

APPLICATION OF A NOVEL METHODOLOGY IN THE DESIGN OF A NEW MODEL OF SEMITRAILER

Malón Litago, Hugo

Universidad de Zaragoza

Until recently, the design of new models of semitrailer has been performed based on the experience of the manufacturers of such vehicles.

In the last five years the Department of Mechanical Engineering of the University of Zaragoza has developed a novel methodology for the semitrailers design. This methodology combines numerical analysis based on the Finite Element Method and experimental techniques in bench testing for semi-trailers. The methodology developed allows obtain new designs of semi-trailers, which have been optimized fulfilling to criteria of rigidity, resistance and fatigue. In addition the application of this methodology in the design of new vehicles reduces the necessary time to launch onto the market the new models of semitrailers.

The objective of this article is to apply the developed methodology in the design of a new model of semi-trailer, specifically in a semitrailer with a reduction of the web height of the longitudinal beams on the King-pin area. This new design stems from the interest of the company LECITRAILER to standardize the components of the King-pin area in several models of semi-trailers.

Keywords: *Design; Fatigue; Rigidity and resistance; Semitrailer; MEF; Experimental test*

APLICACIÓN DE UNA NOVEDOSA METODOLOGÍA EN EL DISEÑO DE UN SEMIREMOLQUE DE CUELLO REDUCIDO

Hasta fechas recientes el diseño de nuevos modelo de semirremolques se ha realizado basándose fundamentalmente en la experiencia de los fabricantes de este tipo de vehículos. En el último lustro el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza ha desarrollado una novedosa tecnología para el diseño de semirremolques. Esta metodología combina el análisis numérico basado en el Método de los Elementos Finitos, con técnicas experimentales en banco de ensayos para semirremolques. La metodología desarrollada permite obtener nuevos diseños de semirremolques, los cuales han sido optimizados según criterios de rigidez, resistencia y fatiga. Además al aplicar esta metodología en el diseño de nuevos vehículos se consigue una reducción tiempo necesario antes de poder lanzar el nuevo modelo al mercado.

El objetivo del artículo consiste en aplicar la metodología desarrollada en el diseño de un nuevo modelo de semirremolque, al cual se ha reducido la altura del alma de los largueros en la zona del King-pin. Este nuevo diseño surge del interés de la empresa LECITRAILER S.A. de estandarizar los componentes de esta zona del vehículo en varios modelos de semirremolques.

Palabras clave: *Diseño; Fatiga; Rigidez; Resistencia; Semirremolque; MEF; Ensayo experimental*

Correspondencia: hml@unizar.es

1. Introducción

Hasta hace un par de décadas el diseño de nuevos modelos de semirremolques se ha realizado basándose fundamentalmente en la experiencia de los fabricantes de este tipo de vehículos.

En la actualidad el principal reto al que se enfrentan los fabricantes de vehículos pesados en general, y de semirremolques en particular, es la reducción de la tara del vehículo, para lo cual la metodología basada en la experiencia no es eficiente.

La aplicación de técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos ha permitido revolucionar la industria de los semirremolques, consiguiendo grandes reducciones de masa mientras se cumplían los criterios de rigidez y resistencia impuestos (Carrera, 2006). Este proceso de optimización se fundamenta en la reducción de las secciones resistentes en el proceso de optimización, lo que origina la aparición de un fenómeno inexistente en este tipo de vehículos, el fallo por fatiga, frenando el desarrollo de nuevos conceptos de semirremolques

En el último lustro en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza se ha desarrollado una novedosa metodología para el diseño de semirremolques (Malón, 2010), la cual combina el análisis numérico basado en el Método de los Elementos Finitos, con técnicas experimentales en banco de ensayos para semirremolques.

La metodología desarrollada permite obtener nuevos diseños de semirremolques, los cuales han sido optimizados según criterios de rigidez, resistencia y fatiga.

En la actualidad no hay conocimiento de la existencia de ningún fabricante de semirremolques que introduzca criterios de fallos por fatiga en el diseño de sus prototipos, a excepción de la empresa LECITRAILER S.A., la cual en continua colaboración con el grupo de investigación "Nuevas Tecnologías en Vehículos Seguridad Vial" (VEHIVIAL), aplica la novedosa tecnología en sus nuevos modelos de semirremolques.

Además al aplicar esta metodología en el diseño de nuevos vehículos se consigue una reducción tiempo necesario antes de poder lanzar el nuevo modelo al mercado, ya que no son necesarios los periodos de prueba en pista o bien en la propia empresa de los prototipos. Con la nueva metodología el ensayo de los prototipos se realiza en banco de ensayos, lo que supone una reducción del tiempo necesario para asegurar el buen comportamiento del semirremolque antes de su lanzamiento definitivo al mercado.

En los siguientes puntos se muestra la aplicación de la metodología desarrollada en el diseño de un semirremolque de cuello reducido.

2. Objetivo

El principal objetivo del artículo es mostrar la aplicación de la novedosa metodología desarrollada en el diseño de un modelo de semirremolque, al cual se ha reducido la altura del alma de los largueros en la zona del King-pin.

Con este fin se mostrará en el artículo los resultados obtenidos en las dos fases de la metodología, las cuales son el análisis y la optimización del modelo mediante técnicas numéricas y la validación mediante ensayo experimental de prototipos

La aplicación de la metodología desarrollada permitirá obtener y validar un nuevo producto de forma óptima solventando las limitaciones y problemas que presentan los métodos actuales, fundamentados en criterios de rigidez y resistencia exclusivamente.

3. Análisis numérico del chasis de semirremolque

La primera fase de la metodología desarrollada consiste en el análisis numérico mediante el Método de los Elementos Finitos del modelo a estudiar.

El análisis numérico mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) es una técnica aplicada frecuentemente en el análisis estructural de chasis de semirremolques, camiones, maquinaria y aperos agrícolas (Beermann, (1984); Karaoglu & Kuralay, (2002); Cappello et al, (2005); Li et al, (2007); Carrera et al, (2010); Miralbes & Castejon, (2010); Deng et al, (2011); Hoefinghoff et al, (2011); Miralbes, Malon & Castejon (2012); Vidal et al, (2011).

En la mayoría de las ocasiones los criterios empleados en la optimización de estructuras mediante el MEF se fundamenta exclusivamente en criterios de rigidez y resistencia. En la metodología aplicada a este estudio también se incluye el criterio de fallo por fatiga, el cual se realiza utilizando una subrutina FORTRAN implementada con este fin, la cual estima la vida a fatiga de estructuras metálicas.

3.1 Modelo de elementos finitos

EL modelo de semirremolque analizado ha sido proporcionado por la empresa LECITARILER S.A. mediante un archivo con soporte informático. El vehículo corresponde a una modificación de un semirremolque de tres ejes actual, al cual se reduce la altura de las almas de los largueros en la zona del King-pin. La modificación está fundamentada en la estandarización de las zonas del King-pin de los diferentes modelos de semirremolque que la empresa oferta.

El modelo numérico del semirremolque, figura 1, consta de 82.512 nodos y 99.009 elementos. En la discretización del modelo se han empleado principalmente elementos tipo "Shell", empleándose elementos volumétricos en la discretización del suelo de madera del vehículo.

Con el fin de facilitar el posterior análisis según el criterio de fatiga, en el modelo se han discreteado las uniones por soldadura, distinguiéndose tres zonas afectadas térmicamente, una zona bajo la soldadura y el cordón de soldadura.

Los materiales empleados en el análisis numérico basado en el Método de los Elementos Finitos han sido proporcionados por el fabricante de semirremolques, obteniendo las características mecánicas de los mismos mediante ensayos de tracción y dureza.

3.2 Casos de carga y condiciones de contorno

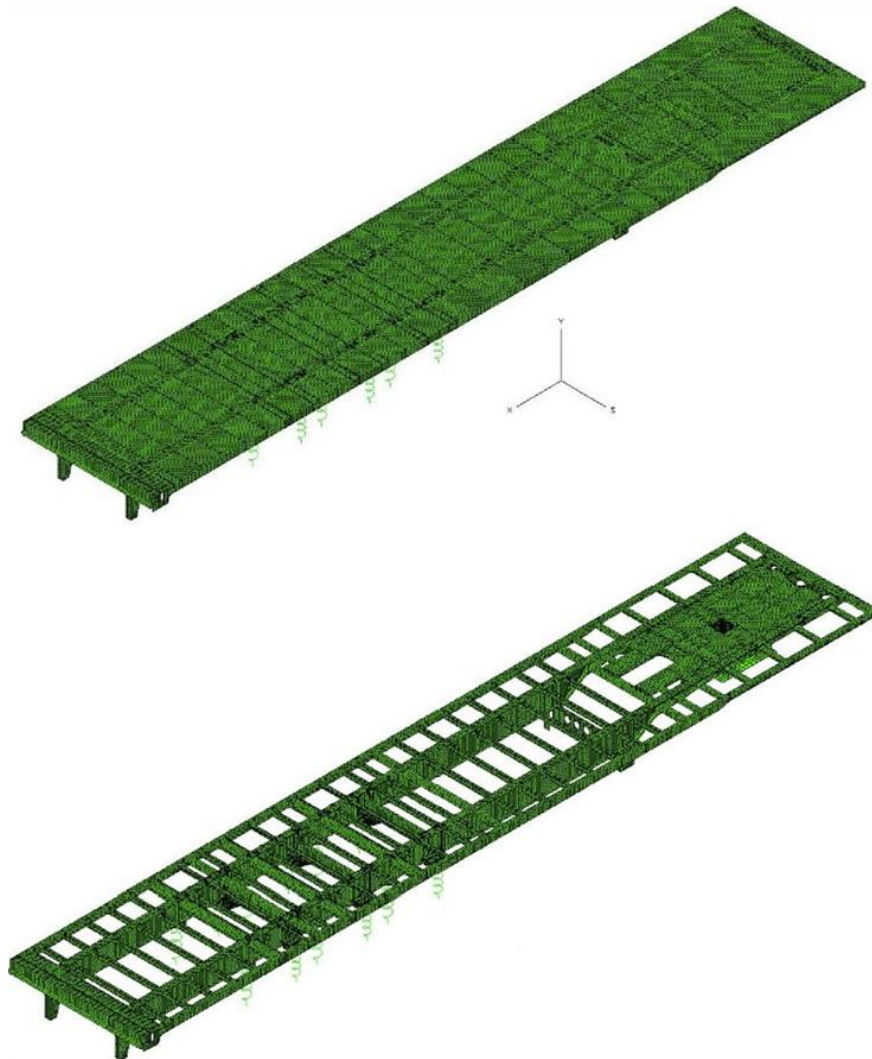
Al aplicar la metodología desarrollada se han analizado las maniobras de "reposo", "giro de radio mínimo" y "maniobra de análisis de fatiga".

En estudios previos se ha demostrado que la maniobra crítica para semirremolques de tres ejes corresponde a al "giro de radio mínimo", maniobra en la cual la cabeza tractora tira del semirremolque mientras esta girada un ángulo de 90° respecto del mismo. (Miralbes, 2008)

La maniobra "reposo" es una maniobra necesaria para poder obtener las reacciones en cada una de las seis ruedas y el King-pin del vehículo. A partir de estas reacciones se introducirán una serie solicitaciones transmitidas al chasis del vehículo mediante un sistema de fuerza-par equivalente.

La "maniobra de fatiga" corresponde al perfil de fatiga desarrollado en el grupo de investigación VEHIVIAL (Malon, Tello & Martin. 2010 & 2011) para el análisis de fatiga en banco de ensayos de semirremolques de tres ejes. En esta maniobra se busca la máxima torsión en el chasis del vehículo, sin llegar a producir el deslizamiento de ninguna de las ruedas del semirremolque. En este caso las solicitaciones en el cálculo se introducen como desplazamientos en cada una de las ruedas del vehículo y en el King-pin del mismo.

Figura 1: Modelo numérico del semirremolque



La carga que transporta el semirremolque en los casos analizados se realiza mediante 8 bloques de carga de 4t cada uno distribuidos a lo largo de estructura del semirremolque, los cuales reproducen los bloques de carga colocados en el prototipo a ensayar en el banco de ensayos.

A fin de reproducir el correcto acople del semirremolque con la quinta rueda de la cabeza tractora, o de la mesa del banco de ensayos, se ha discretizado una quinta rueda. A este componente se le ha permitido los giros que posee en la realidad, $\pm 15^\circ$ en dirección transversal y $\pm 5^\circ$ en dirección longitudinal.

3.3 Resultados numéricos según criterios de rigidez y resistencia

Realizados los cálculos numéricos de las maniobras a estudiar del semirremolque se procede a analizar según criterios los de rigidez y resistencia empleados normalmente los resultados obtenidos mediante el Método de los Elementos Finitos.

Las figuras 2 y 3 muestran las tensiones equivalentes de Von Mises y los desplazamientos verticales obtenidos del caso de carga “giro de radio mínimo”.

Figura 2: Tensiones equivalentes de Von Mises en el caso de carga “giro de radio mínimo”

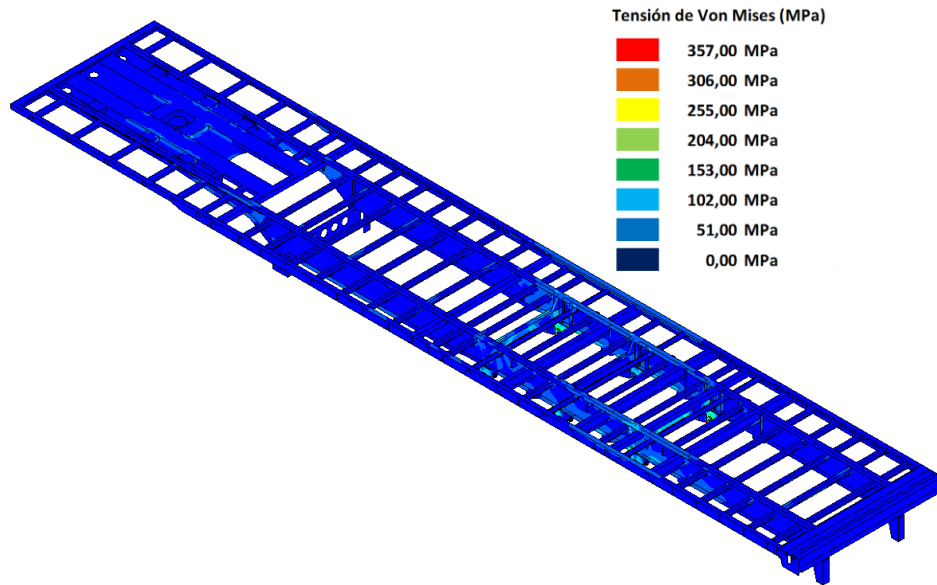
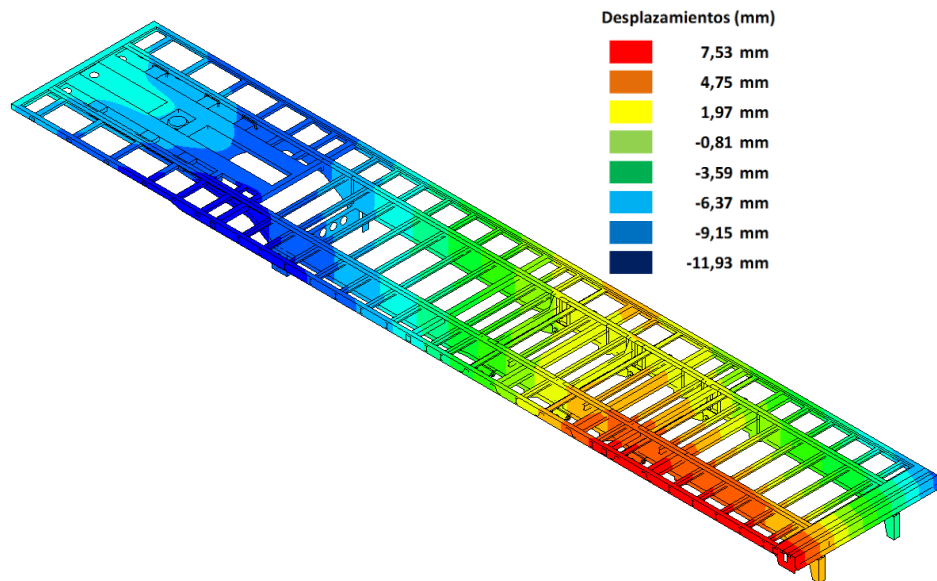


Figura 3: Desplazamientos verticales en el caso de carga “giro de radio mínimo”

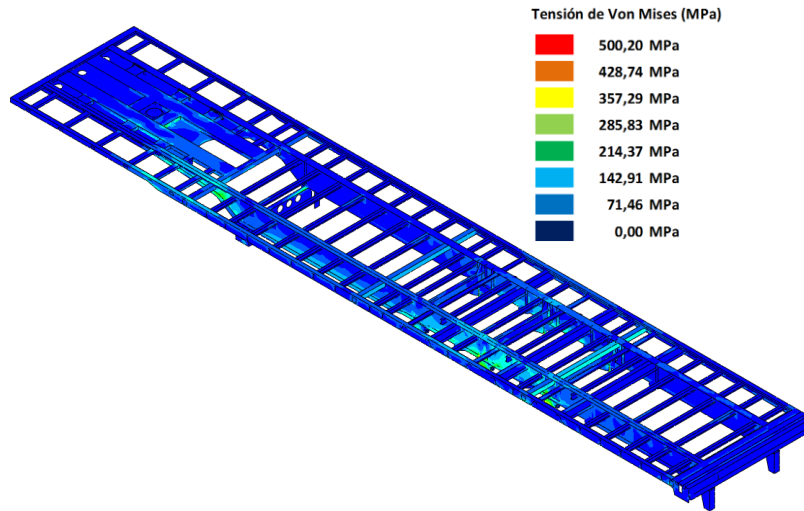


Los valores máximos de tensión equivalente de Von Mises generados en la estructura del chasis por la maniobra “giro de radio mínimo” no presentan problemas según el criterio de resistencia. Los coeficientes de seguridad mínimos de la totalidad de los componentes son superiores a 1,4.

En la figura 3 se muestra la torsión a la que se somete el chasis de estos vehículos en esta maniobra, razón principal por la cual se produce la rotura prematura por fatiga en las uniones soldadas del mismo. Los desplazamientos obtenidos del análisis numérico permiten validar el modelo según el criterio rigidez.

En las figuras 4 y 5 se muestran las tensiones equivalentes de von Mises y desplazamientos verticales obtenidos mediante técnicas numéricas basadas en el MEF de la “maniobra de fatiga”.

Figura 4: Tensiones equivalentes de Von Mises en el caso de carga “maniobra de fatiga”

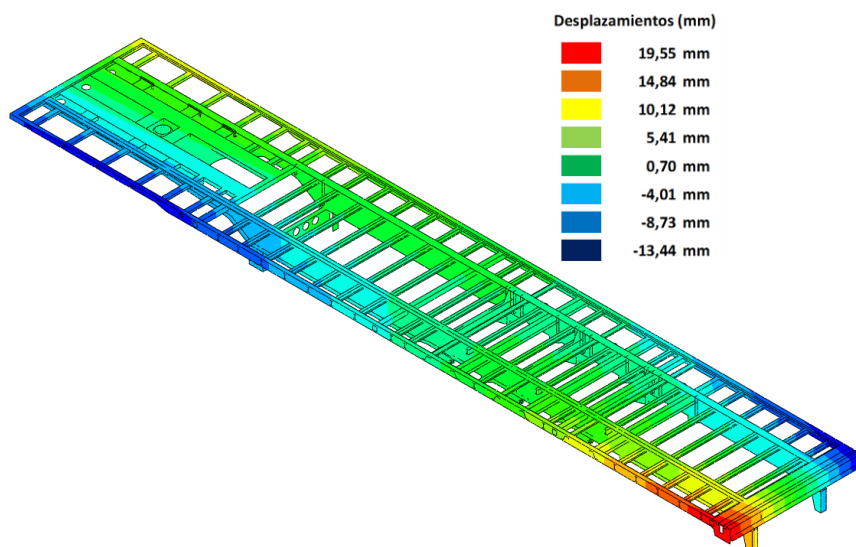


Como se muestra en la figura 4, las tensiones equivalentes de Von Mises se han incrementado respecto al caso de carga “giro de radio mínimo”. En concreto debido a la torsión generada en el chasis se localizan dos zonas, el cambio de sección y la zona de arriostramiento de los ejes, en las cuales se ha producido un aumento considerable de las tensiones. El aumento de las tensiones en la zona de arriostramiento es un efecto común a la totalidad de los semirremolques de tres ejes, pero el incremento de las tensiones en la zona del cambio de sección es un efecto de la modificación realizada en el prototipo, la reducción de la altura de las almas de los largueros en la zona del King-pin.

Los valores de tensiones obtenidos muestran que no existe plastificación en ningún lo de los componentes del chasis, pero los coeficientes de seguridad de alguno de los componentes están cercanos a 1. Por esta razón y según únicamente un criterio de resistencia, el prototipo sería válido, pero no se podría asegurar su vida útil.

Analizando los desplazamientos verticales máximos, se observa un incremento de la torsión el chasis del semirremolque con respecto a la maniobra de gro de radio mínimo. No obstante los valores obtenidos no presentan ningún problema desde un criterio de rigidez del vehículo.

Figura 5: Desplazamientos verticales en el caso de carga “maniobra de fatiga”



3.4 Análisis numérico del prototipo según un criterio de fatiga

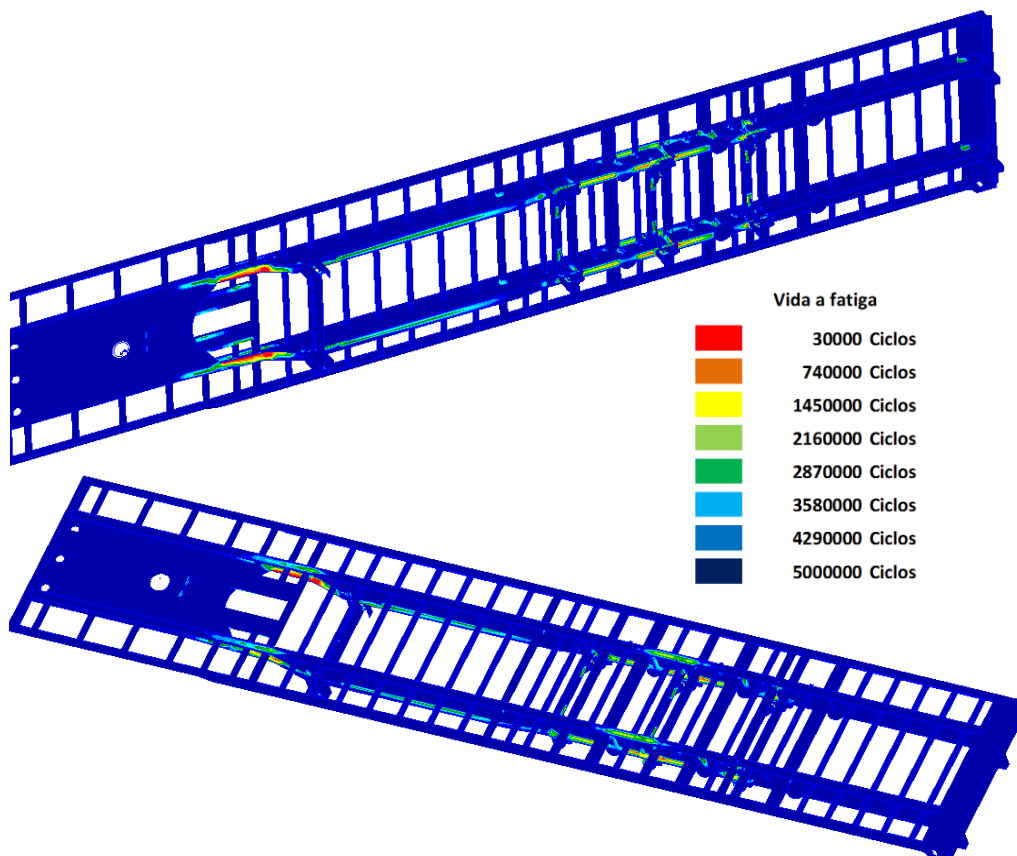
Una vez concluido el análisis de los resultados obtenido mediante el MEF según los criterios de rigidez y resistencia, se procede a la analizar los resultados numéricos obtenidos de la predicción de vida a fatiga realizada de la “maniobra de fatiga”.

El análisis número según un criterio de vida a fatiga se realiza mediante una subrutina FORTRAN implementada tal efecto (Malon, 2010), la cual es capaz de estimar la vida a fatiga de los componentes estructurales del semirremolque y de sus uniones soldadas, a partir de las propiedades mecánicas de los materiales empleados y de los resultados obtenidos de los cálculos numéricos mostrados en apartado 3.3.

La figura 6 (Malon et al, 2010) muestra los resultados de vida a fatiga obtenidos del análisis numérico de la “maniobra de fatiga”. En la figura se aprecian claramente dos zonas en las cuales la vida a fatiga es muy inferior al resto del chasis, zonas donde se producirá el fallo por fatiga. Estas zonas corresponden con el arriostramiento de los ejes y el cambio de sección del vehículo. Los valores de vida a fatiga obtenidos en estas zonas son de 31.037 ciclos y 33.317 para la zona de arriostramiento y el cambio de sección respectivamente.

Los valores de vida fatiga obtenidos permiten validar el prototipo, debido a que se ha comprobado que la vida útil de un semirremolque de tres ejes al ser sometido a un ensayo de fatiga en banco con esta maniobra equivale a 20.000 ciclos.

Figura 6: Vida a fatiga del semirremolque en el caso de carga “maniobra de fatiga”



4. Ensayo experimental en banco de ensayos del prototipo

Concluido el análisis numérico mediante el MEF según criterios de rigidez, resistencia y fatiga, el cual proporciona un diseño óptimo de semirremolque, y que en el caso del presente estudio ha permitido validar el diseño inicial proporcionado por el fabricante de semirremolques LECITRAILER S.A., se procede a fabricar un prototipo del mismo.

El ensayo experimental ha sido realizado en las instalaciones que la empresa LECITRAILER S.A., en colaboración con el grupo de investigación VEHIVIAL, ha construido en su fábrica de Utebo (Zaragoza) (Malon et al, 2004 y Castejón, Carrera & Malon 2009). La instalación para el ensayo de fatiga de semirremolques y el prototipo fabricado se muestran en la figura 7.

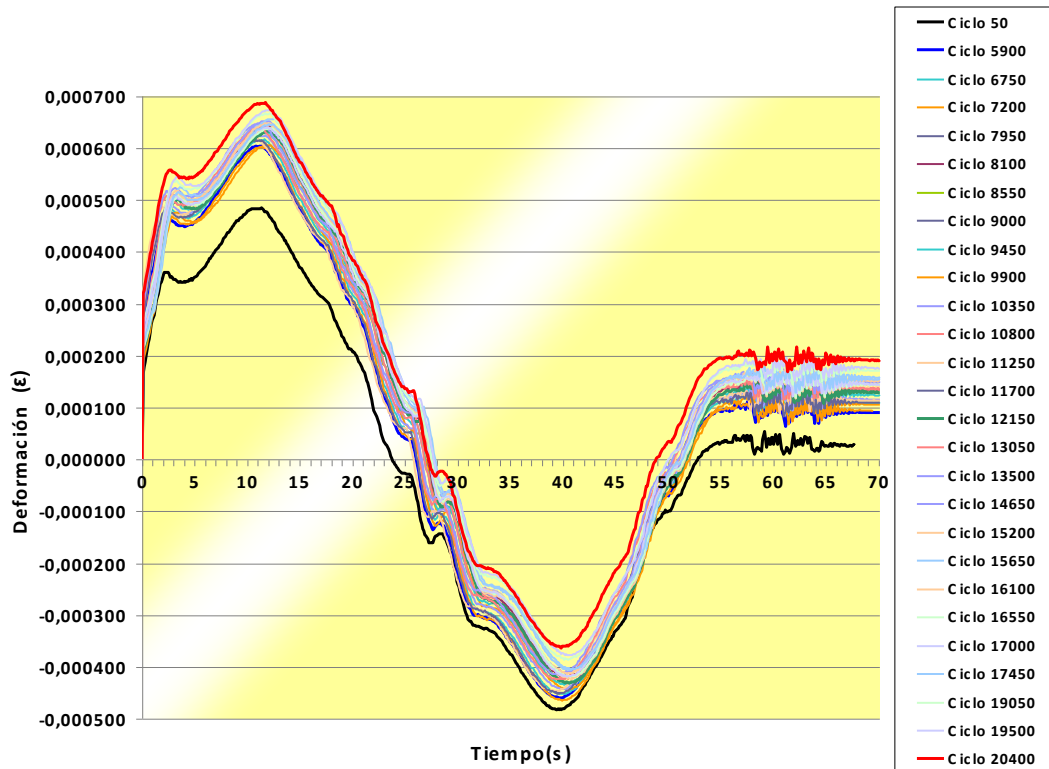
El prototipo a ensayar fue instrumentalizado con 3 rosetas y 5 galgas unidireccionales, las cuales fueron colocadas en zonas críticas del vehículo, zonas que han sido detectadas en el estudio numérico previo realizado mediante el MEF.

Los galgas extensométricas colocadas en el prototipo han proporcionado valores de tensiones y deformaciones, los cuales han sido registrados. Estos valores han permitido obtener el comportamiento del vehículo durante el ensayo, no detectándose variaciones en las gráficas que indicasen un fallo de la estructura del semirremolque. En la figura 8 se muestra a modo de ejemplo las deformaciones registradas durante el ensayo por la galga unidireccional colocada en la llanta inferior del larguero, delante del soporte del primer eje.

Figura 7: Prototipo en el banco de ensayos antes de colocar los bloques de carga



Figura 8: Deformaciones registradas por la galga unidireccional situada en la llanta inferior delante del soporte del primer eje



Los valores de tensiones y deformaciones registrados también han permitido validar el modelo numérico de semirremolque realizado para las maniobra de “reposo” y la “maniobra de fatiga”.

El ensayo fue dado por concluido al superar los 20.000 ciclos, cifra que la empresa LECITRAILER S.A., considera equivalente a 6 años o 1.500.000km de vida útil del vehículo, datos que fueron obtenidos del análisis de un vehículo de referencia ensayado en la instalación.

Analizadas los datos registrados por todos los canales de medida instalados en el prototipo, se observa un crecimiento constante en las tensiones y deformaciones registradas a lo largo del ensayo, pero reduciéndose en la mayoría de los casos el incremento de las tensiones y deformaciones dentro de un ciclo. Estos datos unidos al análisis exhaustivo realizado por personal de la empresa al prototipo, sin detectar ningún fallo estructural del mismo, han permitido validar el prototipo.

5. Conclusiones

En el estudio realizado se ha mostrado una metodología innovadora desarrollada para el diseño de semirremolques, que permite optimizar vehículos mediante técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos, según criterios de resistencia, rigidez y fatiga.

Se ha aplicado la metodología a un nuevo diseño de semirremolque, proporcionado por la empresa LECITRAILER S.A., al cual se ha reducido la altura de las almas de los largueros en la zona del King-pin.

Los resultados del análisis numérico han mostrado que el diseño inicial del nuevo modelo cumplía con los requisitos de rigidez y resistencia para los tres casos de carga analizados, como son “reposo”, “giro de radio mínimo” y “maniobra de fatiga”.

La predicción de vida a fatiga obtenida mediante la subrutina FORTRAN ha obtenido valores de vida útil superiores a los exigidos por la empresa en este tipo de ensayos, por lo que el diseño inicial ha sido validado a falta del ensayo experimental.

Se ha realizado un ensayo de fatiga a un prototipo, el cual ha permitido validar los resultados numéricos obtenidos, el propio prototipo, lo cual ha permitido lanzar al mercado un nuevo modelo de semirremolque.

Agradecimientos

La aplicación de la novedosa tecnología desarrollada ha sido realizada en el marco del proyecto “Diseño óptimo de autobuses y semirremolques aligerados basado en predicción de vida frente a fatiga, mediante técnicas de ensayos virtuales y datos obtenidos en tiempo real” del plan Nacional I+D+i TRA2012, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, y fondos FEDER. La realización de los ensayos ha sido posible gracias a la empresa LECITRAILER S.A. la cual ha proporcionado el vehículo y las instalaciones para llevarlos a cabo.

6. Referencias

- Beermann, H.J. (1984) Static Analysis of Commercial Vehicle Frames –A Hybrid Finite-Elements and Analytical Method. *International Journal of Vehicle Design* 5(1–2) pp 26–52.
- Cappello, F. Ingrassia, T. Mancuso, A. et al. (2005) Methodical Redesign of a Semitrailer. *9th International Conference on Computer Aided Optimum Design in Engineering. Computer Aided Optimum Design in Engineering IX Book Series: Wit Transactions on the Built Environment*, Volume 80, pp. 359–369.
- Carrera, M. (2006). Desarrollo de conceptos innovadores de semirremolques mediante la aplicación de técnicas numéricas y experimentales. Diseño de una bancada de ensayos de fatiga para su simulación frente a maniobras críticas. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza
- Carrera, M. Castejon, L. Miralbes, R. et al. (2010) Behaviour IA Rear Underrun Protection System on Car-to-Tank Vehicle Impact Used for Fuel Transportation, “*International Journal of Heavy Vehicles Systems*” 17(3–4). pp. 199–215.
- Castejón, L. Carrera, M. & Malon, H. (2009). Desarrollo de una bancada de ensayos de semirremolques frente a fatiga. Aplicación de la optimización de semirremolques de maniobras críticas y perfiles de carretera. I Jornada de ensayos en automoción. Pamplona
- Deng, Y.D. Wang, J. Wen, Y. et al. (2011). The Static and Dynamic Characteristics Study of Aluminum Tank Semitrailer. *2nd International Conference on Manufacturing Science and Engineering. Manufacturing Process Technology*, PTS 1–5 Book Series: Advanced Materials Research, Volume 189–193, pp. 2233–2237.
- Hoefinghoff, J. Jungk, A. Knop, W. et al. (2011). Using 3D Field Simulation for Evaluating UHF RFID Systems on Forklift Trucks. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 59(2), pp.689–691.
- Karaoglu, C. & Kuralay, N.S. (2002). Stress Analysis of a Truck Chassis with Riveted Joints. *Finite Elements in Analysis and Design* 38(12), pp1115–1130.
- Li, M.H. Lam, F. & Lee, G. (2007). Structural Assessment of Van Trailer Floor Systems with Aluminium Frame and Wood Decking. *International Journal of Heavy Vehicles Systems* 14(2). pp 216–226.

- Malon, H. (2010). Desarrollo de un método innovador de análisis del comportamiento frente a cargas de fatiga de uniones soldadas y componentes estructurales de semirremolques. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza
- Malon, H. Miralbes, R. Carrera, M. Castejon, L & Tello, L. (2010) Correlación de resultados numéricos y experimentales de vida a fatiga de semirremolques. En libro de resúmenes del IX Congreso de Ingeniería del Transporte. ISBN 978-84-96398-41-2
- Malon, H. Tello, L. Martin, C. (2010). Development of an innovative fatigue test profile for three axle semi-trailers. En International Association of Engineers titulado Proceedings of the World Congress on Engineering 2010; pp1059-1061
- Malon, H. Tello, L. Martin, C. (2011) Analysis and optimization of an innovative fatigue test profile for three axle semi-trailers. En American Institute of Physics (AIP) titulado Current themes in Engineering Science 2010; pp 26-34
- Miralbes R. (2008). Nuevo procedimiento de modelización y ensayo de semirremolques cisterna criogénicos autoportantes y su aplicación al diseño y optimización. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza
- Miralbes, R. & Castejon, L. (2010). Fatigue Design of Tanker Semi-Trailers, *Dyna* 85(6). pp. 480–488.
- Miralbes, R. Malon, H & Castejon L. (2012) Design of accessories for the coupling in forklift trucks: crane gibs and pallet box lock. En: AEIPRO titulado Selected proceedings from the 15th International Congress on Project Engineering. Pp. 233-246
- Vidal, M. Bone, A. Garcia-Ramos, F.J. Malon, H & Villacampa, R. (2011) Desarrollo de máquina para la aplicación localizada de cebo rodenticidas en parcelas agrícolas. En: *Libro de resúmenes del XV International Congress on Project Engineering*. ISBN 978-84-615-4542-1