

Evaluación del comportamiento estructural de conexiones soldadas en vagones utilizados para el transporte de caña

Pedro Wirley Castro Fori, Diego Fernando Cobo Barrera y Adolfo León Gómez Perlaza*

Introducción

Las conexiones entre los diferentes elementos que componen una estructura metálica son de suma importancia en el desempeño operacional de la misma. Los vagones empleados actualmente para el transporte de caña en la agroindustria azucarera colombiana se componen de estructuras metálicas unidas por conexiones soldadas. La mayoría de las fallas estructurales son el resultado de conexiones diseñadas y ejecutadas pobremente o de reparaciones inadecuadas de las mismas. Una conexión inadecuada, que puede ser el "eslabón débil" en una estructura, es con frecuencia la causa de numerosas fallas. Dada la importancia de las conexiones en una estructura metálica, se requiere un proceso de soldadura adecuado que siga un procedimiento recomendado, de manera que se pueda lograr una buena unión de los elementos que conforman la conexión. Se busca evitar defectos en la soldadura, los cuales aumentan la criticidad de la unión. En estudios realizados por Cobo Barrera y colaboradores (2007) se evidenció que las conexiones de las esquinas y la zona de transición en la estructura de la canasta son las que se someten a mayores exigencias, razón por la cual se evaluaron estas conexiones. Los resultados se presentan a continuación y son un complemento de los trabajos que viene adelantando Cenicaña con el objetivo de definir los fundamentos teóricos para el desarrollo de modelos de análisis estructural de los equipos de transporte de caña de azúcar.

Materiales y métodos

Con el propósito de determinar el comportamiento estructural de las conexiones típicas en vagones de transporte de caña se realizaron modelos de las conexiones, los cuales fueron evaluados utilizando la técnica de análisis por elementos finitos (software ALGOR®). Para modelar las conexiones se elaboraron modelos tridimensionales utilizando un análisis elástico-lineal con elementos tipo BRICK. Estos modelos sirven para obtener el estado de esfuerzos sobre las uniones de este tipo con buena precisión (Saidani, M., 2008).

Posteriormente, para validar los resultados obtenidos en el análisis por elementos finitos se hicieron pruebas experimentales en modelos reales a escala: dos conexiones fabricadas en perfiles estructurales de acero ASTM A36, proceso de soldadura GMAW

con CO₂ como gas de protección y empleo de métodos y materiales de iguales características que los utilizados en la construcción típica de un vagón para el transporte de caña. En la conexión 1, correspondiente a la zona de transición en la canasta, se instalaron medidores de deformación (*strain gages*) en cuatro puntos, mientras que en la conexión 2 (esquina superior de la canasta) se instalaron medidores en dos puntos. Los valores de las cargas aplicadas a las conexiones fueron obtenidos a partir de modelos estructurales del vagón analizados mediante elementos finitos (Cobo Barrera, *et. al.*, 2007). Las conexiones se evaluaron en una máquina universal de pruebas de tensión y compresión facilitada por la Universidad del Valle.

Finalmente, con el objetivo de identificar las variables de mayor impacto en el factor de seguridad en las conexiones soldadas se empleó un modelo de viga en voladizo con una carga vertical aplicada en el extremo libre para realizar un análisis de sensibilidad utilizando el software Crystal Ball®. Para obtener las fuerzas generadas sobre la unión se empleó el modelo de cálculo de esfuerzos en una unión soldada desarrollado por Blodgett (1976) (Figura 1), en el que se considera el cordón de soldadura como una línea. En el Cuadro 1 se presentan las variables que fueron tenidas en cuenta en el análisis de sensibilidad. Para cada una de las variables se establecieron unos valores máximos y mínimos: como valor mínimo de fuerza se consideró el vagón cargado y en estado estacionario y como valor máximo, la variación máxima obtenida en pruebas experimentales durante ciclos de operación de un tren cañero (Castro Fori, 2008). Para la simulación se usaron diez mil escenarios.

Esquema de viga en voladizo

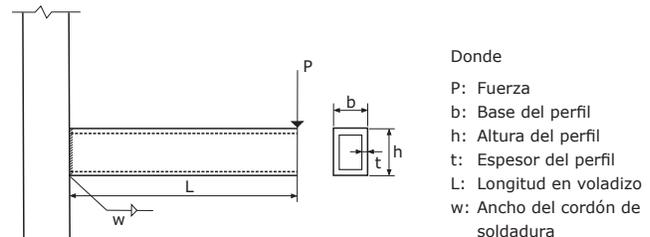


Figura 1. Esquema de viga en voladizo utilizada para el análisis de sensibilidad del factor de seguridad de conexiones soldadas.

* Estudiante de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle en periodo de práctica profesional <pwcastro@cenicana.org>; Ingeniero Mecánico, Ingeniero Mecánico <dcobo@cenicana.org>; Ingeniero Mecánico, M.Sc., Asesor en Procesos Mecánicos <algomez@cenicana.org>. Todos de Cenicaña.

Cuadro 1. Características de las variables de análisis de sensibilidad del factor de seguridad de conexiones soldadas utilizando como ejemplo una viga en voladizo.

Parámetro	Unidades	Máximo	Mínimo
Fuerza (P)	N (Lbf)	2376 (485)	813 (166)
Esfuerzo permisible (σ_{perm})	MPa (Psi)	150 (21755)	100 (14700)
Ancho del cordón de soldadura (w)	mm (pulgadas)	1.52 (0.3)	15.70 (0.6)
Espesor del perfil (t)	mm (pulgadas)	4.77 (0.188)	4.75 (0.187)
Altura del perfil (h)	mm (pulgadas)	97.79 (3.85)	96.52 (3.80)
Base del perfil (b)	mm (pulgadas)	70.10 (2.76)	68.83 (2.71)
Longitud en voladizo (L)	mm (pulgadas)	530.86 (20.90)	529.59 (20.85)

Resultados

El estado de esfuerzos identificado mediante el análisis por elementos finitos (FEA, sigla en inglés) y los puntos donde se instalaron los medidores de deformación en las conexiones fabricadas para las evaluaciones experimentales se presentan en la Figura 2. La comparación de los esfuerzos en los distintos puntos de medición se muestra en las Figuras 3 y 4.

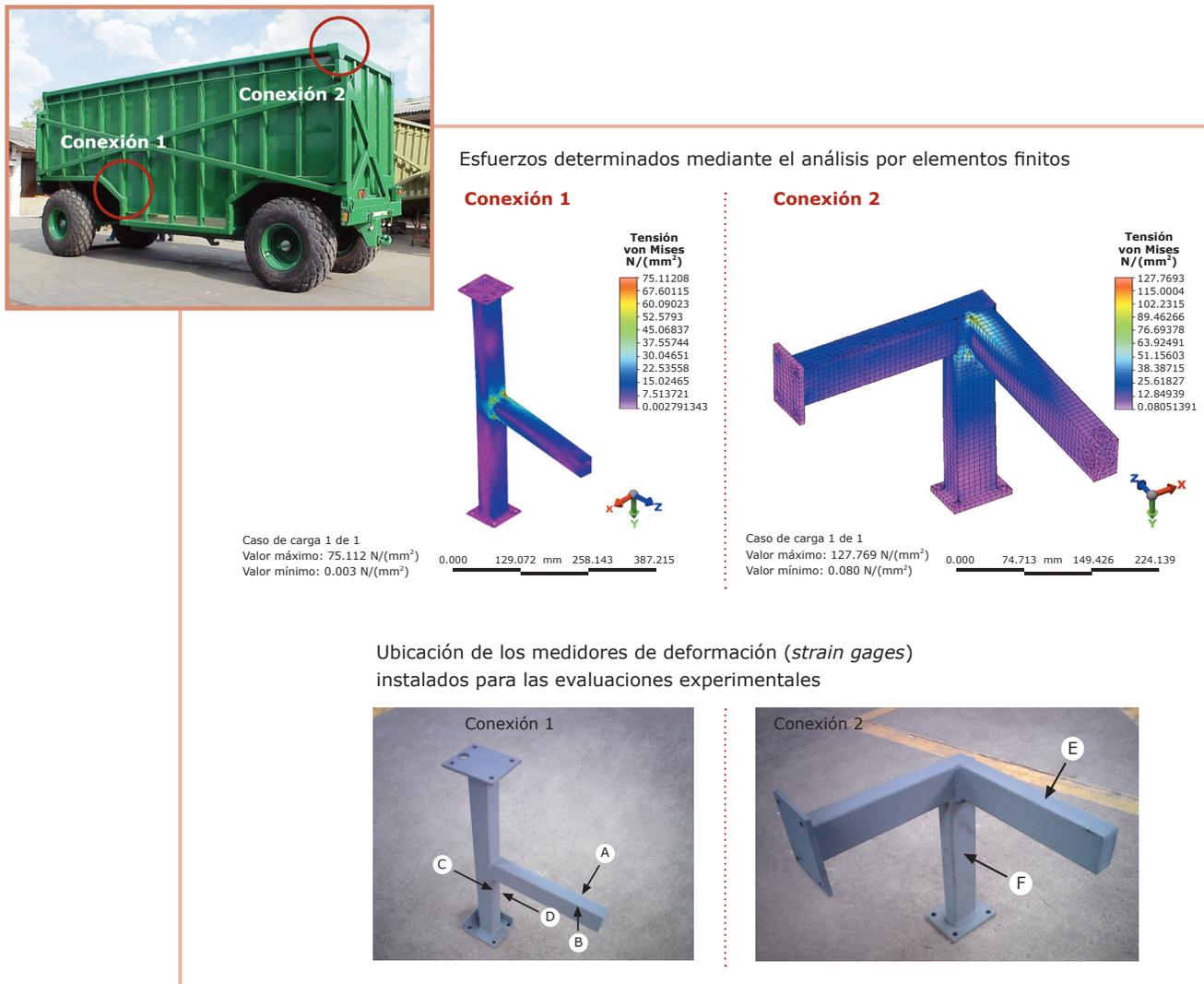


Figura 2. Identificación de las conexiones evaluadas, valor de los esfuerzos determinados mediante el análisis por elementos finitos y puntos donde se hicieron las mediciones experimentales.

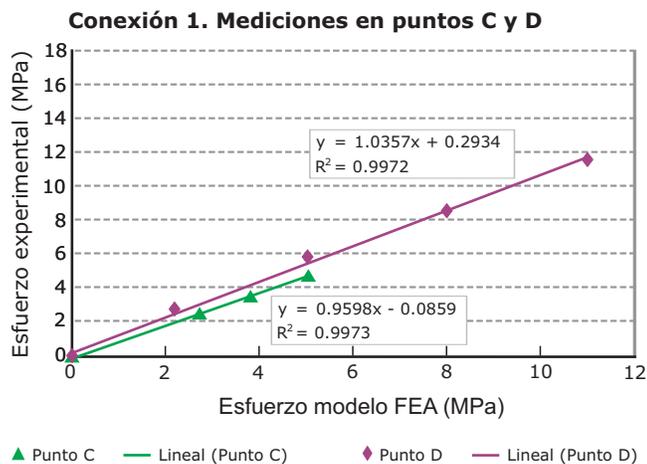
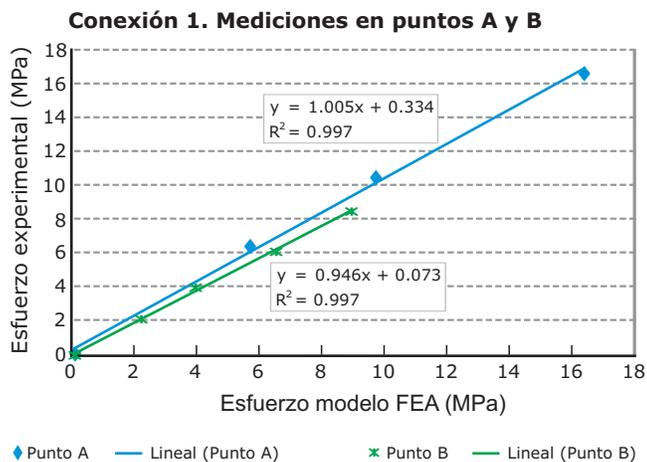


Figura 3. Comparación de los esfuerzos determinados en la conexión 1 mediante el análisis con elementos finitos y las mediciones experimentales (ver figura 2 anterior).

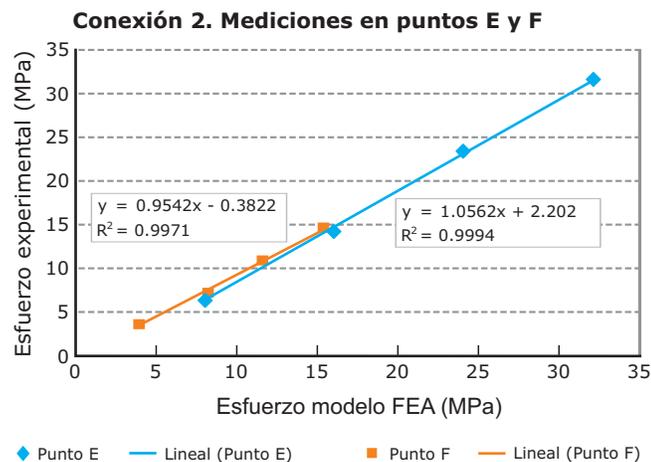


Figura 4. Comparación de los esfuerzos determinados en la conexión 2 mediante el análisis con elementos finitos y las mediciones experimentales (ver figura 2 anterior).

Una unión soldada está sujeta a variaciones en la geometría y la calidad de la unión, las cuales afectan el esfuerzo permisible (σ_{perm}) de la soldadura aplicada. Otra variable que afecta el comportamiento de la unión soldada es la variación de cada una de las fuerzas resultantes sobre la unión.

De acuerdo con los resultados se observa que las variaciones de las cargas que actúan sobre la estructura de un vagón para transporte de caña, debido a los diferentes tipos de terrenos y condiciones de carga, son las de mayor influencia en el factor de seguridad. Un aumento en magnitud de las variables con correlación positiva como el esfuerzo permisible (σ_{perm}) y el ancho del cordón (w), las cuales dependen exclusivamente del procedimiento y la metodología de soldadura aplicada, incrementa el valor del factor de seguridad; mientras que el incremento en la fuerza aplicada (P) contribuye a la disminución de dicho factor (Figura 5).

Para uniones soldadas de este tipo, la literatura recomienda un factor de seguridad mínimo de 1.5 (Shigley, 2002). Como se observa en la Figura 6 este valor no se cumple en el caso del ancho del cordón de soldadura inferior a 0.2 pulgadas (5.08 milímetros) y con carga superior a 350 Lbf (1560 N). Lo anterior sugiere emplear un ancho de cordón de soldadura (w) superior a 0.3 pulgadas (7.62 milímetros).

Sensibilidad del factor de seguridad

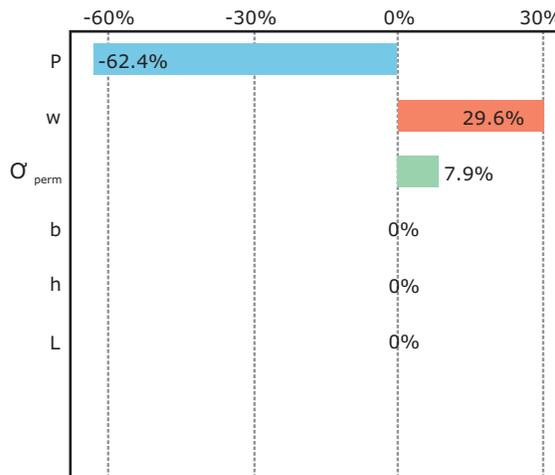


Figura 5. Sensibilidad del factor de seguridad ante variaciones en la carga aplicada y los parámetros geométricos de una viga en voladizo utilizada como ejemplo de conexión soldada para el análisis.

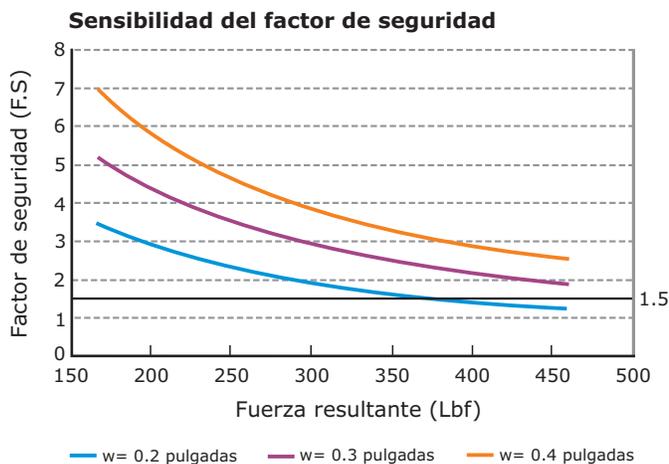


Figura 6. Sensibilidad del factor de seguridad para diferentes anchos del cordón de soldadura, ante variaciones en la fuerza resultante.

Conclusiones

El modelado de conexiones de perfiles de pared delgada unidas con soldadura por arco mediante el empleo de la técnica de elementos finitos genera resultados confiables, con coeficientes de correlación superiores a $R^2=0.996$. Lo anterior valida el empleo de la herramienta de análisis y modelación por elementos finitos en el diseño de estructuras de pared delgada unidas por soldadura, tales como los vagones para el transporte de caña empleados actualmente en la agroindustria azucarera colombiana.

En el diseño de una unión soldada como la analizada para la estructura de la canasta de un vagón cañero, las variables de mayor importancia son la carga resultante (P) y el ancho del cordón de soldadura (w). Al aplicar un procedimiento de soldadura adecuado se busca que los factores de seguridad no sean menores a los asumidos en el diseño de la junta soldada.

Proyecciones

Las reparaciones realizadas a la estructura de vagones deben seguir procedimientos y normas establecidos para esta aplicación. Se deben implementar acciones de control en las labores de reparación soldada, como diseño de procedimientos, listas de chequeo para la aplicación del procedimiento, evaluación de las soldaduras aplicadas por métodos de ensayo no destructivos, que permitan garantizar que la unión soldada reparada conserva los factores de seguridad con los que fue diseñada.

Agradecimientos

Al Ingenio Providencia S.A., a la Universidad del Valle y a la empresa Imecol S.A. por su colaboración en el desarrollo del presente trabajo.

Referencias bibliográficas

- Blodgett Omer, W. 1976. Design of weldments. 8 Ed. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. Cleveland. Sección 6.3.2.
- Castro Fori, P.W. 2008. Modelado y evaluación experimental de estructuras de vagones para el transporte de caña. Tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería. Cali, Colombia. p.55-68.
- Cobo Barrera, D.F.; Gómez, A.L.; Bejarano Restrepo, L. 2007. Observaciones preliminares sobre el análisis estructural de vagones. Carta Trimestral. 29, 2-3, (abr.-sep.): p.31-32.
- Shigley J.E. y Mischke C.R. 2002. Diseño en Ingeniería Mecánica. Sexta Edición. McGraw-Hill. México. p.535-550.
- Saidani, M. 2008. Behaviour of welded T-end connection to rectangular hollow section (RHS) in axial tension. Journal of Constructional Steel Research. v.64. p.447-453.



Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia - Cenicaña

Agroindustria unida en la investigación y el desarrollo

Cenicaña es una institución privada de carácter científico y tecnológico, sin ánimo de lucro, fundada en 1977 por iniciativa de la agroindustria azucarera localizada en el valle del río Cauca. Su misión es contribuir por medio de la investigación, evaluación y divulgación de tecnología y el suministro de servicios especializados al desarrollo de un sector eficiente y competitivo, de manera que éste juegue un papel importante en el mejoramiento socioeconómico y en la conservación de un ambiente productivo, agradable y sano en las zonas azucareras.

Las actividades de investigación y desarrollo son financiadas por los ingenios azucareros y los cultivadores de caña a través de donaciones directas definidas cada año como un porcentaje del valor de la producción de azúcar.

Las áreas de investigación se enmarcan en tres programas: Variedades, Agronomía y Procesos de Fábrica. Los servicios de apoyo son: Información y documentación, Economía y Estadística, Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología y Tecnología Informática.

El Centro Experimental está ubicado a 3°13' latitud norte, a 1024 metros de altura sobre el nivel del mar. En este sitio la temperatura media anual es de 23.5 °C, la precipitación de 1160 mm y la humedad relativa de 77%.

La **Carta Trimestral** es una publicación periódica, editada por Cenicaña con el propósito de difundir información y conocimientos científicos y tecnológicos relacionados con el desarrollo de la agroindustria azucarera colombiana. Ofrece documentación resumida sobre los resultados generados por el centro de investigación y las experiencias de ingenios y cañicultores con las nuevas tecnologías, al tiempo que provee las referencias bibliográficas complementarias sobre cada tema. El primer volumen fue editado en 1978, y los cambios más significativos de diseño y concepto editorial se dieron en 1997 cuando la versión impresa comenzó a publicarse también en Internet.

Título: Evaluación del comportamiento estructural de conexiones soldadas en vagones utilizados para el transporte de caña

Autores: Pedro Wirley Castro F.; Diego Fernando Cobo B.; Adolfo León Gómez P.

Publicado en: Carta Trimestral. Cenicaña, 2009. v.31, nos. 1 y 2. p.34-37

© Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, 2009.

Centro Experimental: vía Cali-Florida, km 26
Tel: (57) (2) 6876611 – Fax: (57) (2) 2607853
Oficina de enlace: Calle 58 norte no.3BN-110
Apartado aéreo: 9138
Cali, Valle del Cauca – Colombia

www.cenicana.org
buzon@cenicana.org