

Estudio de la vida frente a fatiga de semirremolques. Banco de ensayo y simulación por ordenador

Fatigue life analysis of semitrailers. Fatigue testing bench and numerical simulation



Marco Carrera Alegre ¹, Luis Castejón Herrer ¹, Hugo Malón Litago ¹, David Valladares Hernando ¹, Carlos Martín Lafuente ², Javier García de Jalón ³, Pablo Luque ⁴, Daniel Álvarez Mantaras ⁴, Enrique Alcalá ³, Ángel Martín ³

¹ Universidad de Zaragoza. Dpto. de Ingeniería Mecánica. C/ María de Luna, s/n - 50018 Zaragoza. Tfno: +34 976 762556.

² Lecitrailer S.A. Camino de los Huertos, s/n - 50620 Zaragoza. Tfno: +34 976 762556.

³ Universidad Politécnica de Madrid. INSIA. Campus Sur UPM, Carretera de Valencia (A-3), km7 - 28031 Madrid. Tfno: +34 913365300.

⁴ Universidad de Oviedo. Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. Campus de Gijón, s/n - 33203 Gijón. Tfno: +34 985 182059

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7886> | Recibido: 18/11/2015 • Aceptado: 23/02/2016

ABSTRACT

- Freight transport by road currently is one of the most important mean of transportation in the worldwide logistics sector, due to a number of advantages compared to other means operating within the same sector. This road transportation is largely developed through the use of semi-trailers. In recent years there has been a tendency to optimize the weight of semi-trailers in order to lighten them and to reduce fuel consumption and emissions. Of course, this optimization has to be done without compromising vehicle safety. In this regard, special interest requires analysis of fatigue resistance, since the breakage in such vehicles appears in welded joints areas by the application of cyclic loading. Until recently, design methodologies applied were based primarily on experience and experimental analysis, remaining in the background optimization processes. However, in this article the research carried out by the participating universities and Lecitrailer SA company is summarized. This optimization work is focused to achieve a lightweight semitrailers with optimal behavior against fatigue. The research is based on the development and implementation of a fatigue testing bench for semitrailers, combined with numerical simulation tools for estimating fatigue behavior of these vehicles, and specifically in the areas of welding.
- Keywords:** Semitrailers, fatigue life, testing bench, FEM, welding, optimization.

RESUMEN

El transporte de mercancías por carretera supone en la actualidad uno de los medios de mayor importancia en el sector logístico a nivel mundial, debido a una serie de características y ventajas que presenta respecto a otros medios que operan dentro del mismo sector. Este transporte por carretera se realiza en gran medida gracias a la utilización de semirremolques. Durante los últimos años ha existido una tendencia a optimizar el peso de los semirremolques con objeto de aligerarlos de cara a reducir el consumo y las emisiones contaminantes y aumentar la capacidad de carga. Por supuesto, esta optimización tiene que realizarse sin perjudicar la seguridad del vehículo. En este sentido, un especial interés requiere el análisis de la resistencia frente a fatiga, puesto que las posibles roturas en este tipo de vehículos aparecen por la aplicación de cargas cíclicas en zonas próximas a las uniones soldadas. Hasta fechas recientes, las metodologías de diseño aplicadas estaban basadas fundamentalmente en la experiencia y en el análisis experimental, quedando en un segundo plano las operaciones de

optimización. Sin embargo, en el presente artículo se resume el trabajo realizado por las Universidades participantes y la empresa Lecitrailer S.A. para lograr semirremolques aligerados con un comportamiento óptimo frente a fatiga. Esta labor de optimización se basa en el desarrollo y aplicación de una bancada de ensayo frente a fatiga de semirremolques, en combinación con herramientas numéricas de simulación del comportamiento frente a fatiga de estos vehículos, y específicamente en las zonas de soldadura.

Palabras Clave: Semirremolques, vida a fatiga, banco de ensayo, MEF, soldadura, optimización.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente artículo se resume el trabajo de investigación realizado por las Universidades participantes y la empresa Lecitrailer S.A., para lograr semirremolques aligerados con un comportamiento óptimo frente a fatiga. Esta labor de optimización se basa en el desarrollo y aplicación de una bancada de ensayo frente a fatiga de semirremolques única en el mundo, en combinación con herramientas numéricas de simulación del comportamiento frente a fatiga de estos vehículos, y específicamente en las zonas de soldadura.

En la actualidad existe una tendencia al desarrollo de vehículos semirremolques aligerados^[1], gracias a mejoras en el diseño o a la incorporación de nuevos materiales, como es el caso de las aleaciones de aluminio, los aceros de alta resistencia u otros, derivándose una serie de ventajas como es la reducción de emisiones contaminantes, el ahorro de combustible, un mejor comportamiento dinámico, mayor estabilidad del vehículo y de la carga con menor tendencia al vuelco, incremento de la carga útil o mejores prestaciones y reducción de gastos de mantenimiento.

El diseño del vehículo está basado en requisitos de rigidez y resistencia frente a cargas estáticas y dinámicas, que generalmente no se encuentran disponibles en normativas vigentes. Sin embargo, cada constructor de vehículos aplica su propio conjunto de criterios de diseño^[2]. Es por tanto, una necesidad para la industria constructora de vehículos, la determinación de las diferentes sollicitaciones estáticas y dinámicas que actúan sobre un vehículo, bajo las diversas situaciones posibles^[3]. De todos los casos de carga actuantes, los casos que producen fatiga son lo que resultan críticos para la resistencia del vehículo, puesto que las posibles roturas siempre se producen por este tipo de sollicitaciones en las zonas cercanas a las soldaduras.

Al desarrollar un nuevo vehículo semirremolque, la última fase consiste en la fabricación de un prototipo y su ensayo estático, dinámico y frente a fatiga. Por ello se han desarrollado técnicas muy fiables de simulación numérica que representan con exactitud las condiciones reales de cada uno de los eventos posibles determinados previamente, para evitar la construcción de series de prototipos durante el proceso de diseño y de la realización de los consiguientes ensayos, todo ello de elevado coste económico. A pesar de lo cual, el proceso de diseño, cálculo y optimización no evita la construcción de prototipos de la configuración óptima desarrollada [4], sobre la que se realizarán ensayos correspondientes a los casos de carga utilizados en el diseño.

Por este motivo se desarrolló una bancada de ensayos de fatiga de semirremolques única en el mundo, en colaboración con la empresa Lecitrailer S.A., para el ensayo de maniobras críticas. Sin embargo, de cara a aminorar el número de prototipos a construir, resulta necesario poder predecir con fiabilidad cual es el número de ciclos de fatiga que va a ser capaz de superar, ante la maniobra crítica en este sentido, que es la maniobra de radio mínimo. Además, dada la flexibilidad que posee un semirremolque típico chasis-plataforma, los puntos críticos del mismo en los que se puede producir un fallo por fatiga son los correspondientes a los cordones de soldadura, y en concreto las zonas afectadas térmicamente por los mismos.

Una de las herramientas más utilizadas en los procesos de diseño de estructuras vehiculares en general, y de semirremolques en particular, consiste en la simulación del comportamiento estructural de los mismos mediante la aplicación de técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos (MEF) [5][6]. Esta herramienta permite obtener una aproximación a la solución real de variables de interés, tanto en términos de rigidez (deformadas, desplazamientos, etc.) como de resistencia (tensiones, deformaciones plásticas, etc.). No obstante, hay que tener en cuenta que los modelos numéricos no son capaces de proporcionar una solución exacta. Con esto, esta metodología debe ser complementada con otras que permitan, al menos, validar los modelos teóricos considerados.

La aplicación de técnicas experimentales sobre prototipos reales es una solución a este problema, permitiendo por una parte, la obtención de resultados reales en aquellos puntos de medida seleccionados, y por otra la validación de los modelos numéricos comentados anteriormente. Los métodos de ensayo aplicados previamente a este tipo de vehículos (ensayos en campo) presentan una serie de importantes limitaciones (repetitividad del ensayo, elevados tiempos de ejecución y coste, ejecución bajo condiciones

no controladas, etc.), lo cual ha supuesto el planteamiento y desarrollo de una aplicación específica para el análisis experimental de estructuras de semirremolques.

La bancada desarrollada de ensayos de fatiga de vehículos de grandes dimensiones [7], mostrada en la Figura 1, capaz de reproducir las maniobras consideradas como críticas en este tipo de vehículos, es adecuada para ensayar bajo condiciones extremas de operación, obteniendo una serie de resultados como son, por ejemplo, su rigidez, resistencia, comportamiento dinámico, comportamiento frente a cargas de fatiga, vibraciones, y demás variables de influencia.

2. DEFINICIÓN DE CONDICIONES CRÍTICAS DE MANIOBRABILIDAD

Un aspecto de gran importancia a la hora de realizar simulaciones numéricas o ensayos sobre un semirremolque es conocer al detalle el conjunto de sollicitaciones aplicables al mismo [7-8]. A continuación se indican las más significativas y se muestran en la Figura 2.

2.1. REPOSO / MARCHA RECTILÍNEA / BACHEADO

En el caso de los semirremolques objeto de estudio, el caso de "reposo" consiste en el vehículo cargado a su capacidad máxima tanto estando quieto, como moviéndose a velocidad constante y acoplado a la cabeza tractora a través de su 5ª rueda, que es el enganche con forma de plato en herradura, que lleva la cabeza tractora en su parte trasera central, para sujetar al semirremolque, por medio del anclaje con el king pin del mismo.

2.2. FRENADA

En este caso, se estudia el estado producido cuando un vehículo cargado de estas características es sometido a una brusca maniobra de frenada.

2.3. GIRO DE RADIO MÍNIMO (GRM)

Esta maniobra, realizada a baja velocidad, consiste en "traccionar" el semirremolque cargado a través de la cabina tractora en un ángulo de, aproximadamente, 90°.

3. DESARROLLO DE UNA NOVEDOSA TÉCNICA EXPERIMENTAL: DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYOS DE FATIGA PARA EL ANÁLISIS DE SEMIRREMOLQUES

3.1. LIMITACIONES DE LAS TÉCNICAS ACTUALES

Las técnicas de ensayo de campo utilizadas actualmente son efectivas en gran medida, aunque presentan una serie de limitaciones: necesidad de conductor y circuito de pruebas; condiciones de repetitividad reducidas; tiempos de ensayo elevados; compleja instrumentalización del vehículo y seguimiento del ensayo; influencia de condiciones ambientales, etc. Además de evitar las anteriores limitaciones, otra de las ventajas de una instalación de ensayos de laboratorio de estas características, radica en la posibilidad de establecer en un futuro un proceso de ensayos de homologación de semirremolques controlados en laboratorio, del mismo modo que existen para otro tipo de vehículos.

3.2. NUEVA TÉCNICA DE ENSAYOS DE APLICACIÓN A SEMIRREMOLQUES

En primer lugar, se ha analizado en detalle qué combinación de maniobras son las más desfavorables para el chasis del vehículo,

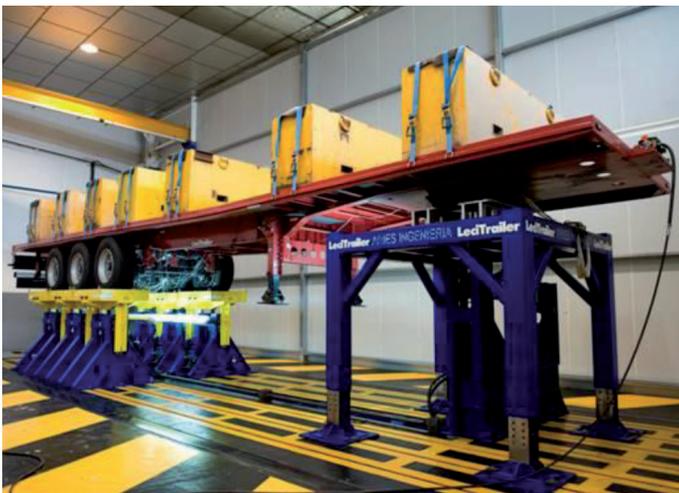


Figura 1: Bancada de ensayos de fatiga para semirremolques desarrollada

y se concluye que las dos maniobras más exigentes en cuanto a requisitos mecánicos para un semirremolque son las siguientes:

- **Giro de radio mínimo + Escalón.** Esta combinación de maniobras se da, por ejemplo, cuando el conjunto cabina tractora – semirremolque entra al interior de una nave.
- **Bacheado.** En este caso el vehículo se encuentra realizando maniobras de marcha “normal” en la que se producen una serie de sollicitaciones variables debidas a las irregularidades de la calzada.

A partir de considerar dichas maniobras aplicadas sobre un semirremolque, se dedujeron las capacidades de operación mostradas en la tabla 1, que deberían poseer los actuadores hidráulicos verticales y horizontales de una bancada de ensayo de semirremolques. Los valores de desplazamiento máximo y fuerza de los actuadores fueron obtenidos por medio de simulación numérica, gracias al uso de modelos de semirremolques. Son los valores de desplazamiento y fuerza necesarios para poder aplicar el caso de giro de radio mínimo con seguridad. Los valores de velocidad de actuador y caudal provienen de la capacidad del grupo hidráulico empleado y son capaces de reproducir un bache de la calzada adecuadamente.

Las dimensiones de la futura bancada de ensayo están impuestas por el tamaño máximo del semirremolque (14 x 2.5 m²), que deberá apoyar en siete puntos en la bancada, a saber, en el king pin, que es el bulón de conexión del semirremolque con la cabeza tractora, y en las ruedas de los tres ejes traseros mediante sistemas de acoplamiento actuador-rueda. Además, la bancada fue diseñada para que poseyera flexibilidad de ensayo de vehículos de diferentes dimensiones y distancias entre ejes, gracias a un sistema de guiado que permite el desplazamiento de los soportes verticales.

4. DESARROLLO DEL BANCO DE ENSAYOS

El banco propuesto consta de seis actuadores verticales que aplicarán esfuerzos a cada una de las ruedas del semirremolque. Asimismo, existe un actuador horizontal que aplica fuerza en el king-pin equivalente a las ejercidas por la cabeza tractora del camión. El esquema explicado se muestra en la Figura 3.

El sistema planteado está formado por una masa suspendida (correspondiente al peso propio del vehículo y el peso de la carga), una masa no suspendida (que corresponde al peso de los ejes del semirremolque) y la masa del vástago colocado en cada una de las ruedas. Este modelo fue analizado mediante el Método de los Elementos Finitos según las condiciones de análisis comentadas anteriormente.

Todos los componentes de la bancada fueron calculados mediante el MEF hasta llegar a una solución óptima, en términos de resistencia, rigidez y fatiga con un diseño lo más ligero posible. Una vez definidos los diseños de los diferentes componentes y sistemas que integran el banco de ensayo, la siguiente fase consistió en el desarrollo y fabricación de los mismos para su posterior integración [9].

En paralelo al desarrollo de los componentes del banco, se realizó la obra civil correspondiente a la propia estructura que servirá de base para alojar el resto de sistemas integrantes del mismo.

Durante el desarrollo de la obra civil se fabricó el conjunto de soportes según las especificaciones de diseño obtenidas anteriormente.

A grandes rasgos, el sistema hidráulico está compuesto por los siguientes elementos principales: actuadores, válvulas de control, grupo hidráulico y elementos auxiliares [10]. Todos estos elementos han sido incorporados al banco una vez montado todo el sistema de soportes.

Se incorporaron sobre la bancada los elementos anteriores además de otros, como son el sistema de control, elementos auxiliares de conexión, intercambiador de calor para la protección del grupo hidráulico, etc. [11]

El proceso explicado de construcción de la bancada se muestra en la Figura 4.

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN: ENSAYO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE SEMIRREMOLQUE MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL BANCO

5.1. PREPARACIÓN DEL VEHÍCULO

En primer lugar, el vehículo debe ser colocado sobre el banco para su posterior cargado mediante una serie de bloques calibrados.

Una vez colocado el vehículo sobre el banco, el primer paso consiste en instrumentar el mismo para obtener una serie de medidas en determinados puntos. Por ejemplo, el primer punto de medida se sitúa en uno de los travesaños que forma parte de la estructura del puente del king pin (Figura 7).

En un segundo paso se procede a la carga del vehículo mediante bloques calibrados. En este caso, se ha decidido cargar al vehículo con un total de siete bloques, es decir, una carga total de 31,5 T.

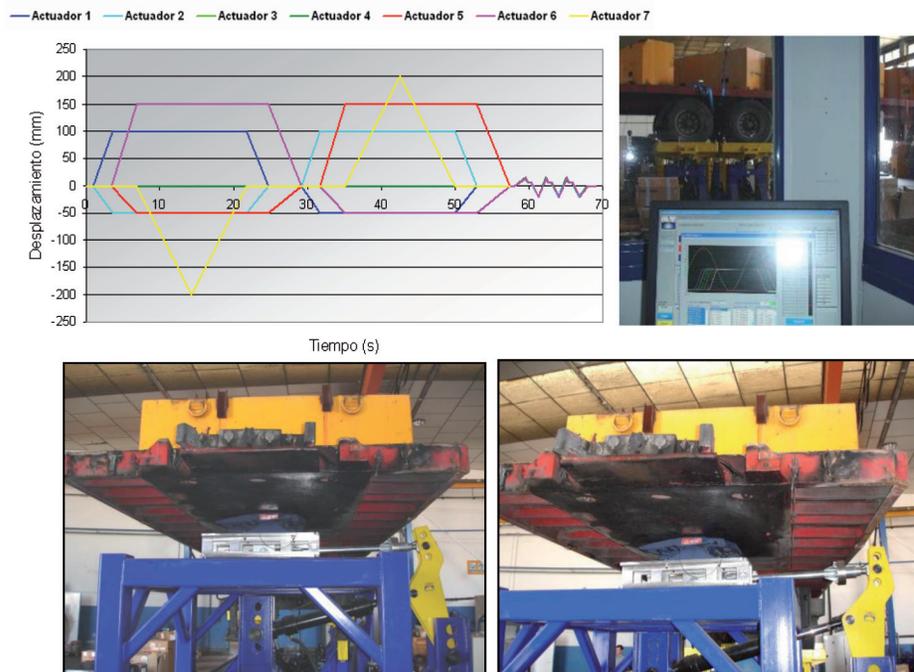


Figura 5: Perfil desarrollado para la maniobra de fatiga para semirremolques y desplazamiento del king pin durante el ensayo

5.2. DEFINICIÓN DE MANIOBRAS

Teniendo en cuenta las posibilidades que ofrece el banco, se ha considerado adecuado introducir en el ensayo un caso de carga correspondiente a una combinación de giro de radio mínimo con escalón y maniobra de bacheado o perfil de carretera, los cuales han sido explicados previamente. La curva desplazamiento-tiempo para este tipo de perfil ha sido obtenida a partir de datos reales obtenidos midiendo perfiles de carretera [12].

En cada maniobra a simular se deben conocer con exactitud la magnitud, la dirección y el sentido de las cargas a aplicar en cada rueda y / o en la 5ª rueda del king pin. Este conjunto de sollicitaciones será introducido mediante el sistema de actuadores, fijando la posición de los mismos y teniendo en cuenta su capacidad de carga. En la maniobra de "Giro de radio mínimo" se induce una elevada fuerza que provoca en el chasis flexión y torsión. Según la posición del escalón, esta torsión se puede ver incrementada o atenuada, siendo en el primer caso muy negativa para la estructura, por las elevadas sollicitaciones mecánicas que aparecen en ciertos componentes. Además, se han desarrollado otros nuevos perfiles de seguimiento de los diferentes cilindros hidráulicos del banco, como el mostrado en la figura 5, los cuales a diferencia de los desarrollados inicialmente, han tenido por objeto que la estructura de semirremolque ensayada se vea sometida a condiciones críticas de fatiga, que servirán para determinar el comportamiento a lo largo de la vida útil del vehículo [8].

Es conveniente realizar un seguimiento del ensayo consistente en observar que los perfiles son reproducidos de forma correcta por cada uno de los actuadores. El software de control de la máquina [13] permite visualizar todas las variables significativas durante la ejecución del ensayo. Con esto, se han medido las tensiones por medio de galgas y rosetas a partir de las deformaciones y de la rigidez del material.

6. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA ESTRUCTURA ENSAYADA. COMPARATIVA DE RESULTADOS TEÓRICO-EXPERIMENTALES.

En primer lugar, se ha desarrollado el modelo numérico de la estructura. Además del modelado del propio semirremolque, se simulan también los correspondientes bloques de carga tal y como se aprecia en la Figura 6:

El modelo desarrollado consta de 167.063 nodos y 134.900 elementos. La mayoría de los elementos son elementos tipo lámina de 3 y 4 nodos de integración reducida. En cuanto a cargas y condiciones de contorno, el king pin se somete a un desplazamiento de 300 mm (máximo según la gráfica anterior) manteniendo

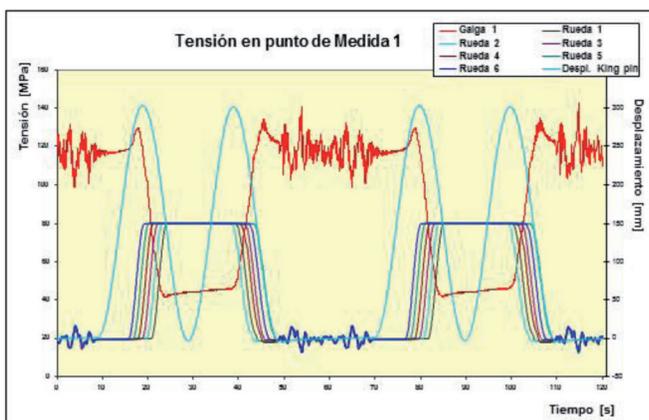


Figura 7: Evolución temporal de tensión y mapa de tensión (S11, en MPa) obtenido en el punto de medida 1

apoyadas las bases de todos los muelles que simulan el sistema de suspensión.

En términos de resistencia, se han obtenido los niveles de tensión, tanto en el modelo completo como en las zonas correspondientes a los puntos de medida, es decir, en aquellos puntos del modelo correspondientes a los de colocación de las galgas y rosetas extensométricas.

A continuación, a modo de ejemplo, en la figura 7 se muestran los resultados de las tensiones obtenidas en el punto de medida 1. En este caso, la dirección de medida es transversal al vehículo y se obtiene la siguiente distribución de tensiones:

En el punto de medida 1, la tensión alcanzada en la dirección de la galga es de 124 MPa.

A continuación (Tabla 2) se presenta una comparativa entre los resultados obtenidos en la simulación y los obtenidos experimentalmente en el banco para aquellos puntos de medida seleccionados.

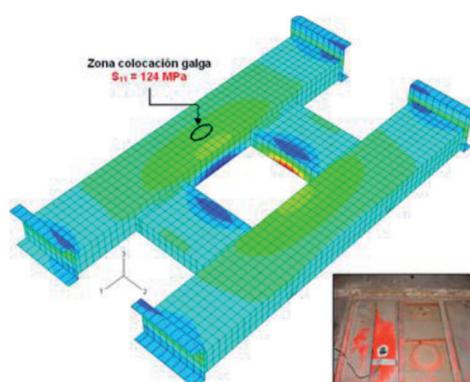
Punto de medida	Tensión	Valor Numérico [MPa]	Valor Experimental [MPa]	Diferencia [%]
P1: Galga puente king pin	S11	124	126	1.6
P2: Galga sección larguero	S22	88	85	3.4
P3: Galga cartabón	S22	7.2	6.5	9.7
P4: Galga puente king pin	S22	-49	-46.5	5.1
P5: Roseta soporte	S _{Mises}	23	21.5	6.5

Tabla 2: Comparativa teórico-experimental en los puntos de medida

Se concluye que la correlación obtenida para este modelo numérico es satisfactoria. Por lo tanto, puede decirse que el modelo desarrollado es válido y puede ser utilizado en posteriores procesos de diseño.

7. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FRENTE A FATIGA DE UNIONES SOLDADAS EN SEMIRREMOLQUES

Paralelamente al desarrollo de la bancada de ensayo frente a fatiga y a la simulación global de semirremolques por medio de técnicas numéricas, se desarrolló una línea de investigación consistente en el análisis del comportamiento frente a fatiga de componentes estructurales y uniones soldadas en semirremolques en



un único cálculo. Este análisis permite estudiar el comportamiento de las zonas críticas de los semirremolques, como por ejemplo las uniones soldadas de los arriostramientos de los ejes o la zona de cambio de sección de los largueros, en

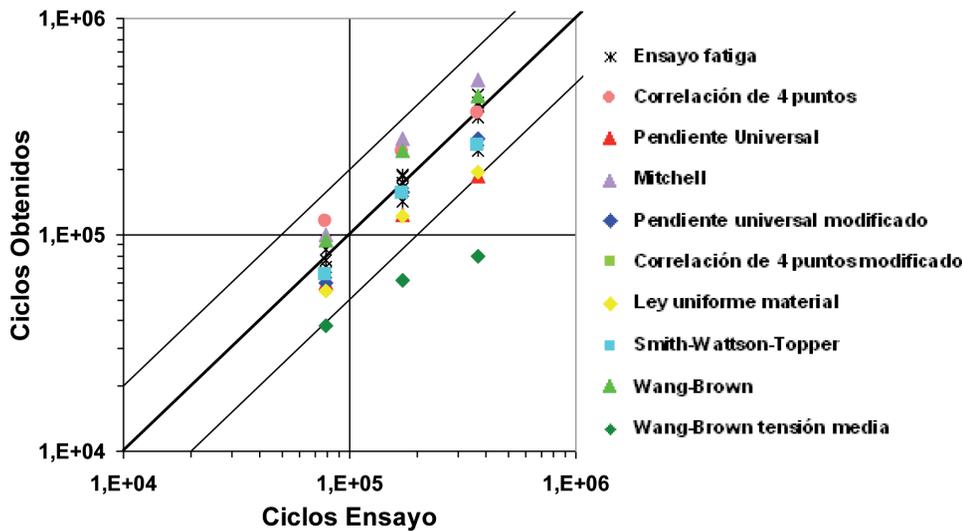


Figura 8: Comparativa de vida a fatiga obtenida mediante métodos numéricos y experimentales de probetas de material base Domex 500 (límite elástico 500 MPa, resistencia última 550-700 MPa, deformación máxima 14-18%)

función de las maniobras críticas a las que se ven sometidos estos vehículos, así como de los materiales aplicados en la construcción de estos componentes.

La correlación de resultados numéricos y experimentales obtenidos mediante métodos de predicción de vida a fatiga, basados en la ecuación Basquin-Manson-Coffin, para el material base de los componentes estructurales se muestra en figura 8.

Debido a que los ciclos de carga en semirremolque no son alternantes, si no fluctuantes, los criterios analizados fueron modificados a fin de considerar en las predicciones de vida a fatiga el efecto de la tensión media. Esta corrección se introduce en el análisis mediante el método de corrección desarrollado por Morrow [14][15].

Morrow desarrolló un método de aproximación basado en la vida a fatiga obtenida aplicable a cualquier tipo de criterio de predicción de vida a fatiga, el cual permite obtener la vida a fatiga del espécimen a estudio considerando la tensión media. El método consiste en sustituir la vida a fatiga proporcionada por algún criterio convencional, por un valor obtenido mediante:

$$N^* = N_f * \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (\text{eq. 1})$$

donde N_f es la vida a fatiga obtenida sin tener en cuenta la tensión media, σ_m es la tensión media, y σ'_f y b son el coeficiente y el exponente de resistencia a la fatiga respectivamente. Aplicando el parámetro desarrollado por Morrow a la ecuación de Basquin- Manson-Coffin, queda:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} * \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right) * (2N)^b + \varepsilon'_f * \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right)^{\frac{c}{b}} * (2N)^c \quad (\text{eq. 2})$$

Se obtiene que para los diferentes aceros analizados, el criterio con mayor correlación de resultados numéricos y experimentales para el material base es el método de la Pendiente Universal modificado.

Para las uniones soldadas, se analizó el criterio de predicción de vida a fatiga propuesto por el International Institute of Welding [16], basado en el análisis de fatiga de uniones soldadas mediante el método descrito en el eurocódigo 3 [17] y se comparó frente a otros criterios de fatiga uniaxial y multiaxial.

Para la simulación de las uniones soldadas se consideraron los modelos propuestos por el International Institute of Welding, y se desarrollaron dos modelos adicionales (modelos 5 y 6 de la Tabla 3). La principal característica de los modelos desarrollados es la discretización de las zonas afectadas térmicamente por la soldadura, así como el cordón de soldadura y la zona bajo el cordón de soldadura. Estas regiones presentan propiedades mecánicas distintas, las cuales se obtienen mediante una aproximación a partir de ensayos de tracción y de dureza del material base y de probetas soldadas.

En el análisis de vida a fatiga de probetas soldadas a solape se han empleado curvas del IIW, con clase FAT 63, pero con las tensiones de Von Mises en cada punto de integración del modelo numérico de las probetas, en los que sus propiedades mecánicas varían por el efecto de la soldadura. Como de-

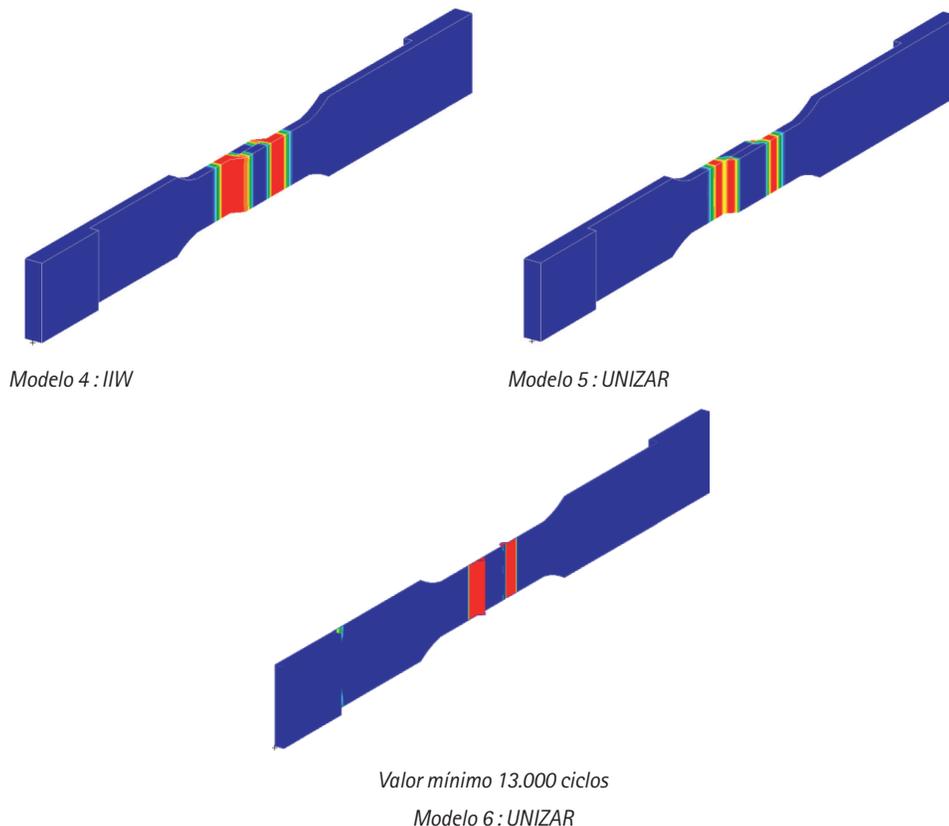


Tabla 3: Resultados de la predicción de vida a fatiga de probetas soldadas obtenidos mediante la subrutina de post-proceso

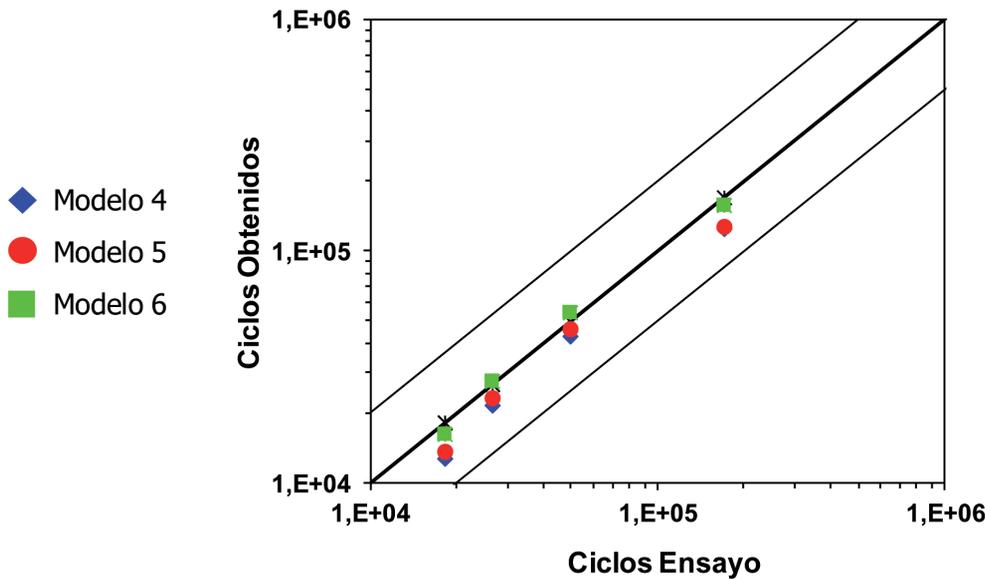


Figura 9: Correlación de resultados numérico-experimentales de probetas soldadas a solape

de Von Mises obtenidos de las simulaciones numéricas mediante el método de los elementos finitos, con los resultados experimentales.

Una vez desarrollada la técnica numérica de predicción de vida a fatiga en uniones soldadas y componentes estructurales, y comprobada la gran correlación de resultados obtenidos mediante esta técnica numérica y los resultados experimentales a nivel de probetas soldadas, mostrada en la figura 9, se procedió a realizar la predicción de vida a fatiga de un subconjunto^[18] de semirremolque. En concreto se analizó el conjunto del arriostramiento de un eje de semirremolque, puesto que es una zona crítica del vehículo en cuanto a su vida frente a fatiga ante las condiciones de carga de radio mínimo.

mostración de la validez de este procedimiento en modelos numéricos a nivel probeta, se hace referencia a la tesis doctoral de Hugo Malón^[6], en la que se demostró que por medio de la aplicación de las curvas del IIW con tensión equivalente de Von Mises, los resultados obtenidos en términos de predicción de vida a fatiga eran los que presentan un mayor correlación numérico-experimental de los resultados. Además, estos modelos aportan la gran ventaja de determinar las zonas críticas de este tipo de uniones.

En este caso se obtuvo también una gran correlación entre resultados numéricos y experimentales. Finalmente, el último nivel de predicción de vida a fatiga correspondió a un semirremolque completo.

Los resultados obtenidos de predicción de vida a fatiga mediante la aplicación de una subrutina de post-proceso desarrollada permiten descartar los tres primeros modelos proporcionados por el International Institute of Welding, mostrándose en la tabla 3 un ejemplo de los resultados obtenidos por tres modelos analizados para un caso de carga.

Con objeto de validar la técnica de predicción de vida a fatiga se realizó un ensayo de fatiga a un prototipo de semirremolque, mostrado en la figura 5. La duración de este ensayo fue de dos meses, en el cual se sometió a la estructura del chasis a repetidos ciclos de fatiga en los cuales se aplicaron fuerzas que provocaron elevados valores de torsión en el chasis, combinando la sollicitación transversal sobre el King pin y el desplazamiento de las ruedas del primer y del tercer eje (maniobra especificada en la figura 5), de modo que se forzase el fallo prematuro de las uniones soldadas de los arriostramientos de los ejes y del cambio de sección del vehículo.

La siguiente gráfica muestra la correlación de resultados numérico-experimentales obtenidos para el modelo volumétrico del International Institute of Welding y los dos modelos numéricos desarrollados por la Universidad de Zaragoza. En ella se comparan los resultados de vida a fatiga obtenidos mediante la aplicación de la subrutina desarrollada a partir de los resultados de tensión

Se consideró que la superación de 20.000 ciclos de este ensayo corresponde a la vida útil del vehículo, la cual es de seis años o un millón y medio de kilómetros. Este prototipo superó los 20.000 ciclos del ensayo sin fallo.

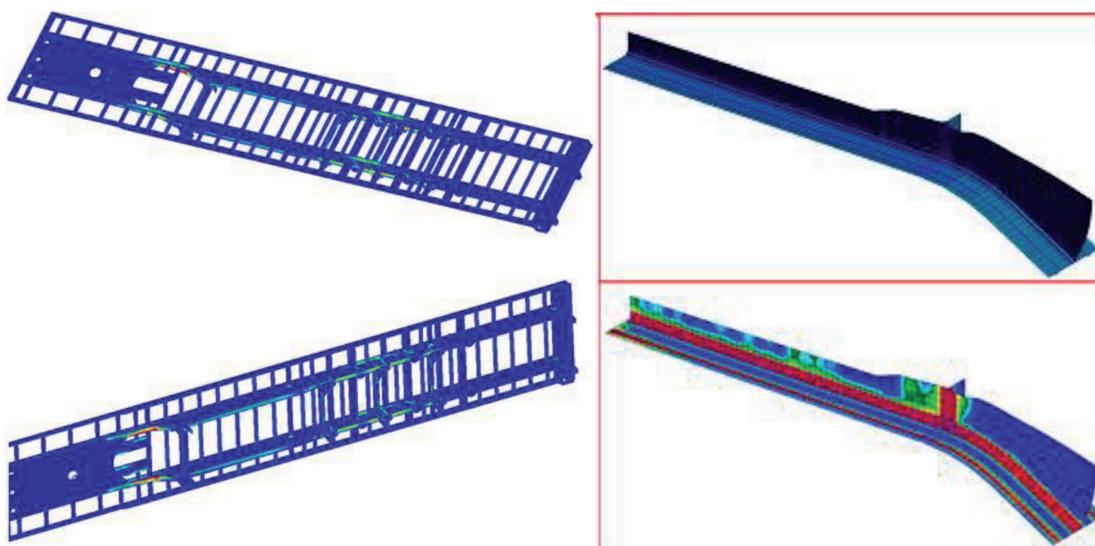


Figura 10: Predicción de vida a fatiga obtenida mediante el modelo de semirremolque entero (30.000 ciclos) y mediante el submodelo del cambio de sección de los largueros (21.360 ciclos)

Se desarrolló un modelo de elementos finitos del prototipo de semirremolque que fue ensayado frente a fatiga. El objetivo fue calcular dicho modelo ante las mismas condiciones de carga, con las que el prototipo fue ensayado. De este modo el resultado numérico podría ser comparado con el experimental en términos de tensión, deformación y ciclos de carga que es capaz de superar el vehículo.

Al tratarse de un modelo de un vehícu-

lo completo es inviable discretizar las zonas afectadas térmicamente y los cordones de soldadura. Para analizar en detalle de las zonas críticas del modelo se realizaron submodelos, en los cuales se discretizaron los cordones de soldadura y las zonas afectadas térmicamente. Para el caso del cambio de sección de los largueros, la figura 10 muestra el modelo inicial y el submodelo desarrollado, así como la predicción de vida a fatiga obtenida.

Los resultados obtenidos con los modelos detallados demuestran que la vida a fatiga del semirremolque era 21.360 ciclos, y esta vida frente a fatiga correspondía a las zonas afectadas térmicamente existentes en el cambio de sección de los largueros. Este resultado es coherente con el resultado experimental de vida frente a fatiga del vehículo, en el que se detuvo el ensayo tras superar 20.000 ciclos sin la aparición de fisuras.

8. CONCLUSIONES

Por medio del presente artículo se ha mostrado como la colaboración de las Universidades de Zaragoza, Politécnica de Madrid y de Oviedo con la empresa Lecitrailer S.A., ha sido exitosa para lograr un procedimiento de optimización de semirremolques, para diseñar vehículos ligeros y suficientemente rígidos y resistentes frente a cargas estáticas y dinámicas. Además, la investigación desarrollada ha focalizado preferentemente en la optimización de la resistencia de los vehículos frente a la fatiga, para lo que se han estudiado en detalle las zonas de soldadura, puesto que son las áreas más solicitadas en las que se pueden producir fisuras ante un número elevado de ciclos de aplicación de maniobras críticas.

La técnica de diseño y optimización de semirremolques desarrollada consiste en la combinación de herramientas de simulación numérica basadas en el MEF con la aplicación de técnicas experimentales sobre prototipos. Con objeto de mejorar sobre todo la parte experimental del método, se ha presentado el desarrollo de una bancada de ensayo de semirremolques frente a fatiga, novedosa a nivel mundial, que permite la aplicación de diferentes perfiles de carretera y maniobras críticas para semirremolques, bajo condiciones perfectamente controladas de laboratorio.

Se han realizado diversos ensayos sobre diferentes tipologías y modelos de semirremolque, con objeto de conocer su resistencia a fatiga frente a un ensayo de giro de radio mínimo y un perfil de carretera. Además, con objeto de establecer el nivel de correlación entre los resultados experimentales obtenidos en el banco con los obtenidos numéricamente, se han realizado modelos numéricos, con la aplicación de los mismos estados de carga que en el banco. La comparativa entre ambos tipos de análisis proporcionó un alto grado de correlación, que sirve para validar la técnica numérico-experimental desarrollada.

Se ha trabajado en el desarrollo de diferentes patrones de ensayo de fatiga críticos, de aplicación a este tipo de vehículos, que pueden ser causa de fallo en semirremolques y por tanto, de gran interés en el sector.

Se ha analizado la fiabilidad y exactitud de los criterios analíticos existentes de predicción de vida a fatiga, para el caso de uniones soldadas. Se ha desarrollado una subrutina de cálculo de vida a fatiga basada en las técnicas actuales de predicción de vida a fatiga de alto número de ciclos, para ser aplicada a vehículos semirremolques. Los métodos aplicados para la predicción están basados en correlaciones numérico-experimentales, desde nivel de probeta de laboratorio, hasta nivel de vehículo completo. Por medio de la aplicación de esta subrutina se ha logrado una gran correlación de resultados numérico-experimentales de estimación de vida frente a fatiga en las uniones soldadas de los semirremolques.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Srinivas Kodiyalam, "Multidisciplinary design optimisation - some formal methods, framework requirements, and application to vehicle design". *International Journal of Vehicle Design*. Volume 25, Numbers 1-2 / 2001. Pages: 3-22. DOI: <http://doi.org/10.1504/IJVD.2001.001904>
- [2] Beermann, H. J.; "The Analysis of Commercial Vehicle Structures"; Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1986, ISBN- 0-85298-701-3.
- [3] Kinstler, John R., Gillespie Thomas D. "Truck Systems Design Handbook". 1992. Estados Unidos, Edit. Society of Automotive Engineers, Inc.
- [4] "Achieving Lightweight Vehicles". SAE Publication, SP 1846 | ISBN: 0-7680-1382-8.
- [5] Carrera, M., Castejón, L., Miralbes, R. et al. (2010) "Behaviour of a 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.
- [6] Miralbes, R., Castejón, L. (2010). "Fatigue Design of Tanker Semi-Trailers", *Dyna* 85(6). pp. 480-488.
- [7] 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
- [8] Malón, 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
- [9] Montaje e instalación en planta de máquinas industriales". Editorial Ideas Propias, ISBN: 8496153681.
- [10] P. Novák, "Estructuras hidráulicas". Bogotá [etc.] : McGraw-Hill, cop. 2001, 2ª ed."
- [11] Ajuste, comprobación y puesta a punto de máquinas y equipos industriales". Editorial Ideas Propias, ISBN: 8496153614.
- [12] Michael Stanzel, "OECD DIVINE Project: road simulator testing". *Int. J. of Heavy Vehicle Systems* 2000 - Vol. 7, No.1 pp. 34 - 51.
- [13] Francis Sing Tse, Ivan E. Morse, "Measurement and Instrumentation in Engineering: Principles and Basic Laboratory Experiments". Marcel Dekker, 1 Sep 1989.
- [14] Draper J., "Modern metal fatigue análisis", Safe Technology, Sheffield. 1999
- [15] W.J. Kang, A.K. Kin and G.H. Kim, "Fatigue failure prediction of press fitted parts subjected to a cyclic loading condition by finite element methods", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol 30, 2007, pp. 1194-1202. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01188.x>
- [16] Hobbacher A., "Recommendations for fatigue design of welded joints and components", International Institute of Welding. 2003
- [17] Eurocódigo 3 - "Proyecto de estructuras de acero". 1993
- [18] M. Rauch and E. Roos. "Life assessment of multiaxially cyclic loaded turbine components". *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Volume 31, Issue 6, pages 441-451, June 2008. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2008.01236.x>

HOMENAJE

Los autores de este artículo queremos rendir homenaje a nuestro amigo y compañero Marco Carrera Alegre, Investigador Principal de diferentes proyectos relativos a esta materia y fallecido inesperadamente el pasado 20 de Mayo. Descanse en paz.

AGRADECIMIENTOS

La publicación de este artículo de investigación ha sido posible gracias a la financiación proporcionada por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través de los proyectos pertenecientes al Plan Nacional de I+D+i TRA2009-14513-C02 y TRA2012-38826-C02, de cuyo segundo subproyecto era Investigador Principal Marco Carrera Alegre.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7886-1.pdf

