

Análisis estructural por método de elementos finitos de semirremolque para transporte de ácido clorhídrico

Tellería, Guido^a; Cichero, Renso^b; Walter F. Giordano^b; Arrien, Patricio G.^c

^a Departamento de Informática y Tecnología – UNNOBA.

^b Laboratorio de Desarrollo de Ingeniería Mecánica e Industrial (LaDIMI) - UNNOBA.

^c Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras – Sede Junín (LEMEJ) - UNNOBA.

pgarrien@comunidad.unnoba.edu.ar

Resumen

En la República Argentina, un amplio porcentaje del transporte de sustancias peligrosas líquidas se realiza por carretera. Para esta actividad, existe una extensa legislación que abarca desde aspectos relacionados a la fabricación y control de las unidades como también a la actividad de transporte propiamente dicha. Sin embargo, la Disposición 76/1997 de la Subsecretaría de Combustibles tiene un enfoque particular en el transporte de combustibles livianos y gases licuados de petróleo, mientras que otros tipos de sustancias, como el ácido clorhídrico, enfrentan cierta falta de regulación. Tal es así, que dicha disposición establece que las unidades de transporte deben ser fabricadas de acuerdo con el Código ADR (Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera), el cual es un documento de cabecera para la fabricación de semirremolques para transporte de combustibles, aunque es aplicable a toda sustancia peligrosa a ser transportada por carretera. No obstante, es imperativo garantizar que todas las unidades de transporte operen con total seguridad, por consecuencia se requiere que toda unidad liberada a la circulación en la vía pública cumplimente aquellos requisitos establecidos en los códigos de fabricación para proporcionar condiciones de seguridad activa y pasiva adecuadas, como complemento de la legislación nacional. Es por ello que este trabajo se enfoca en el análisis de tensiones y deformaciones en un semirremolque diseñado para el transporte de ácido clorhídrico empleando el Método por Elementos Finitos como herramienta principal y aplicando las condiciones de simulación establecidas en el Código ASME BPVC Sección XII - Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks. Este estudio busca contribuir a mejorar la seguridad en el transporte de sustancias peligrosas líquidas, destacando la importancia de cumplir con estándares rigurosos en la construcción y operación de unidades de transporte. En base a los resultados obtenidos, se identificaron varias oportunidades de mejora, entre las que se encuentra el cambio de diseño de los mamparos internos del semirremolque. Estas mejoras podrían contribuir significativamente a la optimización de la distribución de tensiones y la mejora general de la seguridad durante el transporte de ácido clorhídrico. Además, se observaron tensiones relativamente elevadas en ciertos puntos específicos, lo que sugiere la necesidad de realizar ajustes de diseño en esas áreas para garantizar una distribución uniforme de las cargas y evitar posibles puntos de fallo. En conclusión, a pesar de las oportunidades de mejora identificadas, los resultados del análisis indican que, en términos generales la unidad cumple con los requisitos necesarios para una operación segura. Sin embargo, se recomienda considerar las mejoras propuestas para garantizar un transporte óptimo y minimizar cualquier riesgo potencial durante el servicio.

Palabras clave: Análisis estructural, Elementos finitos, Transporte en carretera, Tanque semirremolque.

INTRODUCCIÓN

En la república argentina, para que una unidad de transporte de carga pueda circular por la vía pública, es necesario que la misma cuente con la Licencia de Configuración de Modelo (LCM). Esto es una autorización gubernamental en la que se aprueba el cumplimiento de los requisitos de seguridad activa y pasiva de la unidad. Para su obtención es necesario, entre otros requisitos, analizar el estado tensional ante los diferentes escenarios de carga propuestos por la normativa. Esto último resulta factible haciendo uso de herramientas como la Simulación por Elementos Finitos. En este país, ante la falta de un código que establezca los requisitos para unidades de transporte de ácido clorhídrico, se adoptaron los requisitos establecidos por el Código ASME BPVC Sección XII - Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks por ser un código de reconocimiento internacional.

OBJETIVOS

Evaluar la integridad estructural de la unidad semirremolque destinada al transporte de ácido clorhídrico, mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos (MEF) conforme al código ASME BPVC Section XII. El propósito fundamental es obtener un análisis de los esfuerzos y deformaciones a los que se somete la unidad, con el fin de contribuir a la obtención de la Licencia de Configuración de Modelo (LCM) y garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad y calidad exigidos por la industria y la legislación nacional vigente.

MATERIALES Y MÉTODOS

La unidad consiste de un semirremolque con una capacidad de 24.240 litros seccionado en dos compartimentos, uno de 15.150 litros y otro de 9.090 litros. Configuración de ejes 2+1, esto es, dos ejes fijos amortiguados por suspensión a ballestas y un eje neumático direccional accionado según necesidad.



Ilustración 1 – Modelo paramétrico.

Material

La unidad es fabricada en su totalidad con chapa de acero al carbono IRAM/IAS-U-500-F26, cuyas propiedades mecánicas se establecen como sigue:

- ➔ Densidad: $\rho_{F26} = 7.850 \text{ kg/m}^3$
- ➔ Módulo de Young: $E = 207 \text{ GPa}$
- ➔ Resistencia ultima: $\sigma_U = 400 \text{ MPa}$
- ➔ Resistencia a fluencia: $\sigma_f = 250 \text{ MPa}$

Condiciones de vinculación

Para representar el apoyo sobre la quinta rueda o sobre la máquina tractora, se realizó un modelo esquemático de un plato de enganche al que se le asignó una restricción del tipo bisagra en los pasadores del mismo.



Ilustración 2 – Modelo de quinta rueda.

Lo que respecta al modelado de la suspensión, se obtuvo el dato de la constante elástica de la suspensión por ballestas y se asignó un vínculo elástico en cada uno de los apoyos de las manotas y en el aro de apoyo de la suspensión neumática direccional. El valor de rigidez elástica vertical empleada fue 730.000 N/m y para el valor de rigidez elástica lateral se buscó un valor elevado que establezca el modelo, resultado un valor $1.000.000 \text{ N/m}$.



Ilustración 3 – Vinculación elástica.

Cargas

Al igual que con las condiciones vínculo, los diferentes escenarios de carga variaron en cuanto a la carga aplicable, pero entre ellos hubo factores en común como, por ejemplo, la MAWP (Maximum Allowable Working Pressure) con un valor de 0,4 MPa y la forma en la que se modeló la carga hidrostática (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), es decir, a través de una presión no uniforme dependiente de la altura de la cisterna (h), de la aceleración de la gravedad (g) y de la densidad de la sustancia ($\rho_{\text{ácido}}$). De esta forma, la ecuación que gobierna la carga de ácido resulta:

$$P(h) = \rho_{\text{ácido}} \times g \times h$$

Por último, el Código establece distintos grados de aceleración y en diferentes direcciones para definir los diferentes escenarios de carga según se listan a continuación:

Caso	Requisitos
A	Carga vertical descendente (1g)
B	Carga de frenado/aceleración (1,35 veces WT) y carga transversal (1,20 veces WT), considerando sujeción en plato de enganche y tren rodante (B1a, B1b y B2).
C	Carga vertical descendente (2g), resistida por tren rodante y quinta rueda.
D	Cargas longitudinales de aceleración y frenado (1g).
E	Carga transversal (1g).
F	Carga longitudinal (2g).
G	Carga vertical ascendente (1g).
H	Presión interna de 0,21 MPa por 60 ms para verificar dispositivos de alivio de presión en cisterna.
I	Presión externa de 0,19 MPa (mínima presión externa permisible de cabezales toriesféricos).

Nota: en todos los escenarios (excepto el H e I) se aplicó una MAWP de 0,02 MPa en todos los compartimentos.

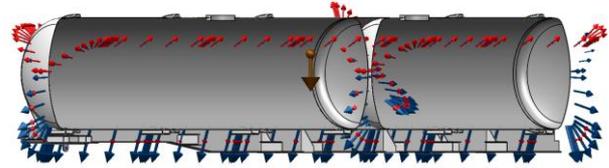


Ilustración 4 – Carga base.

Malla

Como el semirremolque es construido en su totalidad por chapa de acero al carbono, para el mallado se utiliza, en gran medida, elementos tipo Shell y controles de mallado en zonas que, luego de estudios preliminares, resultan estructuralmente críticas. Estos elementos bidimensionales tetraédricos de alto orden permiten obtener mallas más refinadas sin utilizar tantos recursos computacionales como en el caso de los elementos volumétricos. El resultado fue una malla de 1.292.605 nodos y 636.839 elementos.

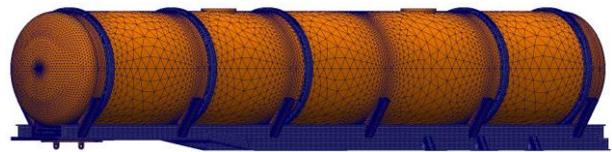


Ilustración 5 – Modelo mallado.

RESULTADOS

A modo de visualización del comportamiento de la unidad bajo carga, se muestran los estados tensionales y de desplazamiento referentes al caso A y caso H, los cuales son más representativo de sus condiciones de servicio.



Ilustración 6 – Tensiones de Von Mises → Caso A.

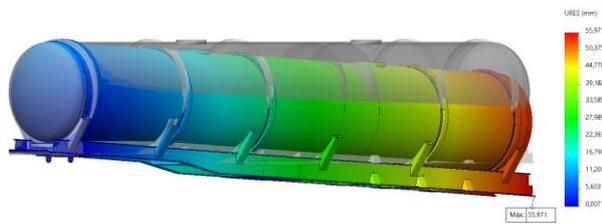


Ilustración 7 – Campo de desplazamientos (X10) → Caso A.

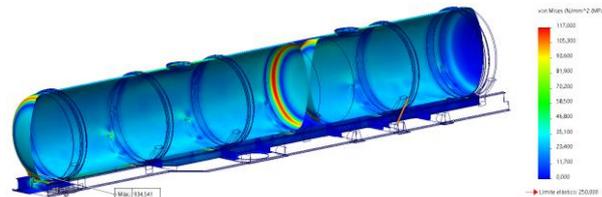


Ilustración 8 – Tensiones de Von Mises → Caso H.

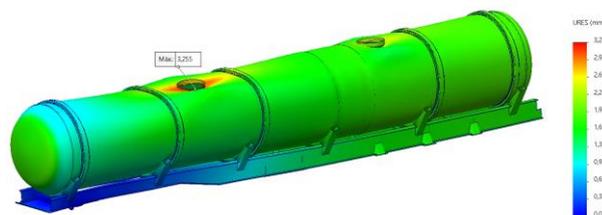


Ilustración 9 – Campo de desplazamientos (X100) → Caso H.

BIBLIOGRAFÍA

ASME - *Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks* - BPVC Section XII – New York.

ADR - *Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*.

IRAM/IAS U 500-42 – *Chapas de acero al carbono, laminadas en caliente, para uso estructural* – Argentina.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A pesar de las concentraciones de tensión antes dichas, el semirremolque presenta un comportamiento mayormente aceptable bajo las rigurosas condiciones del código ASME BPVC.

Los análisis estáticos y dinámicos demuestran la seguridad del diseño, incluso en presencia de las tensiones identificadas.

En conclusión, el análisis confirma la solidez general del diseño para el transporte de ácido clorhídrico bajo condiciones extremas, reforzando la confianza en la seguridad del semirremolque. No obstante, se sugieren futuros análisis de fatiga mecánica como así también incorporar el efecto de las soldaduras en la distribución de tensiones y la integridad estructural. Además, otros estudios adicionales sobre mecanismos de daño subcrítico, como la fisuración por corrosión bajo tensión, podrían proporcionar información valiosa.