende de la distancia mínima al borde de los tornillos, la cual es variable y es función del diámetro de los mismos. En el modelo desarrollado se obtiene como distancia al borde óptima en perfiles con dos o más tornillos por sección la magnitud igual a $\delta=2.5d$, que garantiza que no haya disminución significativa de la capacidad resistente última de la unión, lo cual está en contradicción con lo especificado en la AISC-LRFD y otras normativas internacionales que toman este valor como 1.5d.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

ABAQUS: *User's Manual*, Versión 6.14.5, Hibbitt, Karlson and Sorensen, Inc., 2014.

American Institute of Steel Construction – AISC: *Load and resistance factor design specification for structural steel buildings*, Chicago, IL. 1999.

BALODIN, E.A.; BECK, A.T. Y MALITE, M.: «Bolted connections in cold-formed steel. Reliability analysis for rupture in net section», *Journal of structural engineering*, ASC mayo, Vol.139, pp. 748-756, 2013.

- BJORHOVDE, R.: «Development and use of high performance steel», *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 60, pp. 393-400, 2004.
- BONILLA, J. Y HERNÁNDEZ, J.: «Predicción de la capacidad de carga resistente última de vigas de hormigón armado de gran peralte», *Revista Ingeniería Civil*, Vol. 166, CEDEX, pp. 1-15, Madrid, España, 2012.
- DE PAULA, V. F.: *Análise Experimental e Numérica de Cantoneiras de Aço Formadas a Frio, sob Tracção e Conectadas por Parafusos*, Publicação E.T.D 005A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, pp. 1-167, 2006.
- DÍAZ, C.: *Diseño óptimo de uniones semirrígidas mediante simulación numérica y modelos kriging*, Ph. D., Thesis, Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.
- DING, CH.: *Monotonic and Cyclic Simulation of Screw-Fastened Connections for Cold Formed Steel Framing*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2015.
- KONKONG, N.: «An investigation of the ultimate strength of cold-formed steel bolted connection», *Engineering, Technology & Applied Science Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 1826-1832, 2017.
- LABOUBE, R. A.; YU, W.W.: «Tensile and bearing capacities of bolted connections», *Final Summary Report, Civil Engineering Study*, University of Missouri-Rolla, pp. 95-106. 1995.
- LEE, Y.H.; TAN, CH. S.; MOHAMMAD, S.; TAHIR, M. MD. Y SHEK, P. N.: «Review on Cold-Formed Steel Connections», *Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal*, Vol. 14, pp. 11, 2014.
- MAIOLA, C.H.: *Ligações parafusadas em chapas finas e perfis de aço formados a frio*. Tese (doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos SP, 2004.
- MACDONALD, M. Y KULATUNGA, M. P.: «Finite Element Analysis of Cold Formed Steel Structural Members with Performations Subjected to Compression Loading». *Mechanics and Mechanical Engineering*, Vol.17, No. 2, pp. 127–139, Lodz University of Technology, 2013.
- MESQUITA. L.; DIAS, R.; PARENTE, A. Y PILOTO P.: *Computational modelling of cold-formed steel screwed connections at ambient and elevated temperatures*, VII

European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCMAS), 2016.

NBR 14.762-2001: *Dimensionamento de perfis formados a frio*, 2001.

PADRÓN, Y.M.; PEÑA, D.R.; BONILLA, J. D. Y HERNÁNDEZ, J. J.: «Modelación numérica de ménsulas de hormigón armado utilizando estudios experimentales como patrones de calibración», *Universidad & Ciencia*, Vol. 5, No.1, pp. 90-106, 2016.

PIRMOZ, A.; DARYAN, A.S.; MAZAHERI, A. Y DARBANDI, H. E.: «Behavior of bolted angle connections subjected to combined shear force and moment», *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, Núm.4, pp. 436–46, 2008.

POST, B.: *Fastener spacing study of cold-formed steel wall studs using finite strip and finite element methods*, Research report, Johns Hopkins University, 2012.

RAUTENBACH, E.: *Finite element modeling of thin sheet steel screw connections*, University of Pretoria, South África, 2016.

SÁNCHEZ, C.E.: «Estudio del comportamiento de vigas continuas de gran peralte de hormigón armado mediante modelación numérica», *Universidad & Ciencia*, Vol. 5, No 1, pp. 107-122, 2016.

YIP, A. S-M.; CHENG, J. J. R.: «Shear lag in bolted cold-formed steel angles and channels in tension», *Structural Engineering*. Report nº 233, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, 2000.

YU, W.W.: *Cold-formed Steel Design*, 3rd Ed., New York, John Wiley & Sons, Inc. 2000.