



Estudio preliminar del comportamiento dinámico de un semirremolque cisterna ante perturbaciones impulsivas sobre sus ejes, en base a métodos numéricos

Facundo P. Inzeo^{a*}, Facundo Sosa^a, Bruno E. García^a, Giuliano T. Flores^a, Cristian P. Domínguez^a, Neoren G. Franco^a, Patricio G. Arrien^b, Walter F. Giordano^{a,b}

^a Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás, Av. Colón 332, San Nicolás de los Arroyos, 2900, Argentina.

^b Tanques Fangio SA, Ruta 32 km 2, Pergamino, B2700, Argentina.

*finzeo@frsn.utn.edu.ar

ABSTRACT

In a context of growing need to strengthen relations between productive and academic sectors to improve the socio-economic development of our country, and with the aim of providing solutions related to the optimization of mechanical designs, based on the use of potent computer software, this paper focuses on the general development of a representative model of a road tanker for the transport of liquid fuels, in terms of its dynamic response to short-term perturbation on its axes. For this, Matlab Simulink software is used, which is suitable for the development of a numerical model of the dynamic behaviour of the named object of study. Through the bond of mutual cooperation between the company Tanques Fangio SA, a tanker manufacturer located in Pergamino, Bs. As., and the UTN-FRSN, input data needed to perform the study is capable to be determined, and it is feasible to make a finite-element analysis (FEA) to obtain the global field of stresses and deformations of the structural part of the tanker, resulting from these disturbances.

This preliminary study aims to lay the foundations of a representative model of the tanker, whose design was provided by the company Tanques Fangio SA, feasible to be applied to similar vehicles and capable of providing significant data for subsequent analysis of vehicle components designs.

The obtaining of a representative model of the tanker will be verified, with relevant analysis and design information. Although its rigorous validation will be done in a future research work, an analysis of its representativeness will be performed here, through relevant reference data.

Keywords: tanker, model, Matlab, FEA, numerical.

RESUMEN

En un contexto de creciente necesidad de fortalecimiento de las relaciones entre los sectores productivo y académico para favorecer el desarrollo socio-económico del país, y con la finalidad de aportar soluciones relativas a la optimización de diseños mecánicos sobre la base de la utilización de herramientas computacionales, el presente trabajo se centra en el desarrollo general de un modelo representativo de un semirremolque cisterna para el transporte de combustibles líquidos, en términos de su respuesta dinámica ante perturbaciones de corta duración sobre sus ejes. Para ello, se recurre al software Matlab Simulink, idóneo para el desarrollo de un modelo numérico del comportamiento dinámico del objeto de estudio nombrado. A través del vínculo de cooperación mutua existente entre la empresa Tanques Fangio SA, de la ciudad de Pergamino, y la UTN-FRSN, se relevan y determinan los datos de entrada para dicho modelo, y se simula, a través de un análisis por elementos finitos (FEA), el campo global de tensiones y deformaciones resultantes de tales perturbaciones. Este estudio preliminar pretende sentar las bases de un modelo representativo del semirremolque cisterna, cuyo diseño fue provisto por la empresa Tanques Fangio SA, factible de aplicarse a vehículos similares y capaz de proveer datos significativos para posteriores análisis de diseños de componentes vehiculares.

Se verificará la obtención de un modelo representativo del semirremolque cisterna, con información de análisis y diseño relevante. Si bien su rigurosa validación se tratará en un futuro trabajo de investigación, se detallará aquí un análisis de su representatividad, a través de datos de referencia pertinentes.

Palabras Clave: semirreolque, cisterna, modelo, Matlab, FEA, numérico.



1. Introducción

1.1. Generalidades

La infraestructura sobre la que se sustenta la economía de todo país, entendida como el conjunto de medios técnicos y tecnológicos por medio de los cuales se desarrolla el conjunto de actividades económicas del mismo, presenta como eje fundamental el transporte de bienes y mercancías. En el caso particular de Argentina, así como para otros tantos países, se destaca la especial predominancia del transporte terrestre de bienes y, en particular, del transporte por camiones. En dicho contexto, resulta sumamente útil, en una visión global de la actividad universitaria y productiva, aunar esfuerzos para mejorar y optimizar diseños dentro de la extensa categoría de camiones. De aquí que el objetivo general de este trabajo consiste en mejorar, en su correspondiente cuota de beneficio, las condiciones del medio productivo nacional, desde el caso particular del vínculo establecido entre la empresa Tanques Fangio S.A. de la ciudad de Pergamino (orientada al diseño de tanques cisternas) y la UTN-FRSN. En concreto, dentro de una línea de investigación orientada al rediseño y optimización de componentes vehiculares estructurales de semirremolques cisternas, este trabajo se centra en la realización de un modelo numérico del comportamiento dinámico de un diseño de dicho vehículo (Fig. 1) ante perturbaciones impulsivas sobre sus ejes, obteniendo datos de interés para futuras investigaciones orientadas a la finalidad general de la línea de investigación, y comprobando la capacidad de resistencia estructural del semirremolque ante tales fenómenos, a través de un análisis por elementos finitos del tipo estático. Esta temática es de particular interés para la empresa nombrada, en vista de la optimización de estructuras portantes.

La utilización de herramientas computacionales en asistencia al análisis y diseño de componentes mecánicos, considerando el crecimiento exponencial de su potencialidad en diversidad de disciplinas (entre ellas, la ingeniería mecánica), resulta apropiada a las exigencias de la industria moderna y favorece la consecución de soluciones tecnológicas cada vez más próximas a las óptimas pertinentes. El tópico relativo al análisis computacional del comportamiento estructural de semirremolques, si bien se corresponde con una temática sumamente específica, cuenta con trabajos de investigación asociados. En el ámbito nacional, se destacan diversos artículos, entre los que se mencionan los publicados por Monti, Rossi et al [1], y Frank, Gennaro et al [2], ambos vinculados a la Asociación Argentina de Mecánica Computacional. En estos trabajos, se analiza el comportamiento del sistema estructural de un semirremolque, enfocado en la realización o ejecución de análisis por elementos finitos para evaluar su resistencia ante cargas estáticas y dinámicas, con una metodología de validación adecuada; sin embargo, en ninguno de los dos casos se consideró el escenario asociado a la interacción con una irregularidad macrogeométrica en el terreno, vinculada a una perturbación impulsiva sobre los ejes del vehículo. Para ello, es necesario desarrollar un modelo matemático de la suspensión de aquel, y evaluar con este el comportamiento ante tales factores externos. Diversos son los estudios sobre tal tópico; en un análisis simple, sin recurrir a métodos numéricos para la determinación de fuerzas de reacción variables en el tiempo, cabe mencionar el trabajo de Godoy Martos [3] quien, entre los diversos cálculos asociados al diseño de una plataforma de carga, involucra un breve análisis del comportamiento de tal estructura ante una irregularidad en el terreno. Considerando un enfoque más riguroso y ligado al objetivo del presente trabajo, se destaca el realizado por Mula Vivero [4] quien, de forma análoga, recurre al software Matlab para analizar tal comportamiento dinámico, si bien no realiza un posterior análisis por elementos finitos para determinar la resistencia satisfactoria del diseño pertinente.



Figura 1 – Modelo de semirremolque cisterna construido por la empresa Tanques Fangio SA, objeto de estudio del presente trabajo.



1.2. Objetivo y comentarios generales del objeto de estudio

El presente propone combinar las herramientas de modelización matemática del comportamiento dinámico, y la determinación del campo de tensiones asociado a una perturbación impulsiva sobre los ejes de un semirremolque, para garantizar una base de análisis del comportamiento estructural de tales vehículos ante dichos fenómenos. Para ello, se utilizará como base un modelo de semirremolque cisterna construido de aleación de aluminio, diseñado por la empresa anteriormente nombrada, cuyos detalles dimensionales y de particionado generales se muestran en las Figs. 2(a)-(c). El vehículo, diseñado para el transporte de combustibles líquidos (específicamente, nafta y gas-oil) es del tipo tronco-cónico y recto combinado, presentando una sección transversal variable de tramos circulares. Cuenta con siete compartimientos internos, separados por tabiques y, en algunos de ellos, para minimizar los efectos asociados al oleaje o *sloshing*, rompeolas. Siendo el tanque propiamente dicho, íntegramente, de aleación de aluminio 5182 (de excelentes propiedades de resistencia y deformabilidad), la estructura portante inferior se corresponde con aluminio 6061, estando constituida por elementos de refuerzo inferiores y laterales, además del falso chasis, que favorecen la adecuada distribución de la carga y rigidizan la propia estructura autoportante del tanque. Al conjunto estructural anteriormente nombrado, se suman otros subsistemas vehiculares, tales como la suspensión, el sistema de flujo del combustible correspondiente a la carga, el cableado pertinente y los elementos de seguridad, entre otros. En cuanto a su apoyo, se encuentra vinculado a una unidad tractora por medio de la denominada quinta rueda, y presenta, sobre su parte trasera, tres ejes en tándem (trídem).

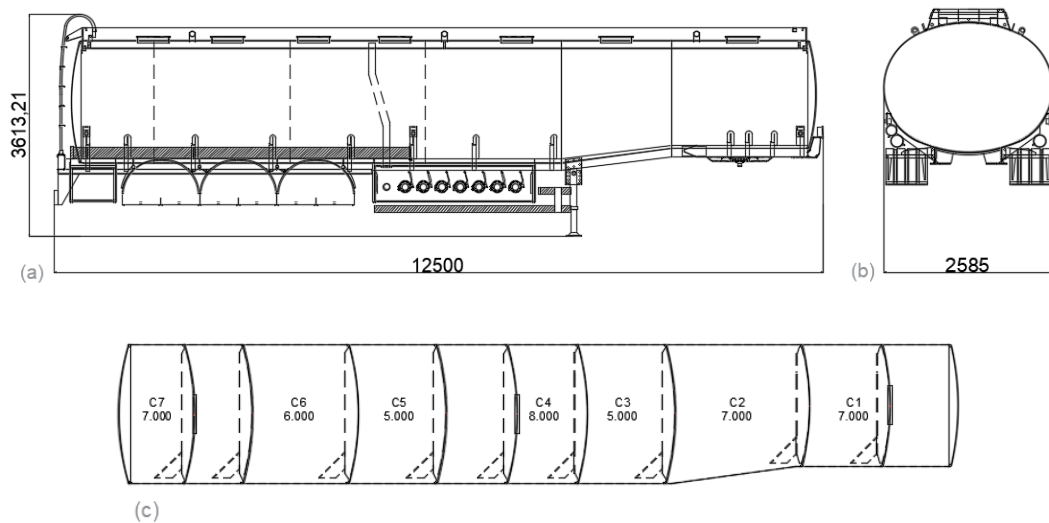


Figura 2 – (a) Vista lateral general del semirremolque cisterna; (b) vista trasera general del semirremolque cisterna; (c) particionado del tanque cisterna.

1.3. Software utilizado

En cuanto a las herramientas computacionales utilizadas, cabe destacar que Matlab Simulink es un entorno de programación gráfico, que funciona sobre el lenguaje de programación Matlab, constituyéndose en un software de modelización, simulación y análisis de modelos o sistemas físicos, con un enfoque sistémico, ampliamente utilizado en diversas disciplinas dentro de la ingeniería, así como en otros campos científicos y tecnológicos. Su facilidad de utilización se combina con la potencialidad del lenguaje asociado a Matlab, para poder representar sencilla y rigurosamente diferentes sistemas y fenómenos físicos. Por su parte, SolidWorks es un software CAD/CAE, esto es, orientado tanto al diseño como a la ingeniería asistida por computadora, que en el trabajo que se muestra se utilizó para la realización del modelo 3D del diseño planteado, y el posterior análisis por elementos finitos, de carácter estático, para la determinación de la capacidad de resistir ante las solicitaciones previamente mencionadas.



1.4. Estructuración

En relación a la estructura del artículo, en primer término, se procederá a explicar la metodología de determinación, relevamiento y/o estimación de los parámetros involucrados en el modelo matemático. Posteriormente, se detallará lo relativo a la programación bajo entorno gráfico de dicho modelo. Una vez registradas las solicitaciones resultantes de las perturbaciones impulsivas, se exportarán, como dato de entrada, para la realización de un análisis por elementos finitos, del tipo estático, según se explicó previamente. Finalmente, se dedicará una sección para el análisis y discusión de los resultados, la cual se conjuga con el análisis de la representatividad del modelo.

2. Metodología

2.1. Determinación de los parámetros asociados al modelo matemático y conceptualización

La ejecución del modelo matemático requiere de la determinación de los valores de diferentes parámetros relativos al diseño del semirremolque cisterna; en concreto, las variables asociadas a la geometría, masa y vinculación entre elementos constitutivos. En términos generales, se establecerá una discretización del sistema vehicular, reduciéndose a un conjunto de cuerpos rígidos vinculados entre sí a través de elementos dotados de cierta rigidez y amortiguamiento, pero para ello, es necesario determinar las masas, momentos de inercia y dimensiones relevantes de dichos cuerpos rígidos, así como las características de rigidez y amortiguamiento de los vínculos entre aquellos.

La metodología general de dicha determinación se basa en el relevamiento de la información técnica provista por la empresa Tanques Fangio SA, a partir de la cual se obtienen directamente los datos a utilizar, o bien, aquellos necesarios para el cálculo y/o estimación de los requeridos.

A partir de un análisis teórico global del problema, en conjunción con posteriores revisiones de los datos requeridos, en función de desarrollos parciales del modelo matemático, se determinaron los valores de los parámetros presentados en la Tabla 1.

Tabla 1 – Parámetros de diseño requeridos para la ejecución del modelo matemático.

Variable	Valor	Unidad
Masa del conjunto del tanque y su estructura soporte (CR ₁)	40822	kg
Masa de cada eje (CR ₂) con sus respectivas ruedas (CR ₃)	893	kg
Distancia entre ejes	1,26	m
Distancia lateral entre centros de masa de ruedas	1,903	m
Distancia entre el centro de gravedad de CR ₁ y el eje delantero	1,83	m
Momento de inercia del CR ₁ respecto al eje X	446876	kg . m ²
Momento de inercia del CR ₁ respecto al eje Y	26638	kg . m ²
Momento de inercia del CR ₁ respecto al eje Z	453639	kg . m ²
Momento de inercia del conjunto CR ₂ + CR ₃ respecto al eje X	468	kg . m ²
Momento de inercia del conjunto CR ₂ + CR ₃ respecto al eje Y	468	kg . m ²
Momento de inercia del conjunto CR ₂ + CR ₃ respecto al eje Z	41	kg . m ²
Constante de rigidez equivalente del neumático	1,021 . 10 ⁶	N . m ⁻¹
Constante de amortiguamiento equivalente del neumático	4803	N . s . m ⁻¹
Constante de rigidez equivalente de la suspensión de un eje	3,049 . 10 ⁵	N . m ⁻¹
Constante de amortiguamiento equivalente de la suspensión de un eje	5249	N . s . m ⁻¹
Constante de rigidez equivalente asociada al vínculo entre CR ₁ y CR ₂	2,860 . 10 ⁶	N . m ⁻¹
Constante de amortiguamiento equivalente asociada al vínculo entre CR ₁ y CR ₂	1626	N . s . m ⁻¹



Debe aclararse que las notaciones CR_1 , CR_2 y CR_3 se corresponden con la designación abreviada de los cuerpos rígidos indicados, según cada caso, en la Tabla 1, los cuales, en conjunto, conforman el sistema vehicular en estudio.

Cabe mencionar que, en el planteamiento teórico del modelo, se establecen ciertas simplificaciones útiles y adecuadas, tales como la consideración de tres categorías de cuerpos rígidos (estos constituyen un sistema físico representativo que, en términos rigurosos, en la realidad, es deformable, según infinitos grados de libertad); la simetría longitudinal del sistema vehicular (si bien el conjunto estructural, en términos del diseño teórico, verifica dicha simetría, la consideración de los restantes elementos del semirremolque anulan tal rigurosidad de la condición de simetría); la linealización de la rigidez y el amortiguamiento de los vínculos entre los cuerpos rígidos, entre otras. El trabajo realizado por Mula Vivero [4] tiene en cuenta la primera y tercera de estas simplificaciones, obteniendo resultados satisfactorios; en cuanto a la condición de simetría, el desvío se juzga irrelevante, teniendo en cuenta, como principal factor de análisis, que la masa de los elementos categorizados como accesorios, principales causantes de dicha desviación, representan aproximadamente el 2,3 % de la masa total del vehículo; además, las simulaciones por elementos finitos realizadas sobre el modelo completo del semirremolque no verifican diferencias apreciables con respecto al modelo asociado a una mitad simétrica del mismo.

La perturbación impulsiva sobre una rueda determinada de un eje se modeliza a través de un desplazamiento instantáneo de la misma, en dirección vertical. Esta condición nos permite obtener, desde un enfoque conservador, una carga máxima de reacción superior a la que se verificaría en términos reales, dado el transcurso de un determinado intervalo de tiempo para la realización de dicho desplazamiento. Esta simplificación se fundamenta, entonces, en el carácter conservador de la misma. Se plantearán valores típicos, correspondientes a 25 mm, 50 mm, 75 mm y 100 mm, a partir de los cuales se extrapolan los resultados asociados a posibles valores superiores. La perturbación se considera aplicada sobre una de las ruedas del eje trasero del vehículo, considerando que, de acuerdo a la experiencia de la empresa Tanques Fangio SA, es la que ha traído mayores inconvenientes de fallas asociadas, juzgadas como causa, en parte, de este fenómeno.

2.2. Desarrollo del modelo matemático en Matlab Simulink

Consolidados los datos de variables de diseño relevantes, se procedió a elaborar el programa asociado al modelo de comportamiento dinámico del semirremolque cisterna en estudio, bajo el entorno de programación gráfico brindado por el software Matlab Simulink. Concretamente, el proceso de programación consiste en definir bloques con propiedades y características específicas, y sus vínculos, conformando así el denominado diagrama de bloques del programa, el cual se traduce, en un lenguaje de menor nivel, en líneas de código Matlab. En líneas generales, a través de dicha red gráfica de bloques, se vinculan ecuaciones de la mecánica clásica asociadas al comportamiento global de los cuerpos involucrados.

Estrictamente, se definieron, primeramente, módulos de entrada, asociados a la carga de los datos relevados en la sección anterior. Vinculados estos a los bloques representativos de los cuerpos rígidos nombrados, mediante otros bloques y relaciones representativas de los vínculos físicos entre ellos, se ensamblan las ecuaciones de movimiento individuales, a partir de las cuales, mediante la definición de módulos de salida, es posible obtener información tal como posiciones, velocidades, aceleraciones y fuerzas en función del tiempo, en diferentes posiciones del modelo.

Como ejemplo de comprensión del desarrollo de la programación, se muestra, en la Fig. 3, la parte del diagrama de bloques representativa del vínculo entre un eje (CR_2) y el conjunto del tanque cisterna y su estructura soporte (CR_1). En la imagen, se puntualiza sobre los bloques asociados a tales cuerpos, y los correspondientes a la definición de los grados de libertad relativos, la rigidez y la amortiguación asociada a su vínculo (suspensión).

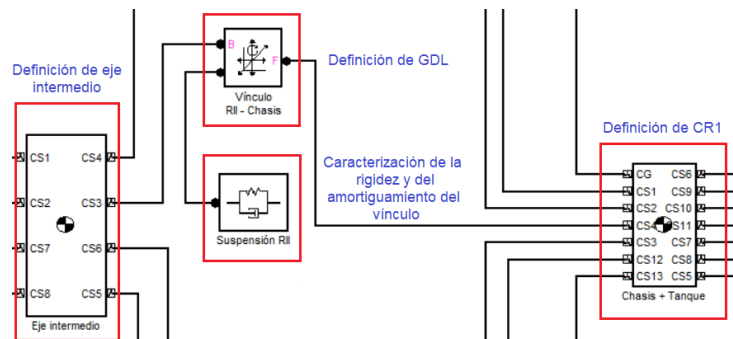


Figura 3 – Parte del diagrama de bloques asociada a la definición de la relación física entre CR_1 y CR_2 .

La definición del conjunto de bloques utilizados resulta prohibitiva, en términos de la extensión requerida de este artículo. Se limita, a continuación, a presentar una vista global en miniatura de la red de bloques completa, con el único fin de ilustrar la extensión del programa (Fig. 4).



El solver utilizado es el denominado ode45, el cual recurre a los métodos de Runge-Kutta para la resolución de las ecuaciones involucradas en el programa.

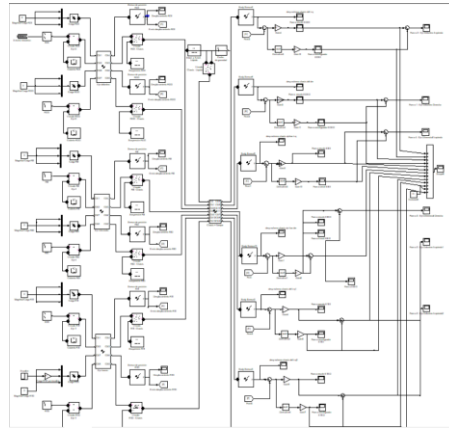


Figura 4 – Vista en miniatura de la red de bloques completa, correspondiente al modelo matemático del comportamiento dinámico del semirremolque cisterna en estudio.

Mediante su ejecución, es posible determinar la fuerza de reacción sobre la rueda perturbada en función del tiempo, entre otros parámetros dinámicos de interés.

2.3. Desarrollo del análisis por elementos finitos (FEA), de verificación estructural

Una vez extraídos los valores máximos de las cargas, éstos pueden exportarse para la realización de un análisis por elementos finitos que tenga en cuenta, por un lado, las solicitaciones de la carga a transportar (asociada a un campo de presiones con una distribución lineal), y por el otro, la reacción sobre la rueda afectada.

Previamente a la ejecución del análisis propiamente dicho, se procedió a la realización de un adecuado pre-procesamiento, correspondiente al acondicionamiento de la geometría del modelo 3D provisto por la empresa Tanques Fangio, la definición de los materiales pertinentes, la aplicación de las cargas anteriormente especificadas, la consideración de vínculos representativos entre los elementos constitutivos del sistema vehicular y de apoyos igualmente proyectados a los reales, la definición de una malla con una calidad adecuada (a partir del análisis de la relación de aspecto y la distorsión de los elementos), y la elección de un solver adecuado, acorde a las prestaciones del hardware utilizado (concretamente, se recurrió a un solver iterativo). En cuanto a la discretización, debe destacarse que se planteó la utilización de una malla mixta (bidimensional, para aquellos elementos de espesor delgado, y tridimensional, para el resto de los componentes, correspondientes a elementos triangulares cuadráticos y tetraédricos cuadráticos, respectivamente).

Debe tenerse en cuenta que la presión considerada, de acuerdo a la norma técnica europea de referencia, EN 13.094, se distribuye linealmente, con un máximo de 69,914 kPa sobre la parte inferior del tanque, correspondiente a la presión de prueba del mismo, calculada a partir de la densidad del líquido transportado, su presión de vapor, la profundidad máxima del tanque y la presión de apertura de la válvula de alivio. Por otra parte, en relación a la carga ejercida sobre la rueda, ésta se modeliza, preliminarmente, a través de una carga estática remota, aplicada sobre la zona de apoyo de las manotas sobre el chasis, de magnitud igual al valor máximo de reacción registrado numéricamente. En contraposición a la fuerza efectivamente desarrollada en la rueda involucrada, variable y de menor amplitud, la carga estática críticamente alta considerada supone un criterio de análisis conservador y sumamente simplificador (de aquí su justificación). Esto lleva a que el análisis por elementos finitos desarrollado sea de carácter estático (a diferencia del estudio dinámico previo).

Posteriormente, se ejecutó el análisis pertinente, obteniéndose resultados relevantes asociados a la capacidad de resistencia del conjunto estructural ante tales solicitaciones.

3. Analisis y discusión de los resultados

En lo relativo al modelo matemático del comportamiento dinámico del semirremolque cisterna, se obtuvieron, en términos amplios, los valores de posición, velocidad, aceleración y fuerza neta sobre cada rueda y sobre cada centro de gravedad de los cuerpos definidos, en función del tiempo, para cada desplazamiento instantáneo definido. Estrictamente, en términos del objetivo del presente trabajo, se logró registrar la fuerza de reacción sobre la rueda perturbada, en función del tiempo, y específicamente, su valor de pico (Fig. 5).

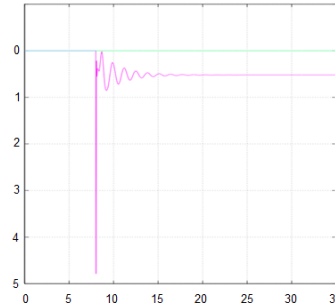


Figura 5 – Variación en función del tiempo de la fuerza neta sobre la rueda perturbada (rueda trasera derecha) (escala horizontal: s; escala vertical: 10⁴ N).

En términos del análisis de la representatividad del modelo estudiado, cabe destacar que se obtienen resultados acordes con la experiencia práctica y en correspondencia con lo establecido en diferentes bibliografías. De acuerdo a la gráfica de posición en función del tiempo del centro de gravedad del vehículo, se registra un período de oscilación de 1,36 s, muy próximo al establecido en la bibliografía asociada al tema para tanques con geometría similar (se supuso un valor de 1,4 s para el cálculo de la constante de amortiguamiento del vínculo entre CR₁ y CR₂), y un cese de variaciones perceptibles luego de aproximadamente 2,37 segundos como media para los diferentes escalones, lo cual se condice aproximadamente con la experiencia cotidiana.

En la Tabla 2 se registran los valores de pico de la reacción anteriormente nombrada, obtenidos para diferentes desplazamientos instantáneos de la rueda perturbada.

Tabla 2 – Reacciones máximas sobre la rueda perturbada, para diferentes desplazamientos instantáneos.

Desplazamiento (mm)	Valor	Unidad
25	11980	N
50	23928	N
75	35898	N
100	47862	N

A partir de los datos de la tabla anterior, es posible obtener la siguiente ecuación lineal (Ec. 1) de estimación de la carga máxima, válida exclusivamente para el modelo estudiado, en función del desplazamiento instantáneo considerado (en la misma, el desplazamiento se considera en milímetros, y la fuerza, en newtons).

$$F = 478,46 \Delta L + 16 \text{ (N)} \quad (1)$$

En lo que respecta al análisis por elementos finitos, objetivo secundario de este trabajo, en términos de verificar la adecuada resistencia del conjunto estructural, y desde el enfoque conservador de considerar la carga pico de reacción pertinente a un desplazamiento de 200 mm, los resultados obtenidos son satisfactorios, reduciéndose lo más relevante de estos a lo presentado en la Fig. 6 y en la Tabla 3.

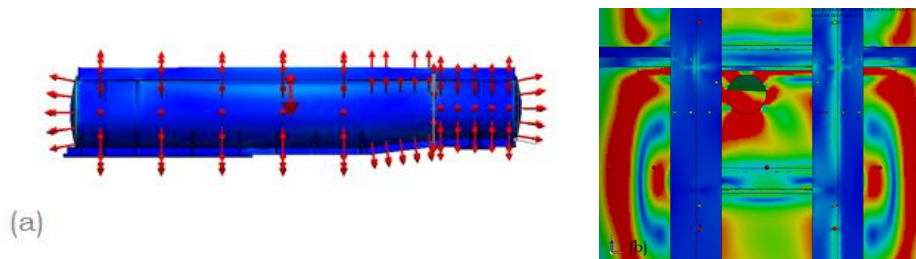


Figura 6 - (a) vista del campo de tensiones global del conjunto estructural; (b) detalle del campo de tensiones localizado en la zona de la perturbación (vista inferior).



Tabla 3 – Resultados relevantes del análisis por elementos finitos.

Parámetro	Valor	Unidad
Tensión de Von Mises máxima	95,6	MPa
Tensión de Von Mises media	20,87	MPa
Tensión de Von Mises máxima en zona próxima a la perturbación	42,10	MPa
Desplazamiento máximo (URES)	5,52	mm
Coficiente de seguridad local	3,68	-

En términos de su validación, se recurrió a la utilización del ejemplo asociado a un recipiente sometido a presión, provisto por la biblioteca del software SolidWorks. En el mismo, a partir de la modificación de la geometría por defecto en la correspondiente al tanque cisterna, sometiéndolo a las presiones consideradas en el anterior análisis, y con un mallado análogo, se obtuvo un valor de tensión media de 18,59 MPa. Considerando la proximidad entre los valores de dicho parámetro para ambos casos de estudio, y teniendo en cuenta la verificación de un valor necesariamente mayor para el primer caso, en correspondencia con la aplicación de la carga sobre la rueda, se juzga una modelización idónea del tanque.

4. Conclusión

La metodología desarrollada en el presente trabajo ha permitido obtener un modelo preliminar provisoriamente confiable y representativo del comportamiento dinámico-estructural del diseño de semirremolque cisterna considerado, de acuerdo al análisis de representatividad correspondiente. En efecto, se ha obtenido, a partir de herramientas computacionales, información confiable y sumamente útil para el análisis del diseño del vehículo nombrado, fácilmente aplicable a otros similares. Asimismo, se ha calculado una satisfactoria resistencia del conjunto estructural ante las perturbaciones indicadas.

La estricta validación de los resultados se conviene en realizar, como se comentó previamente, en futuros trabajos de investigación, asociados a cálculos analíticos y/o estudios empíricos de contrastación. De igual manera, la consideración de una carga estática críticamente alta, si bien ha permitido simplificar y establecer un criterio más conservador de análisis que una eventual representación más aproximada del comportamiento dinámico de dicha fuerza, se pretende modificar en futuros trabajos, tendiendo a la aplicación de condiciones de cargas más representativas de las reales. Aun así, en base al análisis detallado de los resultados, se considera, provisoriamente, la obtención de un modelo matemático confiable.

Agradecimientos

Los autores agradecen la significativa y solidaria colaboración de la empresa Tanques Fangio SA de la ciudad de Pergamino, provincia de Buenos Aires, por los datos técnicos y modelos aportados; de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional, por el soporte financiero al proyecto de código TVUTNSN0004419, designado "Análisis de fallas en semirremolques cisternas construidos en aleaciones de aluminio", y de la investigadora Ing. Marta G. Caligaris, por su aval y apoyo al grupo de investigación Gemeco (Grupo de Estudio de Mecánica Computacional).

Referencias

- [1] Monti Juan E., Rossi Sebastián, Eliach Jorge J. and Bourges Gastón, "Análisis del comportamiento mecánico estructural de un prototipo de semirremolque sometido a carga estática vertical", *Mecánica Computacional Vol XXXV*, 2245-2259, (2017).
- [2] Franck Gerardo, Gennaro Sergio, Lonardi Bruno, Eichborn José and Bruno Alejandro, "Análisis dinámico de un chasis de semirremolque de servicio pesado", *Mecánica Computacional Vol XXVIII*, 503-517, (2009).
- [3] Godoy Martos José A., "Diseño, cálculo y dimensionado de una plataforma de carga de 17 T", *Escuela Politécnica Superior de Linares, Universidad de Jaén*, (2016).
- [4] Mula Vivero Iván, "Estudio del comportamiento dinámico de un vehículo utilizado la herramienta semmechanics de Matlab", *Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid*, (2009).