

03-020

DEVELOPMENT OF A TEST BENCH FOR EXPERIMENTAL ANALYSIS OF WHOLE SEMI-TRAILER STRUCTURES

Carrera Alegre, Marco ¹; Malón Litago, Hugo ¹; Valladares Herrando, David ¹;
Castejón Herrer, Luis ¹; Martín Lafuente, Carlos ²

¹ Universidad de Zaragoza, ² Lecitrailer S.A.

This paper shows the process of design, development and implementation of the first test bench developed for the heavy vehicles industry, able to analyze the structural behavior of a full semi-trailer under fatigue loading. The bench supposes a worldwide innovation, since there are not similar mechanical systems known able to reproduce in laboratory controlled conditions the critical maneuvers in a vehicle of these dimensions and weight, allowing to predict the vehicle behavior prior to its launch to the market. This involves several advantages over traditional field testing, providing to the manufacturers a tool that improves and significantly shortens the process of designing and testing for these vehicles. The paper includes all phases of the project, from the first proposals to the execution and implementation of those solutions finally adopted

Keywords: *Testing bench; design of semi-trailers; structural behavior; fatigue analysis*

DESARROLLO DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA EL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ESTRUCTURAS COMPLETAS DE SEMIRREMOLQUES

En este trabajo se muestra el proceso de diseño, desarrollo y puesta en marcha del primer banco de ensayos desarrollado para el sector de los vehículos industriales de grandes dimensiones, capaz de analizar el comportamiento estructural de un semirremolque completo sometido a cargas de fatiga. El conjunto supone una novedad a nivel mundial, puesto que no se conocen máquinas similares, capaces de reproducir en un vehículo de estas dimensiones y masas, y bajo condiciones controladas en laboratorio, maniobras reales críticas que permitan predecir el comportamiento del vehículo antes de su lanzamiento al mercado. Ello supone una serie de claras ventajas respecto a las tradicionales pruebas en campo, permitiendo a los fabricantes disponer de una herramienta que mejora y acorta considerablemente el proceso de diseño y pruebas de este tipo de vehículos. El trabajo recoge todas las fases del proyecto, desde el planteamiento de las primeras ideas hasta la ejecución y puesta en marcha de aquellas soluciones finalmente adoptadas.

Palabras clave: *Máquina de ensayos; semirremolques; comportamiento estructural; análisis de fatiga*

Correspondencia: Hugo Malón Litago hml@unizar.es

Agradecimientos: Trabajo realizado en el marco del proyecto DESARROLLO DE UNA BANCADA DE FATIGA PARA SEMIRREMOLQUES, financiado a través del Plan Nacional I +D+i, Ministerio de Educación y Ciencia (TRA2006-05489/AUT), y fondos FEDER.

1. Introducción

Debido a las nuevas y cada vez más exigentes necesidades de los clientes y a la aparición de nuevas metodologías y herramientas de diseño, actualmente es posible el desarrollo de nuevos y optimizados vehículos destinados, en este caso, al transporte de mercancías por carretera (Beermann 2007). Estos métodos permiten, por ejemplo, la obtención de estructuras más ligeras sin descuidar en ningún momento sus características resistentes y funcionales.

Una de las herramientas incorporadas a los nuevos procesos de diseño consiste en la simulación del comportamiento estructural de los vehículos mediante técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos (Hibbitt, Karlsson & Sorensen 1998; Larrode, Castejon & Miravete 1996). Esta herramienta permite simular el comportamiento de las estructuras objeto de desarrollo tanto en términos de rigidez (deformadas, desplazamientos, etc.) como de resistencia (tensiones, deformaciones plásticas, coeficientes de seguridad, etc.). Sin embargo, hay que tener en cuenta que los modelos numéricos desarrollados no son exactos, sino que suponen una aproximación a la solución real del problema (Oñate 1992). Es por ello que dichos modelos requieren de alguna técnica de validación para estimar el grado de aproximación a la solución real.

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 desarrollados. Además, los actuales métodos de ensayo (en campo) aplicados a este tipo de vehículos presentan una serie de limitaciones, sobre todo en cuanto a reproducibilidad y tiempos de ejecución se refiere. Es por ello que en este trabajo se plantea una nueva herramienta de análisis experimental, consistente en una bancada de ensayos de grandes dimensiones capaz de analizar estructuras completas de semirremolques sometidos a diferentes estados de carga representativos de maniobras críticas reales.

1.1 Limitaciones de las técnicas de ensayo actuales

En la actualidad existen diversos métodos de ensayo aplicados no solamente al caso particular de vehículos pesados, sino también a otros sectores tan diversos e importantes como el sector del automóvil, sector aeroespacial, aeronáutico, y demás sectores industriales. Se trata de un campo con una gran amplitud en el cual se desarrollan sistemas para probar y ensayar gran diversidad de estructuras frente a diferentes sollicitaciones (Carrera 2003). Aunque existen diferentes tipos de ensayo los que aquí nos ocupan son los ensayos realizados sobre estructuras de vehículos pesados como son los semirremolques.

Dejando a un lado los sistemas de ensayo utilizados para el análisis de estructuras vehiculares que tratan aspectos diferentes a los resistentes, las técnicas de ensayo de tipo extensométrico en campo son las más utilizadas para el análisis del comportamiento de estructuras completas de este tipo de vehículos (Sing Tse & Morse 1989). Sin embargo, estas técnicas presentan una serie de limitaciones que precisamente son las que se pretenden resolver mediante el desarrollo de la nueva bancada:

- Necesidad de conductor.
- Baja repetitividad.
- Necesidad de circuito de pruebas.
- Tiempos de ensayo elevados.
- Seguimiento dificultoso,...

2. Objetivos

El objetivo de este proyecto consiste en desarrollar una nueva técnica de ensayos de fatiga de semirremolques de grandes dimensiones y otros vehículos pesados enmarcados dentro de la misma categoría. Esta nueva herramienta permitirá abordar la fase de pruebas y ensayos con garantías, resolviendo las limitaciones que presentan los métodos tradicionales.

El desarrollo abordado en este proyecto pretende mejorar de forma considerable el proceso actual de diseño, en este caso, de semirremolques, combinando para ello tareas de simulación numérica con la realización de ensayos sobre bancada. Esto permitirá conocer con un alto grado de precisión el comportamiento de cualquier prototipo desarrollado sin necesidad de ponerlo en funcionamiento por carretera. Se pretende, además, que el sistema sea lo suficientemente flexible como para facilitar el ensayo de otras tipologías de vehículo.

3. Caso de estudio y metodología

3.1 Características y capacidades generales del sistema

La nueva instalación deberá posibilitar el ensayo de estructuras completas de semirremolques. Se trata de estructuras formadas por un conjunto de travesaños y perfiles de acero así como de una estructura de ejes. En este caso se trata de vehículos de tres ejes, de aproximadamente 14 m de largo por 2.5 m de ancho. Estos vehículos cuentan con una estructura de king pin que es la que sirve de elemento de enganche con la cabeza tractora a través de la denominada como "5ª rueda".

Figura 1: Detalles de estructura de un chasis de semirremolque



La bancada deberá ser capaz de "alojar" un vehículo de estas características, excluyendo la estructura de carrozado. Además, el sistema debe ser capaz de reproducir algunas de las maniobras realizadas por este tipo de vehículos consideradas como críticas desde el punto de vista de diseño estructural, en concreto, las siguientes:

- "Giro de radio mínimo + Escalón". Esta combinación de maniobras se da, por ejemplo, cuando el vehículo entra al interior de una nave. Es muy habitual que en la puerta de las naves haya un escalón que tiene que ser superado por los vehículos, mientras están girando 90° para acceder al interior.

- “Marcha rectilínea”. En este caso el vehículo se encuentra realizando maniobras de marcha “normal” en la que se producen una serie de solicitaciones variables debidas, sobre todo, a las irregularidades del terreno por el que circula. Dichas cargas se transmiten a la estructura de semirremolque a través de las ruedas y del sistema de ejes.

3.2 Metodología de trabajo

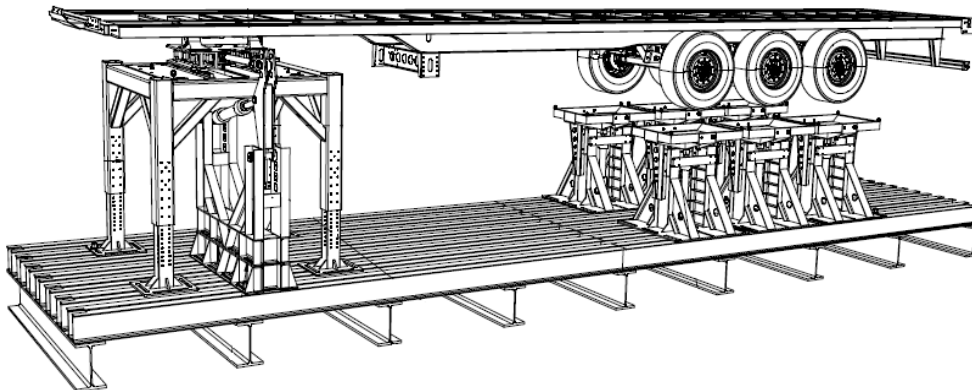
Para alcanzar los objetivos y desarrollos planteados en el proyecto se propone la siguiente metodología de trabajo resumida en los siguientes puntos:

- Análisis del estado del arte. Se trata de analizar los sistemas de ensayo actuales, así como las maniobras consideradas como de interés a la hora de ser simuladas en el banco. Además, deberán ser definidas las variables que quieren ser controladas y medidas durante la realización de cada ensayo.
- Diseño inicial de banco. En base al estado del arte actual se plantearán diferentes soluciones y alternativas, en función de las necesidades planteadas en el punto anterior y que deberán ser cubiertas por el banco. El análisis y valoración de todas las consideradas se concretará en una primera propuesta de bancada.
- Propuesta de solución final. A partir de los resultados obtenidos en la fase anterior se desarrollará la propuesta final que mejor se adapte a los criterios previos definidos.
- Desarrollo de la solución final. Cálculo, diseño y optimización de componentes. Analizadas las diferentes propuestas, y seleccionada aquella que cumpla con los criterios establecidos, en esta fase se procederá al desarrollo técnico de todos los elementos que integran el conjunto.
- Montaje final del banco y puesta en funcionamiento. Por último, se procederá a realizar una fase de ajuste de subsistemas y componentes, así como las primeras pruebas sobre un prototipo de semirremolque completo, con objeto de realizar los últimos ajustes de la bancada y comprobar el correcto funcionamiento del mismo.

4. Resultados obtenidos. Desarrollo de la bancada de ensayos

El diseño general del nuevo sistema se compone de una bancada (obra civil) sobre la cual serán integrados un conjunto de soportes que sustentarán al vehículo, y cuyas partes móviles (actuadores hidráulicos) inducirán el sistema de fuerzas y/o desplazamientos sobre el vehículo, es decir, introducirán sobre el semirremolques las cargas de ensayo (ver Figura 2).

Figura 2: Esquema general de la bancada de ensayos propuesta



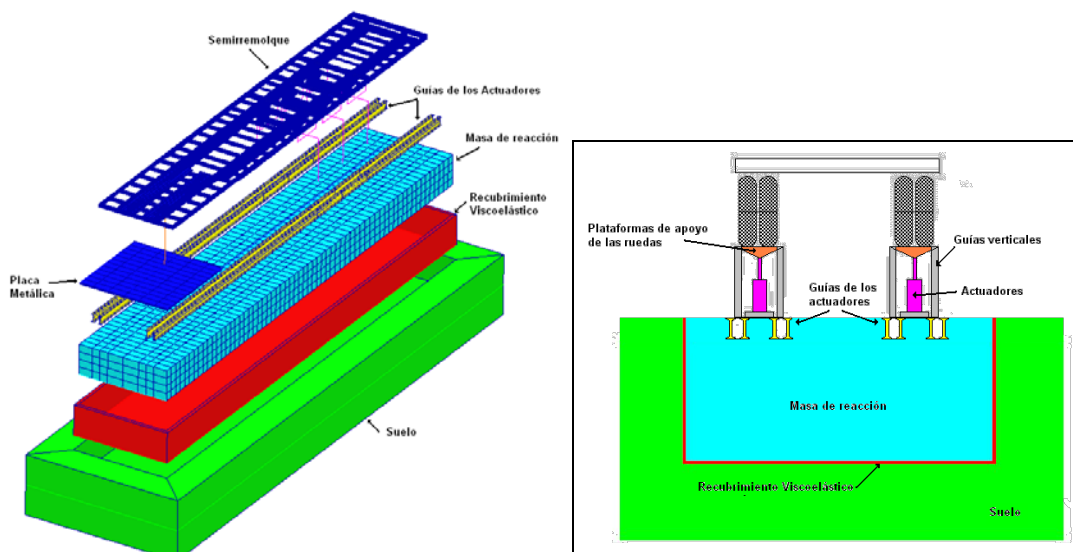
El conjunto consta de un total de seis actuadores verticales encargados de aplicar desplazamientos y/o fuerzas en cada una de las ruedas del semirremolque. Además, un actuador horizontal aplicará las fuerzas y/ desplazamientos en el king-pin equivalentes a las ejercidas por la cabeza tractora del camión durante, por ejemplo, la maniobra de “giro de radio mínimo”. Los elementos básicos que componen este diseño, y que son los que han sido resueltos a lo largo de este proyecto, se resumen en los siguientes:

- Grupo hidráulico
- Armario de potencia
- Armario de adquisición y servocontrol
- Estación de movimiento vertical
- Estación de movimiento horizontal
- Hardware y software de control de la instalación
- Otros elementos

4.1 Desarrollo de la obra civil

La bancada se compone de una masa de reacción empotrada en el suelo, a través de un elemento de aislamiento viscoelástico capaz de aislar en la medida de lo posible el sistema del exterior, impidiendo de esta forma que se transmitan vibraciones tanto de la bancada al exterior como otras posibles que provengan de la nave en donde se sitúe el conjunto.

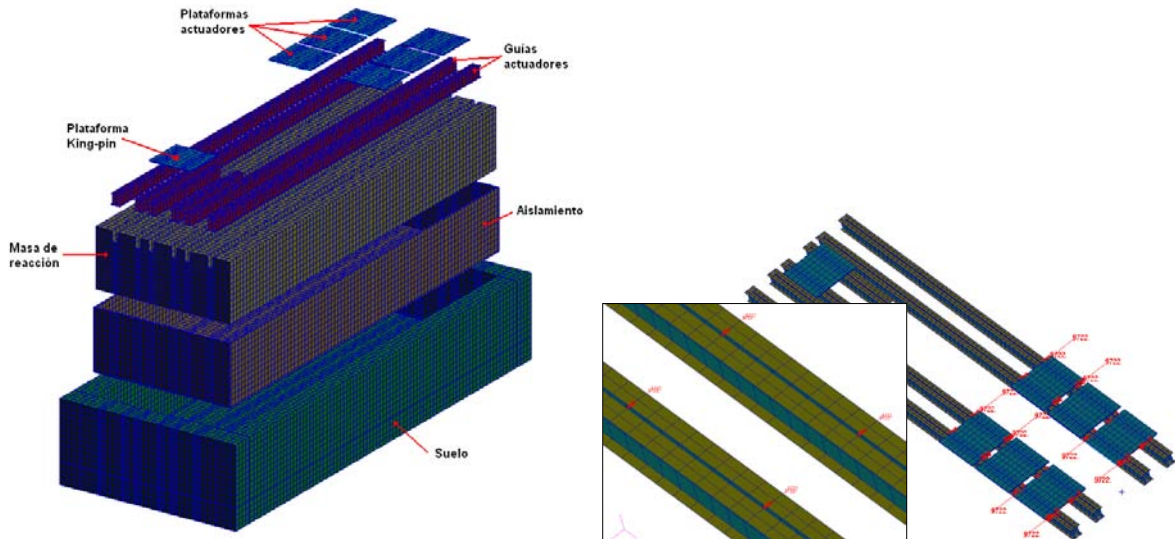
Figura 3: Esquema general de la bancada de ensayos propuesta



En la figura se muestra en color verde un esquema del suelo, sobre el cual se colocaría la masa de reacción intercalando la capa de material viscoelástico (en color rojo) entre ambos. El bloque de reacción estaría formado por una masa de hormigón, sobre la cual se integrarían un conjunto de vigas de acero que servirán como elementos guía de los sistemas de apoyo de los actuadores. La estructura del semirremolque se apoyará sobre una quinta rueda en la zona del King pin y en las seis ruedas, cada una de estas sobre una plataforma de suelo intercambiable, permitiendo el ensayo en diferentes tipos de suelo.

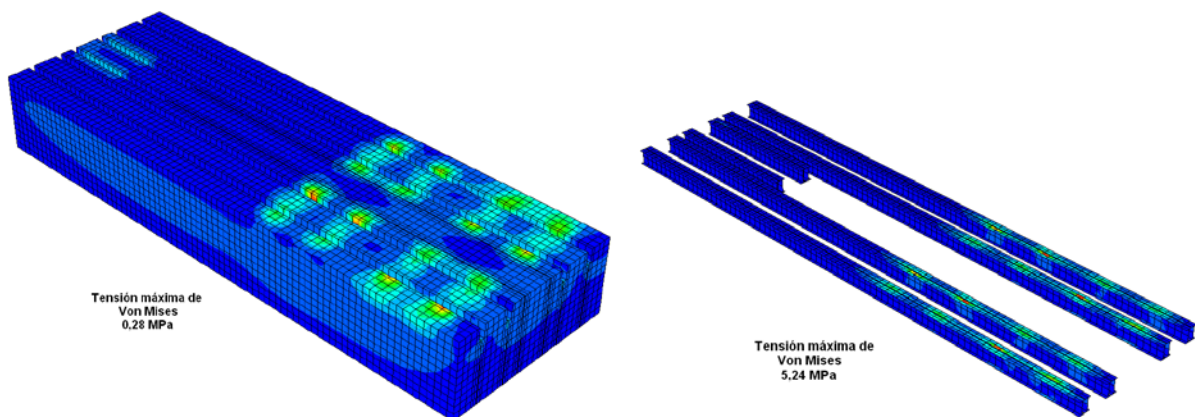
Se han realizado una serie de cálculos con objeto de estimar los niveles tanto de rigidez como de resistencia a los que esta estructura se ve sometida según una serie de casos de carga y condiciones de contorno. El método utilizado para la resolución del problema consiste en la simulación del modelo mediante técnicas basadas en el MEF.

Figura 4: Modelo de Elementos Finitos de la propuesta de bancada



Tras definir completamente todas las variables del problema éste ha sido analizado y han sido obtenidos una serie de resultados tanto en términos de rigidez como de resistencia (Ortiz 1980; Shigley & Mischke 1996; Timoshenko 1961). A continuación se muestra algunos ejemplos de resultados obtenidos en esta simulación:

Figura 5: Mapas de tensiones máximas obtenidas sobre elementos del banco



Tras estudiar en detalle todos los requerimientos que esta estructura debe cumplir para alcanzar unas condiciones óptimas de operación se ha llegado a un diseño final, traducido a unos planos constructivos y a la posterior ejecución y seguimiento de la obra. A continuación se muestran algunos detalles de las diferentes fases de ejecución llevadas a cabo durante el desarrollo de la obra.

Figura 6: Detalles de ejecución de la obra correspondiente a la bancada

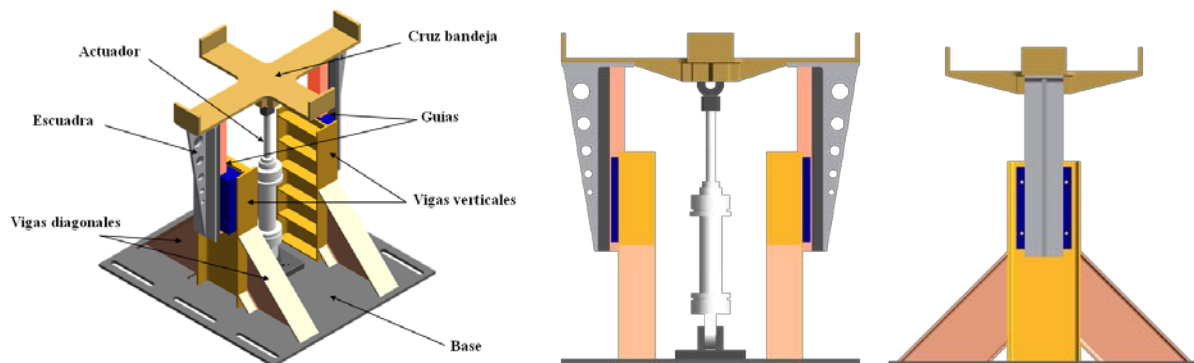


4.2 Diseño y desarrollo de soportes de aplicación de carga

Otro conjunto de elementos que forman parte del sistema es el de los diferentes soportes distribuidos sobre la propia bancada y que tienen las funciones principales de sustentar el semirremolque objeto de ensayo y la de transmitir al mismo todo el conjunto de fuerzas y/o desplazamientos en los puntos de “entrada de cargas”, es decir, tanto en cada una de las ruedas como en la quinta rueda. Estos elementos, accionados por un conjunto de cilindros hidráulicos, serán los encargados de someter al semirremolque a las solicitaciones creadas en las maniobras de giro de radio mínimo con escalón y la de bacheado.

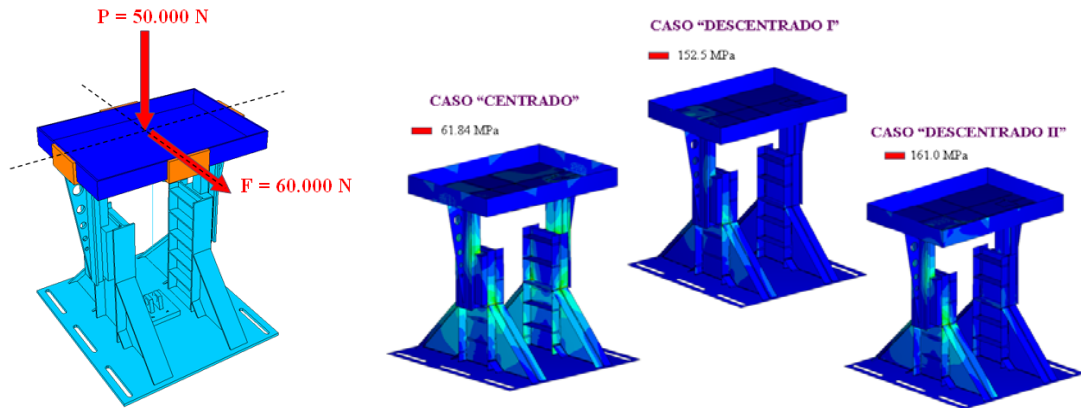
Existen dos puntos de actuación principales: el primero de ellos (soportes verticales) es el encargado de introducir solicitaciones en cada una de las ruedas del semirremolque y el segundo (soporte y mesa de apoyo de la quinta rueda) se encargará de introducir una serie de cargas y desplazamientos sobre la quinta rueda del mismo. La combinación de ambos tipos de sistemas permitirá la simulación de las maniobras especificadas en los objetivos de la bancada. El proceso de diseño del sistema de soportes se ha basado también en el análisis de resultados proporcionados por simulaciones mediante el MEF.

Figura 7: Diseño de partida de los soportes verticales de rueda



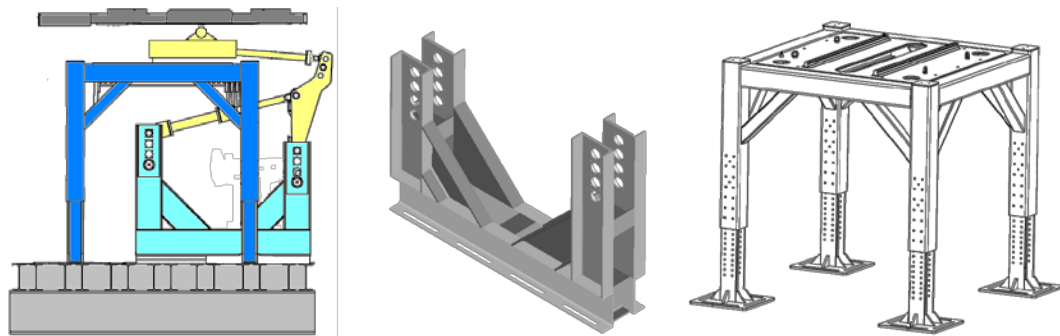
Tras el análisis de de los resultados obtenidos en las simulaciones, se proponen diferentes rediseños y optimizaciones hasta obtener un diseño óptimo de soporte. La siguiente figura muestra algunos detalles de las simulaciones realizadas sobre esta estructura:

Figura 8: Simulaciones numéricas realizadas sobre soporte vertical de rueda



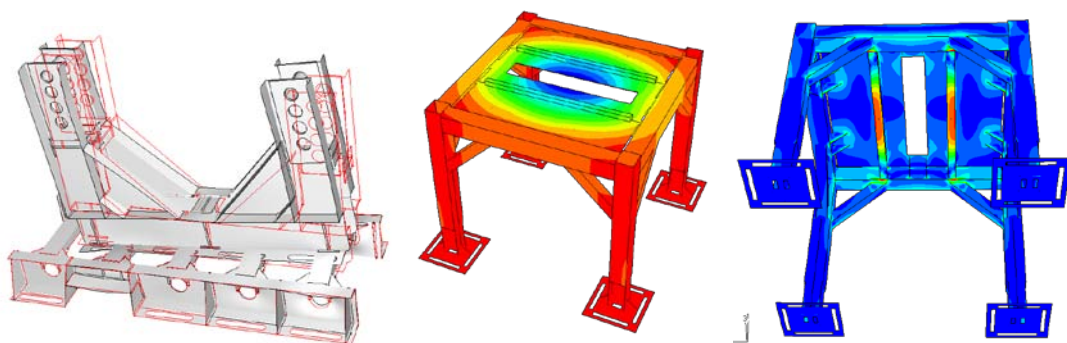
De forma similar se aborda el diseño del resto de soportes de la bancada. En el caso de la estructura de aplicación de cargas sobre el King pin, formada por una mesa de apoyo guiada y por un soporte para la aplicación de cargas horizontales, las configuraciones elegidas son las mostradas en la siguiente figura:

Figura 9: Detalles del modelo de mesa y soporte de aplicación de cargas en King pin



Las geometrías anteriores son simuladas frente a casos de carga crítica, analizando los resultados obtenidos en cada caso. Finalmente, y en base a dichos resultados, se propondrán los diseños finales de estas estructuras.

Figura 10: Simulaciones numéricas realizadas sobre soporte horizontal y sobre mesa



En paralelo al desarrollo de la obra civil, y tras obtener el diseño óptimo, se fueron fabricando el conjunto de soportes según las especificaciones de diseño previamente establecidas. En total fueron fabricados seis soportes verticales (uno para cada una de las ruedas del vehículo a ensayar), la mesa para el apoyo de la zona delantera del semirremolque (en donde se acoplará el carro para el desplazamiento lateral del king pin) y un conjunto de soporte delantero con su base en el cual se colocará el cilindro encargado de producir dichos desplazamientos laterales sobre la quinta rueda acoplada al carro.

Figura 11: Detalles de montaje y terminación de soportes de la bancada



4.3 Diseño y desarrollo del sistema de accionamiento hidráulico

Otro de los sistemas importantes del banco es el hidráulico formado por una serie de elementos integrados que permiten el accionamiento de cada una de las partes móviles de la máquina y, por lo tanto, la aplicación de las diferentes solicitaciones sobre los vehículos ensayados. De forma resumida, el sistema hidráulico de la bancada está compuesto por los siguientes elementos (ver figura 12):

- Actuadores hidráulicos.
- Grupo hidráulico.
- Elementos de conexión y otros.

Figura 12: Vistas generales del grupo hidráulico incorporado en el banco



Mediante la ejecución de la fase de diseño del sistema hidráulico debe conseguirse que las prestaciones del sistema sean adecuadas a las necesidades demandadas en cada momento en función de las características del ensayo a realizar.

4.4 Sistema eléctrico y de control

Los sistemas eléctricos y de control han sido desarrollados de acuerdo a las siguientes directivas y especificaciones:

- 73/23/EEC Directiva Baja Tensión y sus directivas anexas.
- 89/336/EEC Directiva de Compatibilidad Electromagnética y sus directivas anexas,
- EN 60204 Seguridad de máquinas, Partes de los sistemas de mando relativas a seguridad, Parte 1: Principios generales para el diseño.
- EN 292 Seguridad de las máquina. Conceptos básicos, Principios generales para el diseño. Parte 1 (Terminología básica, metodología y Parte 2 (Principios y especificaciones técnicas).

La máquina será gobernada desde un cuadro de mandos denominado armario de control, un panel de mando que se conecta al armario de potencia donde residirá el PLC de control de máquina. El sistema eléctrico consta de dos subsistemas diferenciados: uno de control hidráulico (Armario de Potencia y Armario de Control) y uno de control y medida (SAS).

Para el control de los diferentes sistemas se ha desarrollado también un software específico que será instalado en un PC situado en la caseta de control, en la cual se encuentra también el armario de control. Desde las diferentes pantallas del programa pueden controlarse la mayoría de los sistemas del banco de ensayos y sobre todo pueden controlarse todas las variables obtenidas durante el proceso de control de la máquina como, por ejemplo, los valores de medida obtenidos en los diferentes puntos tratados mediante técnicas extensométricas. La aplicación consta de los siguientes módulos:

- Definición de sesiones.
- Realización de un ensayo.
- Mantenimiento.

4.5 Montaje final de componentes y puesta en marcha de la instalación

Una vez diseñados y desarrollados la totalidad de los componentes que integran la bancada se procede al ensamblaje final de todos ellos, así como a la puesta en marcha de la instalación, con objeto de ajustar y comprobar el correcto funcionamiento de todos los sistemas. Además, se procede a una primera fase de pruebas tanto en vacío como sobre un semirremolque montado sobre los soportes.

Figura 13: Detalles de la integración de componentes y sistemas sobre bancada



Es necesario realizar una primera fase de pruebas y ajustes antes de proceder a la realización del primer ensayo sobre vehículo real. Esta fase es muy importante para asegurar el correcto funcionamiento de todos los sistemas que intervienen en un ensayo. Algunas de estas operaciones consisten en poner a punto los componentes del sistema hidráulico, calibrar los diferentes sensores de la máquina, establecer los límites de control correspondientes, realizar ajustes en el software de control, etc. Una vez ajustados todos los parámetros, se realizarán una serie de pruebas sobre un prototipo de vehículo. No obstante, por motivos de seguridad y simplicidad en primer lugar se realizan una serie de pruebas sobre un vehículo sin carga, con el objetivo fundamentalmente de ajustar distintos parámetros de control así como para probar el correcto funcionamiento de la máquina ya con un vehículo montado en ella. En este ensayo se introducen diferentes perfiles a reproducir por cada uno de los actuadores para ver su comportamiento, sin embargo, estos perfiles iniciales no corresponden a maniobras lógicas sino que están creados sin ningún patrón simplemente a modo de prueba.

Figura 14: Detalles de las diferentes fases de ajustes y pruebas de la bancada



5. Conclusiones

Mediante las diferentes fases del proyecto se ha desarrollado una nueva técnica de ensayos de fatiga aplicados a semirremolques de grandes dimensiones y otros vehículos pesados enmarcados dentro de la misma categoría. Esta nueva herramienta permite la realización de la fase de pruebas y ensayo necesarios para abordar con garantías el desarrollo de este tipo de vehículos, resolviendo las limitaciones que presentan los métodos de ensayo tradicionales. El desarrollo y puesta en marcha de la bancada supone una notable mejora en el proceso de diseño de este tipo de vehículos, ya que las actuales fases de ensayo de prototipos, basadas fundamentalmente en pruebas en circuitos cerrados, implican grandes costes tanto económicos como sobre todo de largos tiempos de ejecución.

A lo largo de las diferentes fases del proyecto se ha realizado el diseño detallado de cada uno de los componentes y/o subsistemas que integran la bancada:

- Grupo hidráulico
- Armario de potencia
- Armario de adquisición y servocontrol
- Estación de movimiento vertical
- Estación de movimiento horizontal
- Hardware y software de control de la instalación
- Otros elementos

Además del diseño y optimización de cada uno de ellos, se ha descrito el proceso de desarrollo e integración de todos los componentes sobre el banco y la fase de puesta en marcha. Los componentes mecánicos han sido diseñados utilizando herramientas de simulación basadas en el Método de los Elementos Finitos, el cual es capaz de mostrar el comportamiento de los mismos cuando se encuentran sometidos a diferentes estados de carga correspondientes con la realidad.

Los resultados obtenidos durante la fase de pruebas realizadas con este banco servirán, por una parte, para observar el comportamiento real de la estructura y por otra para validar los modelos teóricos utilizados en la fase de simulación numérica.

6. Referencias

- Beermann, H. J. (2007). *The analysis of Commercial Vehicle Structures*. Mechanical Engineering Publications Limited. Universidad de Michigan: Guy Tidbury.
- Carrera, M. (2003). Fatigue analysis of a semitrailer axle support by means of FEM and application of elastic-plastic model for welding joints and thermally affected zones. COMPLAS VII, Barcelona.
- Hibbitt, Karlsson & Sorensen (1998). Abaqus standard user's Manual. Versión 5.8, vol. I, vol. II, vol. III, Hibbitt, Karlsson&Sorensen Inc.
- Larrode E., Castejón L. & Miravete A. (1996). Analysis of Large Structures for Ground Transportation Applications. 29th ISATA International Symposium on Automotive Technology and Automation. Florencia (Italia). 3-6 Junio 1996. Road and Vehicle Safety, pp. 345-351.
- Oñate, E. (1992). Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España.
- Ortiz Berrocal, L. (1980). Resistencia de materiales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid.
- Shigley J. E., & Mischke. C. R. (1996). Diseño en Ingeniería Mecánica. 1996. México. Edit. McGraw-Hill/Interamericana de México S. A. de C. V. 4ta edición en español.
- Sing Tse, F. & Morse E. I. (1989). Measurement and instrumentation in engineering: principles and Basic Laboratory Experiments. New York [etc.] : Marcel Dekker, cop.
- Timoshenko, S.P. (1961). Theory of elastic stability. 2ª Ed., Mc Graw- Hill, N.Y.