

ANÁLISIS, DISEÑO Y VERIFICACIÓN SEGÚN NORMA NAG-E 401 DE DISPOSITIVOS DE SUJECIÓN DE CILINDROS PARA GNC EN TRACTORES/CAMIONES DE CARGA

ANALYSIS, DESIGN, AND VERIFICATION ACCORDING TO NAG-E 401 STANDARD FOR CNG CYLINDER FIXING DEVICES ON TRACTORS/CARGO TRUCKS

Walter Giordano^{a,b}, Neorén Franco^a, Cristian Dominguez^a, Bruno García^a Juan Acosta^a, Facundo Parodi^a, Agustín De Battista^a, Benjamin Sanchez^a, Mauro Dorsch^a

^a*Grupo de Estudio de Mecánica Computacional, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional San Nicolás, Colón 332, San Nicolás de los Arroyos, Argentina, gemeco@frsn.utn.edu.ar, <http://www.frsn.utn.edu.ar/>*

^b*Laboratorio de Desarrollo de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Nacional Noroeste de Buenos Aires, Roque Saenz Peña 456, Junín, Argentina, ladimi@unnoba.edu.ar, <https://sitio.unnoba.edu.ar/>*

Palabras clave: Transporte, gas natural comprimido, estructura, análisis, diseño, verificación

Resumen. Este proyecto de investigación y desarrollo tiene como objetivo analizar los diseños de dispositivos de sujeción de cilindros de Gas Natural Comprimido (GNC) para adaptarlos a tractores/camiones de transporte de carga. El propósito principal es lograr un ahorro de combustible mediante la inyección de gas natural en unidades que utilizan gasoil como combustible. Dado que estas unidades de transporte experimentan diversas aceleraciones y frenados, se pretende evaluar el comportamiento de estos dispositivos ante las fuerzas generadas durante dichas acciones. Además, se busca determinar si los diseños actuales desarrollados por empresas locales cumplen con los estándares establecidos en la norma NAG-E 401, con el fin de optimizar su desempeño.

Keywords: Transport, compressed natural gas, structure, analysis, design, verification

Abstract. This research and development project aims to analyze the designs of Compressed Natural Gas (CNG) cylinder clamping devices to adapt them to tractors/trucks for cargo transport. The main purpose is to achieve fuel savings by injecting natural gas into units that use diesel as fuel. Since these transport units experience various accelerations and braking forces, the behavior of these devices under the forces generated during such actions will be evaluated. Additionally, the objective is to determine if the current designs developed by local companies comply with the established standards in NAG-E 401, in order to optimize their performance.

1 INTRODUCCIÓN

Nuestro país cuenta con una empresa que se dedica a la colocación de equipos de Gas Natural Comprimido (GNC) para propulsar camiones y tractores de transporte de carga.

El objetivo principal es evaluar el comportamiento de los dispositivos de sujeción de cilindros de GNC frente a las fuerzas dinámicas que experimentan sobre el vehículo que aseguren el cumplimiento de la norma NAG-E 401, ver Figura 1.

El proyecto cuenta con la colaboración de la empresa SABECORT, ubicada en la ciudad de San Nicolás de los Arroyos, provincia de Buenos Aires, Argentina; la cual, mediante un convenio industrial-académico, proporcionó los prototipos en estudio para esta investigación. La metodología de trabajo se basó en un relevamiento in situ y bibliográfico, y mediante la utilización de herramientas CAD-CAE del software Autodesk Inventor.

Con la finalidad de simular situaciones extremas, los modelos fueron sometidos a una aceleración de 20 veces la aceleración de la gravedad en dirección axial del vehículo. Al verificar las tensiones y deformaciones resultantes, se logró analizar el comportamiento de los dispositivos y llevar a cabo un rediseño adecuado en las zonas de fallas detectadas.



Figura 1: Tractor con dispositivos de sujeción para cilindros de GNC - SABECORT

2 ALCANCE

El alcance del presente trabajo de investigación y desarrollo se ha estructurado en las siguientes etapas:

Búsqueda bibliográfica y análisis normativo: Se realizó una exhaustiva investigación para recopilar información relevante sobre dispositivos de sujeción de cilindros de Gas Natural Comprimido (GNC) utilizados en vehículos de transporte de carga y pasajeros. Además, se analizaron las normativas vigentes relacionadas con la seguridad y diseño de estos dispositivos de vigencia en Argentina.

Relevamiento y análisis de componentes actuales: Se llevó a cabo un relevamiento en colaboración con la empresa SABECORT para obtener datos sobre los componentes de sujeción para los cilindros de GNC provistos por dicha empresa, que actualmente se utilizan en camiones y tractores de transporte de carga. Estos datos fueron analizados para identificar zonas comprometidas a grandes esfuerzos y evaluar posibilidades de mejora en el diseño de la estructura.

Modelado en software CAD-CAE: Con la información suministrada por SABECORT se llevó a cabo el modelado tridimensional de los componentes utilizando un software de diseño asistido por computadora (CAD) y análisis por elementos finitos (CAE). Esto permitió representar el conjunto (cilindros de GNC y su estructura soporte), ver Figura 2.

Análisis de cargas y simulación por elementos finitos: Se realizaron simulaciones computacionales utilizando la técnica de elementos finitos para someter los modelos a condiciones de aceleración extrema (condiciones de borde descritas en la normativa). Esta etapa permitió estimar los esfuerzos a los que pueden llegar a ser sometidos estos componentes.

Evaluación de resultados y rediseño: Mediante la obtención gráfica de los resultados de la simulación, se verificaron los valores de tensiones y deformaciones presentes en los componentes. Estos resultados fueron comparados con los valores admisibles establecidos por la normativa NAG-E 401. En los casos en los que un componente no haya cumplido con los requisitos de seguridad, se llevó a cabo un rediseño en las zonas comprometidas para asegurar el cumplimiento de las normas y garantizar el correcto comportamiento de la estructura.

Validación de datos y recomendaciones: Como resultado final, luego de los diseños obtenidos, se presentan recomendaciones a la empresa usuaria de los equipos, basadas en la experiencia adquirida durante el desarrollo del proyecto, con el objetivo de mejorar la seguridad de sus diseños de los dispositivos de sujeción.

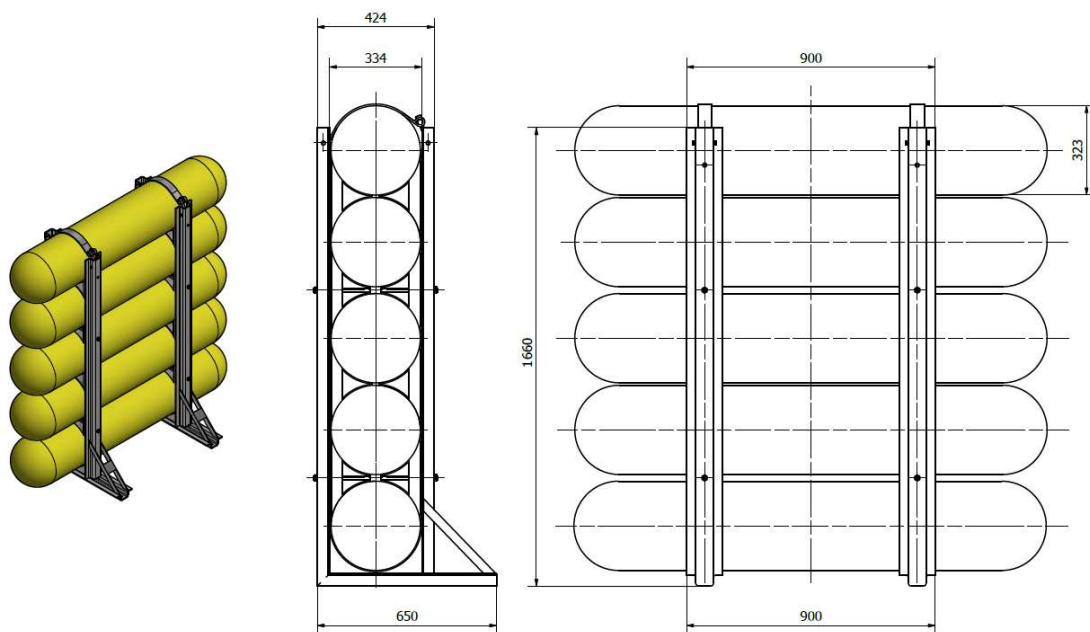


Figura 2: Conjunto armado para cilindros de GNC y estructura soporte

3 DESARROLLO

3.1 Descripción

El dispositivo de sujeción para cilindros de GNC en estudio presenta una estructura compuesta por elementos esenciales para garantizar su resistencia y funcionamiento óptimo. A continuación, se detallan sus principales componentes, ver Figura 3.:

Largueros: El sistema cuenta con cuatro largueros de 1660 mm de longitud con una

sección tipo “omega”, que juega un papel fundamental debido a su modulo resistente. Estos largueros proporcionan la solidez necesaria para soportar las cargas y mantener la integridad del conjunto.

Bases inferiores: Para proporcionar la vinculación con el chasis del camión, se han incorporado dos perfiles inferiores de sección tipo “omega”. Estos se sujetan al chasis mediante bulones de calidad 10.9 cincado.

Con el objetivo de reforzar la estructura, se añadieron refuerzos diagonales, uniendo los extremos de la base con cada larguero.

Cunas: Se han incorporado ocho cunas diseñadas específicamente para albergar y asegurar los cilindros de GNC. Estas garantizan un posicionamiento adecuado y seguro de los cilindros dentro del dispositivo.

Zunchos: Dos zunchos ubicados en la parte superior desempeñan la función de comprimir el conjunto mediante tornillos que actúan de tensores. Esto asegura la firme y confiable sujeción de todos los componentes.

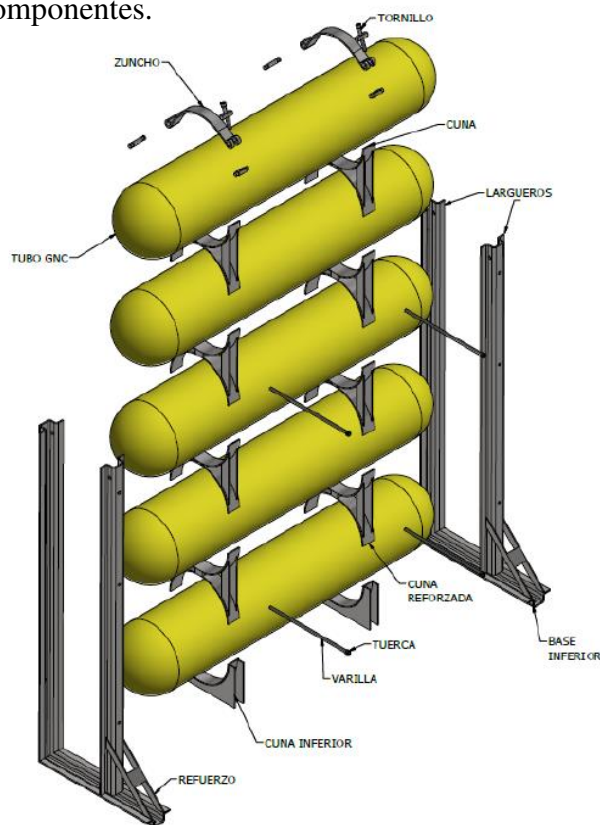


Figura 3: Vista en explosión del conjunto

3.2 Materiales

La estructura principal, compuesta por los largueros y bases inferiores, son de chapa plegada comercial y cortadas, ver Figura 4; con las siguientes propiedades mecánicas indicadas en la Tabla 1 (Hibbeler, 2008; Gere y Goodno, 2009).

Material	Mod. Elástico kN/mm ²	Coef. Poisson	Mod. Corte kN/mm ²	Densidad kg/m ³	Límite Elástico N/mm ²	Límite Tracción N/mm ²	Alarg. %
ASTM A36	200	0,26	79,4	7800	250	475	20

Tabla 1: Propiedades mecánicas

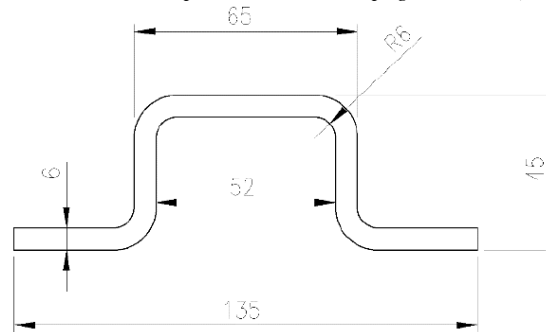


Figura 4: Sección chapa plegada

4 NORMATIVA

La Norma NAG-E401 establece los requisitos técnicos y de diseño que deben cumplir los dispositivos de sujeción de cilindros utilizados en sistemas de Gas Natural Comprimido (GNC) para vehículos de transporte de carga y pasajeros en Argentina. El propósito es garantizar la seguridad, integridad y estabilidad del conjunto, tanto en condiciones normales de funcionamiento como en situaciones extremas.

Los dispositivos de sujeción de los cilindros deberán ser calculados y dimensionados, para soportar las siguientes cargas una vez que el conjunto esté armado:

a) Carga axial: El conjunto debe resistir una carga veinte veces superior al peso de los cilindros llenos, aplicada en la dirección axial del vehículo. Esta carga representa situaciones de aceleración extrema y frenado brusco, y es una medida esencial para evaluar la resistencia del dispositivo en condiciones de alta exigencia.

b) Carga lateral: Se debe asegurar que el conjunto sea capaz de soportar una carga igual a ocho veces el peso de los cilindros llenos aplicada en dirección lateral en cualquier sentido. Esta carga garantiza la estabilidad del sistema ante fuerzas laterales que puedan actuar durante un impacto lateral.

5 METODOLOGIA DE RESOLUCION

5.1 Verificación de anclajes al chasis

Como se mencionó anteriormente, el conjunto está sujeto al chasis mediante 6 bulones grado 10.9 M14x1,5 cuya tensión de fluencia es de 940 MPa. Realizando un diagrama de esfuerzos; ver. Figuras 5 y 6, cuando el conjunto está sometido a una aceleración de 20 veces la aceleración de la gravedad, siendo su masa total de 642,5 kg se concluye que la fuerza de anclaje sobre los pernos es igual a 126 kN.

Por lo tanto, Considerando un factor de seguridad $n = 3$, se verifica el esfuerzo cortante en el tornillo, ver Ec. (1); mediante el criterio de la teoría de la energía de distorsión (ED) o de Von Mises:

$$\tau_{adm} = \frac{0,577 \cdot S_y}{n} = \frac{0,577 \cdot 940 \text{ MPa}}{3} = 180,8 \text{ MPa} \quad (1)$$

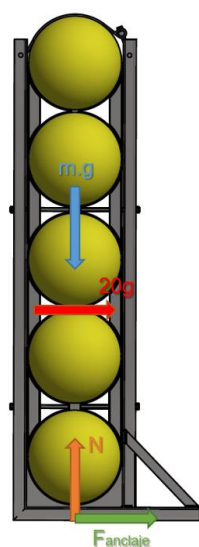


Figura 5: Diagrama de esfuerzos

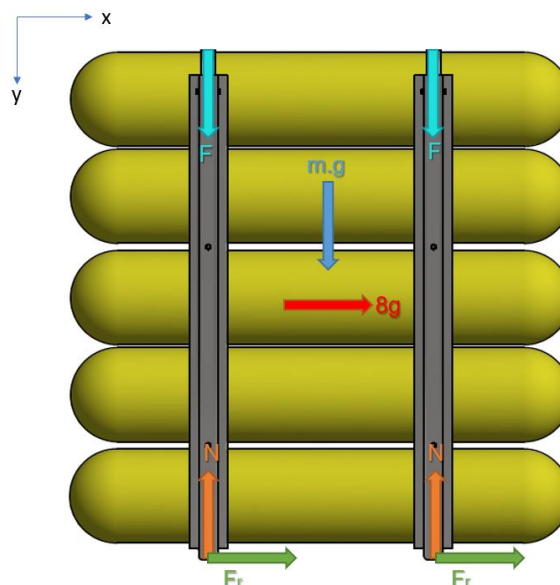


Figura 6: Diagrama de esfuerzos

La tensión admisible de la Ec. (1) debe ser mayor a la tensión de trabajo τ de la Ec. (2):

$$\tau = \frac{F_{\text{tornillo}}}{A_{\text{resistente}}} = \frac{F_{\text{anclaje}}}{N \cdot A_{\text{resistente}}} = \frac{126058,5 \text{ N}}{6 \cdot 116 \text{ mm}^2} = 181,2 \text{ MPa} \quad (2)$$

Dado que la tensión de trabajo supera la tensión admisible (Bedford y Fowler, 2008), los 6 tornillos que aseguran la sujeción al chasis no cumplen la verificación. Como solución, se sugiere la incorporación de un tornillo de sujeción adicional en cada perfil, con el propósito de reducir la tensión de corte.

Para la condición en la cual el conjunto es sometido a una carga de 8 veces la aceleración de la gravedad en dirección perpendicular al sentido de marcha, se verifica la condición antes mencionada.

5.2 Carga de fricción para sujeción de los cilindros de GNC

Los cilindros son retenidos únicamente por la fricción generada entre la cuna, los cilindros y las estructuras prensa conjunto superior. Mediante los tornillos tensores se aprieta el conjunto

para mejorar el ajuste entre las partes de la estructura y los cilindros. Entre las piezas se encuentra una goma o elastómero que incrementa la fricción entre cuna y cilindros.

Al realizar la sumatoria de esfuerzos del conjunto en sentido horizontal y despejando la fuerza de roce de la Ec. (3) se obtiene el valor de la misma:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{\text{horizontal}} &= m \cdot a \\ 2 \cdot F_{\text{roce}} &= m \cdot 8g = 642,5 \text{ kg} \cdot 8 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ F_{\text{roce}} &= 25211,7 \text{ N} \end{aligned} \quad (3)$$

Además, en la Ec. (4) se realiza la sumatoria de esfuerzos en sentido vertical para obtener la fuerza realizada por los tornillos tiradores.

Se considera un coeficiente de rozamiento $\mu = 0,5$ (Budynas–Nisbett, 2008, pág. 856) entre las piezas metálicas y los cilindros simulando el elastómero utilizado por el fabricante.

$$\begin{aligned}\Sigma F_{vertical} &= m \cdot g + 2F - 2N = 0 \\ m \cdot g + 2F - 2(Fr/\mu) &= 0 \\ F &= \frac{Fr}{\mu} - m \cdot \frac{g}{2}\end{aligned}\quad (4)$$

$$F = \frac{25211,7 \text{ N}}{0,5} - 642,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Donde la fuerza total es de 47272N, y en cada tornillo tirador, resulta ser igual a 23636 N

5.3 Determinación de la fuerza de apriete y torque de ajuste de los tornillos tensores

A los efectos de determinar el torque de ajuste y la precarga segura para los tornillos tensores, se emplea la norma UNE 17-108-81, la Ec. (5) que establece que la fuerza de tracción segura para un tornillo con carga estática es:

$$F = \frac{0,8 \cdot \sigma_{0,2} \cdot A_s}{\sqrt{1 + 3 \left[\frac{4}{1 + \frac{d3}{d2}} \left(\frac{p}{\pi d2} + 1,155\mu \right) \right]^2}} \quad (5)$$

Siendo:

p: paso en mm (1,95 mm) Tabla 8-2 (Budynas–Nisbett, 2008)

d3: diámetro medio o primitivo (10,786 mm) Tabla 8-2 (Budynas–Nisbett, 2008)

d2: diámetro de raíz (10,161 mm) Tabla 8-2 (Budynas–Nisbett, 2008)

As: área de núcleo de tornillo (91,548 mm²) Tabla 8-2 (Budynas–Nisbett, 2008)

Donde, el factor 0,8 significa que se adopta una precarga del 80% de la carga máxima del tornillo. Reemplazando por los valores conocidos, se obtiene una fuerza igual a 20,4 kN donde su torque mínimo de 77,7 Nm.

6 MODELIZACION EN SOFTWARE

La creación del modelo sólido por computadora se realizó mediante el software Autodesk Inventor 2021 versión académica. Comprende, el dibujo sólido de cada pieza en 3D, el armado del conjunto y su estudio de tensiones.

Con las cargas de apriete antes establecidas, las aceleraciones en la peor condición de ensayo y el modelo sólido se procedieron al armado del modelo de elementos finitos y su

posterior solución, ver Figura 7.

Las consideraciones de borde son las siguientes:

- 6 restricciones fijas en el perfil inferior que simulan los 6 tornillos de sujeción.
- Fuerzas de acción y reacción en el tornillo tirador igual a 23636N en cada uno.
- Aceleración del conjunto igual a 20 veces la gravedad en la dirección axial del vehículo (condición más desfavorable).
- Soldaduras en los perfiles y cunas

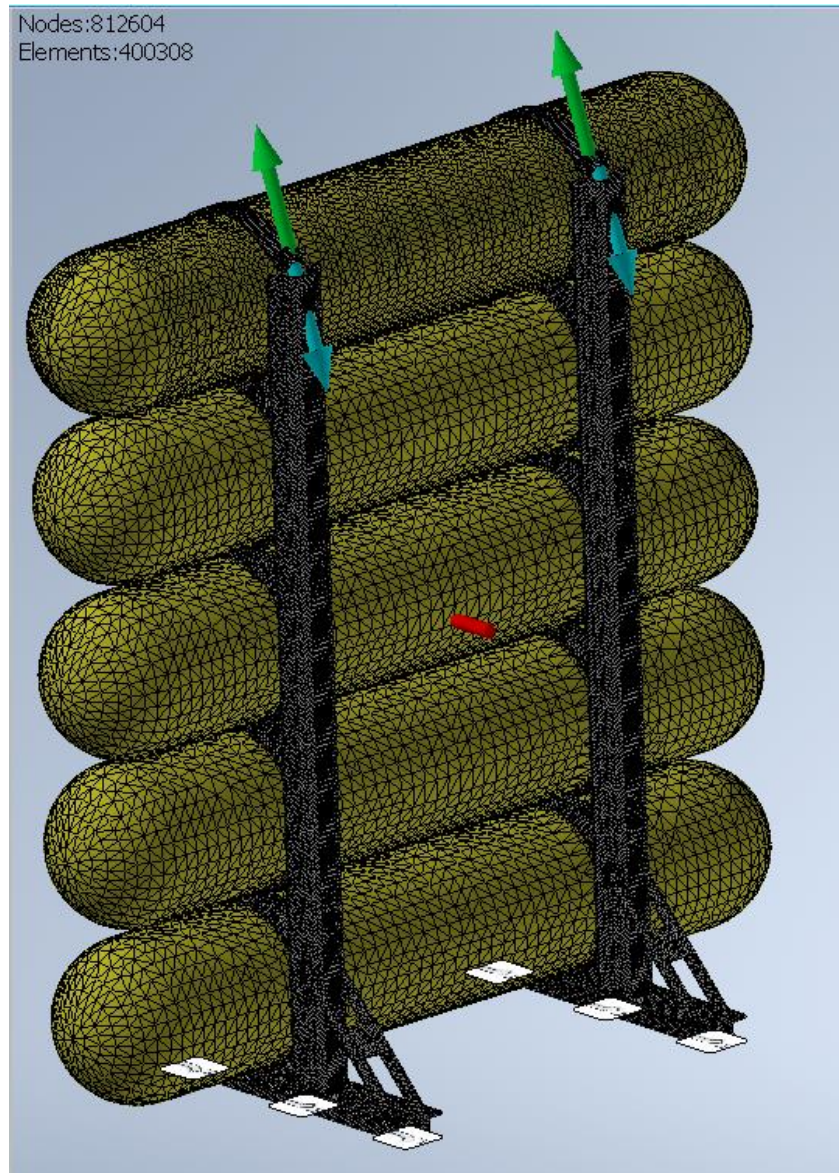


Figura 7: Discretización del modelo (mallado: 812406 nodos y 400308 elementos)

6.1 Diseños y Resultados

En la Figura 8 se muestran en color rojo, las tensiones que alcanzan el límite de rotura y en amarillo aquellas que alcanzan el límite de fluencia del material.

a) Diseño Original fabricado por la empresa SABECORT

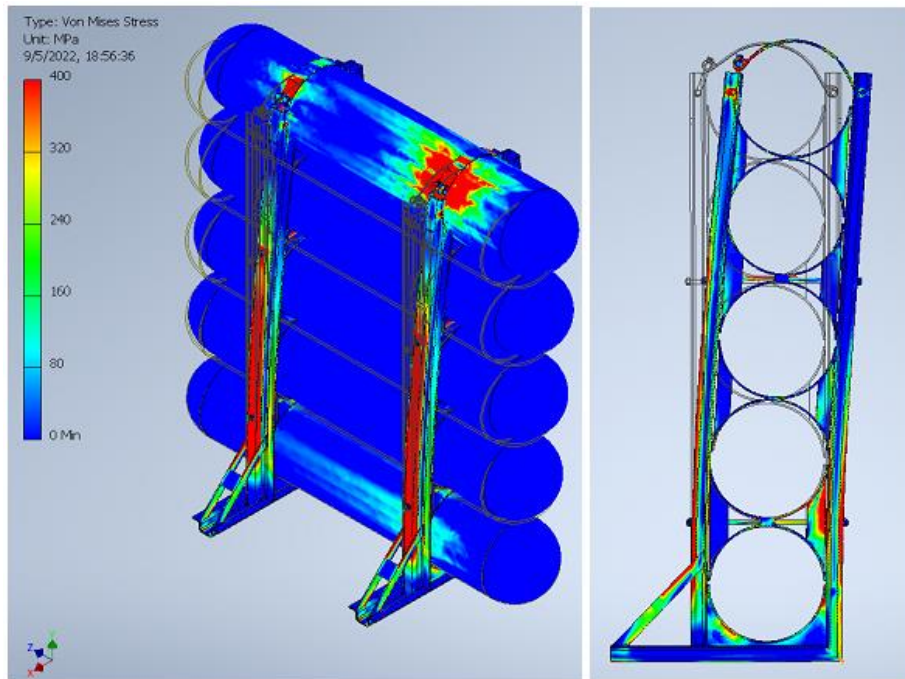


Figura 8: Diseño Original

En la Figura 9 se observan las cunas y el refuerzo en el larguero, diseño SABECORT:

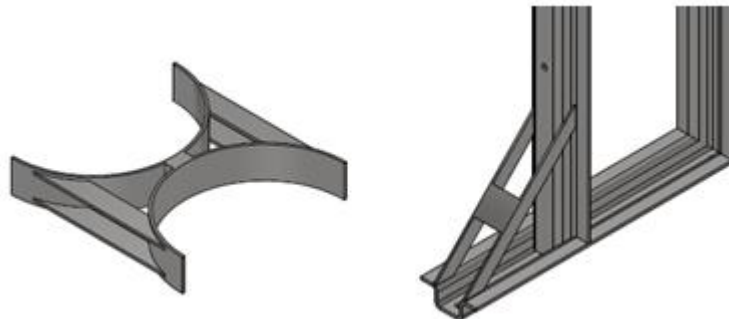


Figura 9: Cuna y refuerzo en diseño original

Dado que las tensiones superan el límite de rotura del material, se proponen modificaciones en las cunas añadiendo tubos estructurales de sección cuadrada de dimensiones 50x50x5 mm y se diseñan nuevos refuerzos, ver Figura 10.

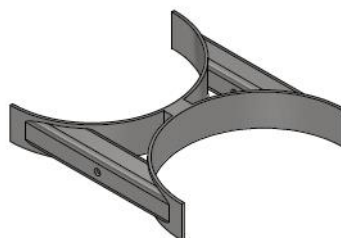


Figura 10: Rediseño de cuna

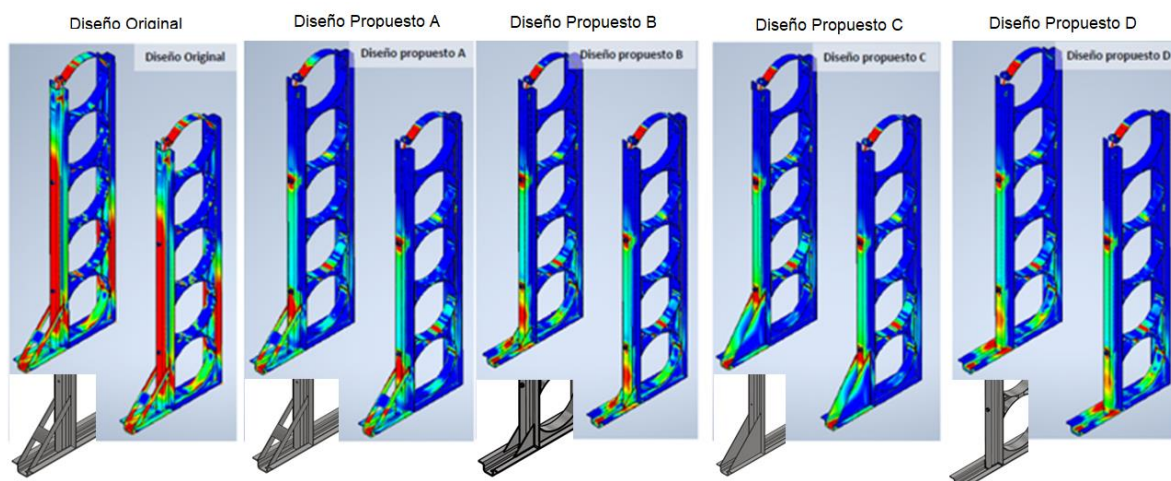


Figura 11: Comparación de diseño original vs rediseños propuestos con modificaciones en el refuerzo

7 CONCLUSIONES

Mediante el análisis computacional se observa que, al modificar las cunas, añadiendo a ellas tubo estructural de sección cuadrada (diseños propuestos A, B, C y D) Figura 11, disminuyen las tensiones en los largueros del conjunto.

Como conclusión general, el diseño propuesto D resulta ser el más óptimo y recomendado a instalarse en los tractores/camiones, dado que al quitar el refuerzo de unión entre larguero y base inferior (eliminándose una restricción de movimiento), las altas tensiones en los largueros del modelo original, se reducen notablemente, notándose algunas moderadas en las zonas próximas a las soldaduras de unión entre perfiles omegas. ver Figura 12.

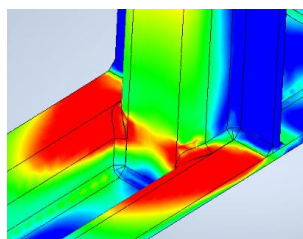


Figura 12: Tensiones entorno unión soldada entre base inferior y larguero

8 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de la empresa SABECORT SA de la ciudad de San Nicolás de los Arroyos (Bs As), por los datos y modelos aportados; a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UTN, por el soporte financiero al proyecto TVECSN0008737.

9 REFERENCIAS

- NAG-E 401. *Especificación técnica dispositivos de sujeción de cilindro/s para GNC*, 1997.
 UNE 17-108-81. *Tornillos y tuercas de acero. Momentos de apriete*, 1981.
 Bedford A. y Fowler, W. *Mecánica para ingeniería. Estática*, Pearson Education, 2008.
 Hibbeler. *Mecánica de Materiales*, Pearson, 2008.
 Gere J. - Goodno B. *Mecánica de Materiales*, Cengage Learning, 2009.
 Budynas y Nisbett, J. S. *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 2008.