

ESTUDIO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE COCHE FERROVIARIO SEGÚN NORMAS EUROPEAS

Ruiz, Miguel E., Cocco, Leonardo J.
Ingenieros Civiles

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.
mruiz@efn.uncor.edu; lcocco@efn.uncor.edu

RESUMEN

En los últimos tiempos se han verificado importantes inversiones y avances en la industria ferroviaria de nuestro país. Lamentables siniestros acaecidos recientemente junto con el atraso tecnológico del material rodante y la obsolescencia de la infraestructura ha motivado compra de equipos, inversiones en infraestructura y readecuaciones de maquinaria existente en desuso con el objeto de que satisfagan las normas actualmente vigentes.

Uno de los puntos más relevantes de la estrategia estatal en la renovación ferroviaria es la readecuación de coches que datan de los años 60. Estos vehículos fueron completamente remodelados en su interior y exterior, equipados con asientos, maleteros y equipos de aire acondicionado y otros dispositivos de confort y seguridad. Los coches originales presentaban puertas de acceso en los extremos del mismo, lo que dificultaba la circulación de los pasajeros dentro del vehículo y las operaciones de ingreso y egreso. Además, los anchos de las puertas no se consideran suficientes en la actualidad. Estas características de los accesos implicaron importantes modificaciones en la estructura resistente del vehículo lo que motivó el estudio numérico del comportamiento del coche modificado.

La modernización ferroviaria vino acompañada con la adopción de algunas normas actuales de origen europeo. En particular, para la verificación de la estructura se utilizó la norma UNE-12663 en donde se especifican las cargas y combinaciones de carga a aplicarse en la verificación de coches nuevos o usados, según su categoría (pasajeros, cargas, locomotoras, etc.).

En este artículo se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el análisis numérico del coche y el impacto de la modificación de la estructura en el comportamiento global del vagón.

ABSTRACT

In recent times important investments and infrastructure developments in the railway industry in our country have been observed. Regrettable incidents occurred recently along with the technological backwardness of wagons and infrastructure obsolescence motivated the purchasing of new equipment, infrastructure investments and modifications of existing obsolete machinery in order to meet current international and local regulations.

One of the most important tasks of the state rail renewal strategy is the adaptation of cars dating from the 60s. These vehicles were completely refurbished, equipped with seating, luggage and air conditioning equipment and other comfort and safety devices. The original cars had doors at the ends which hindered the circulation of passengers within the vehicle and their entry and exit operations. In addition, the original widths of the doors are not considered sufficient at present due to the new regulations and standards. The modification of the doors to meet current standards involved major changes to the main vehicle structure that motivated a non-linear numerical study of the behavior of the modified car.

The railway modernization was accompanied by the adoption of some current European standards. In particular, for the verification of the structure the standard UNE- 12663 was adopted. In this publication loads and load combinations to be applied in the verification of new or used cars are specified by category (passenger cars, cargo cars, locomotives, etc.).

This article summarizes the results of the numerical analysis of the car and the impact of the change in the structure in the overall performance of the car.

INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta el resumen de las tareas realizadas y resultados obtenidos durante el estudio del comportamiento tensional y deformacional de la caja estructural de un coche ferroviario de transporte de pasajeros fabricado por la compañía ferroviaria Benito Roggio Ferroindustrial (BRF). Este estudio está motivado por la necesidad de verificar la caja estructural de este vehículo frente a las solicitaciones normales de servicio atendiendo a que su estructura debió modificarse como consecuencia de las regulaciones actuales de la Comisión Nacional de Regulación del Transporte (CNRT). El coche objeto del presente estudio es denominado "Coche AERFER T1000" y la modificación de la estructura está dada por la necesidad de incorporar dos vestíbulos de ingreso nuevos (en la zona central del coche).

La aplicación de métodos computacionales en la industria ha ganado terreno en las últimas décadas, y la industria ferroviaria no es la excepción. Algunos ejemplos de simulaciones computacionales de vehículos ferroviarios se pueden encontrar en [1] y [2], o aplicado a las ruedas de los coches en [3]. Una revisión actual de los métodos computacionales aplicados a trenes se puede encontrar en [4].

Para la verificación de la estructura se adoptó la norma [6] en donde se especifican claramente las cargas a aplicar en la estructura, sus combinaciones, sus puntos de aplicación y los límites de verificación que deben adoptarse. Las verificaciones realizadas se llevaron a cabo utilizando un modelo de elementos finitos no lineal, cuyos aspectos y resultados se discuten en este artículo. Como resultados se presentan las verificaciones normativas, referentes a los estados límites de servicio, y estado límite último. Los análisis realizados indicaron la necesidad de reforzar las zonas intervenidas para acomodar los nuevos ingresos, situación que se resolvió con refuerzos ubicados en las zonas afectadas.

DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO

El coche cuya estructura se verificó se denomina "Coche AERFER T1000" y consiste en una modificación de la geometría original de la estructura para acomodar dos nuevos vestíbulos de acceso en la zona central del coche. Originalmente, los ingresos se hacían por los extremos del coche, pero en la actualidad la CNRT requiere de mayor espacio de ingreso y egreso, por lo que se debían agregar a estas puertas dos vestíbulos nuevos. La geometría modificada del coche se ilustra en la Figura 1.

El coche tiene una capacidad nominal de 76 pasajeros sentados. El coche tiene 21.8 m de largo y 2.85 m de ancho. La altura del coche es de 3.7 m (medido desde la superficie del riel). El piso del coche está constituido por un entramado de perfiles metálicos sobre el cual se suelda la chapa de piso que recibe el solado del coche. El techo está formado por largueros y elementos transversales que se continúan hacia los flancos y se vinculan al emparrillado inferior. Los flancos y el techo se recubren, en el interior, con material plástico y luego se colocan los elementos funcionales: barrales, asientos, portaequipajes, etc. La parte exterior de los flancos está cubierta

por una chapa que se consideró colaborante en este estudio. La chapa que constituye el piso del coche se despreció con el objeto de eliminar este elemento del análisis ya que existía cierta controversia acerca de la tipología más adecuada para el mismo. Con esta aproximación (despreciar la colaboración del piso) se elimina el problema y, tal como se concluye más adelante, las dos tipologías disponibles se consideran válidas desde el punto de vista de su comportamiento estructural.

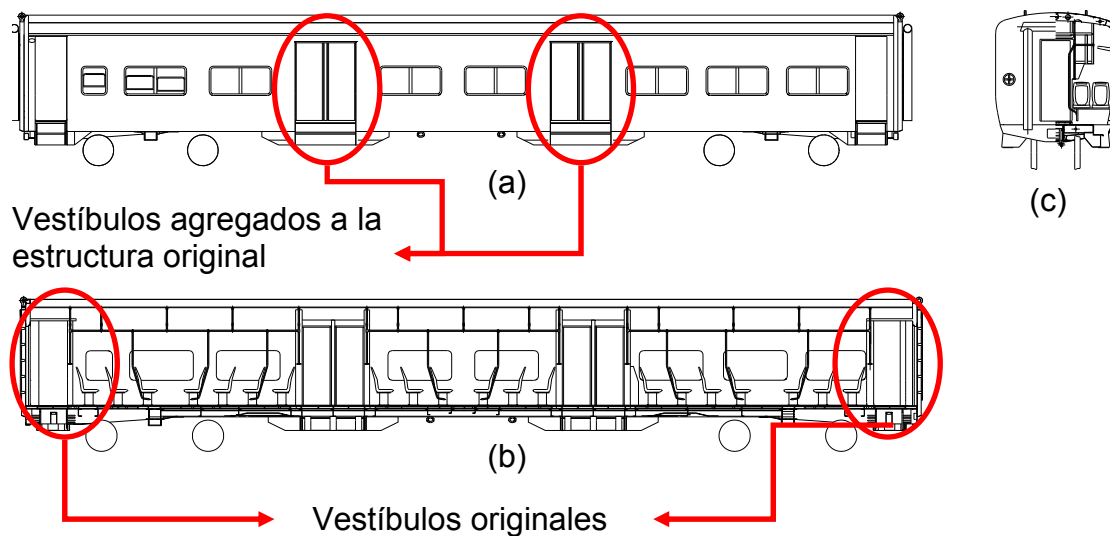


Figura 1. Geometría general del coche AERFER T1000 modificado. (a) Vista lateral. (b) Corte longitudinal. (c) Corte transversal.

La introducción de nuevos vestíbulos implicó el corte de uno de los largueros del emparrillado (los elementos laterales extremos) por lo que se reforzó la zona mediante chapas soldadas a los elementos remanentes de la estructura para aliviar la concentración de tensiones del sector (los nuevos ingresos significaron una interrupción del 50% de los elementos resistentes principales de la estructura constituidos por los cuatro largueros del entramado del piso del coche).

CARGAS DE DISEÑO SEGÚN NORMA APLICADA

Las cargas actuantes en un vehículo ferroviario son variadas y su determinación es un proceso de suma complejidad debido a la naturaleza de las fuerzas y la interacción entre cargas horizontales transversales y longitudinales, y cargas verticales. En este sentido cabe destacar la acción dinámica que se ejerce sobre los elementos, la dinámica propia de los choches, y agentes externos (viento y fuerzas centrífugas, por ejemplo) se combinan para que una evaluación detallada de las acciones y la elaboración de un análisis de carga preciso se vuelva una tarea compleja. Por esta razón, las normas vigentes especifican las cargas a utilizar en los ensayos de homologación y establecen los criterios de aceptación de los mismos en términos de deformaciones elásticas y permanentes máximas. La intensidad de las

cargas reglamentarias para ensayos debe ser tal que cubran los estados de cargas que actuarán sobre los elementos, de modo que un correcto desempeño de prototipos durante las pruebas de carga y evaluaciones numéricas teóricas (como la presente) garanticen un correcto desempeño durante su vida útil.

A los efectos de la determinación de las cargas, la norma [6] requiere de una clasificación según el destino del coche. En este caso, se adoptó categoría P-I, de común acuerdo con el fabricante y de acuerdo a las características del vehículo. En la Figura 2 se presenta un esquema en donde se indica la forma en que actúan las cargas reglamentarias en el coche. A continuación se indican las sobrecargas consideradas, en dirección horizontal y vertical. Las cargas de peso propio de la estructura se tuvieron en cuenta a través de la geometría del coche y el peso específico del acero.

Sobrecargas horizontales. En esta categoría se encuentran siete acciones, de acuerdo al detalle de la Tabla 1.

#	Descripción	Valor [kN]
A.1	Fuerzas de compresión en la zona de topes y/o ganchos	2000
A.2	Fuerzas de compresión por debajo de la zona de topes y/o gancho	No aplica
A.3	Fuerza de compresión aplicada en diagonal a nivel de los topes	No aplica
A.4	Fuerza de tracción a nivel del gancho	1000
A.5	Fuerza de compresión 150 mm por encima del suelo de la estructura, en el cabecero	400
A.6	Fuerza de compresión a nivel medio (parte baja de la ventana)	300
A.7	Fuerza de compresión a nivel del batiente del techo	300

Tabla 1 - Cargas horizontales para la verificación del coche

Sobrecargas verticales. En esta categoría se encuentran tres acciones, de acuerdo al detalle de la Tabla 2.

#	Descripción	Valor [kN]
A.8	Carga máxima de operación	$1.3 \cdot g \cdot (m_1 + m_2)$
A.9	Elevación de un extremo del vehículo por los puntos específicos de elevación	$1.1 \cdot g \cdot (m_1 + m_2)$
A.10	Elevación de todo el vehículo por los puntos específicos de elevación	$1.1 \cdot g \cdot (m_1 + 2 \cdot m_3)$

Tabla 2. Cargas verticales para la verificación del coche

En donde m_1 es el peso completo del coche y sus accesorios fijos (por ejemplo, equipos de aire acondicionado y es igual en este caso a 325kN); m_2 es el peso de la sobrecarga de pasajeros tal como se detalla más adelante en este apartado; m_3 es el peso de cada bogie del coche, estimado por el fabricante en 50 kN; g es la aceleración de la gravedad, adoptada igual a 9.806 m/s^2 , para el caso que se conozcan las masas en lugar de los pesos.

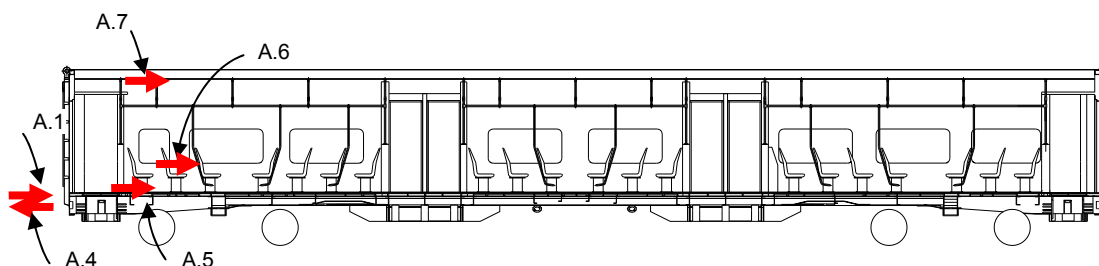


Figura 2. Cargas horizontales de verificación según la normativa Requisitos de dimensionamiento de las estructuras de los vehículos ferroviarios

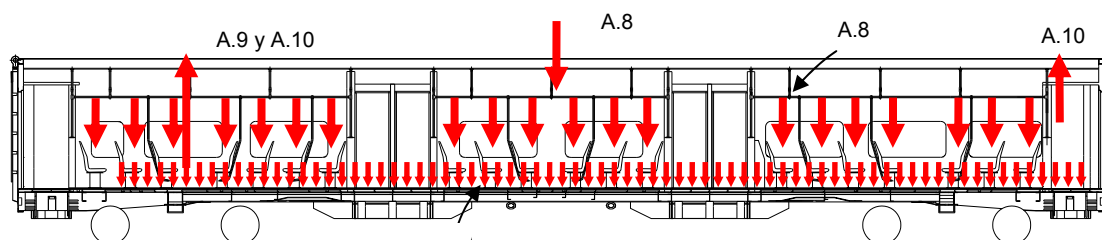


Figura 3. Cargas verticales de verificación según la normativa Requisitos de dimensionamiento de las estructuras de los vehículos ferroviarios

En la Tabla 2 la intensidad de la carga es el total a considerar en el cálculo, incluyendo pasajeros a pie y sentados. La carga A.8 surge de considerar la máxima carga de uso del coche (valores a asignar a la variable m_2), que para este caso resultó de considerar la carga total teniendo en cuenta 76 asientos disponibles y un área libre para pasajeros de pie de 20 m^2 , de acuerdo a los planos del coche. La

distribución de esta carga se observa en la Figura 3.

Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga a aplicar son las presentadas en la

#	Descripción	Acciones a considerar
C.1	Fuerza de compresión y carga vertical	A.1 + A.8*
C.2	Fuerza de compresión y carga vertical mínima	A.1 + m ₁
C.3	Fuerza de tracción y carga vertical	A.4 + A.8*
C.4	Fuerza de tracción y carga vertical mínima	A.4 + m ₁

Tabla 3. Cargas verticales para la verificación del coche

*La carga A.8 para las combinaciones de carga no lleva el factor de mayoración igual a 1.3 que figura en la Tabla 2. Cabe destacar que además de las combinaciones C.1 a C.4 se verificarán que los casos de carga A.1 a A.10 no sobrepasen los límites admisibles en forma separada.

Criterios de verificación

De acuerdo a [6] se verificaron dos condiciones: Estado Límite de Servicio (ELS) y Estado Límite Último (ELU), para cada una de las combinaciones indicadas anteriormente. Las expresiones propuestas por la norma para cada uno de ellos son las siguientes:

$$\text{ELS: } \frac{R}{\sigma_{\text{Von_Mises}}} \geq 1.15 \quad (1)$$

$$\text{ELU: } \frac{R_m}{\sigma_{\text{Von_Mises}}} \geq 1.50 \quad (2)$$

En donde R es la tensión de fluencia del material, R_m es la tensión de rotura del material y $\sigma_{\text{Von_Mises}}$ es la tensión calculada según el criterio de Von Mises, determinada directamente con el programa de cálculo.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DE ANÁLISIS

Modelo de elementos finitos

El modelo numérico elaborado consiste en una discretización de 300565 elementos finitos de placa de tres nodos y con aproximación lineal. Las cargas externas aplicadas en el modelo tienen la intensidad, dirección y sentido indicado en las figuras de los apartados anteriores. En la Figura 4 se presenta una ilustración del modelo elaborado.

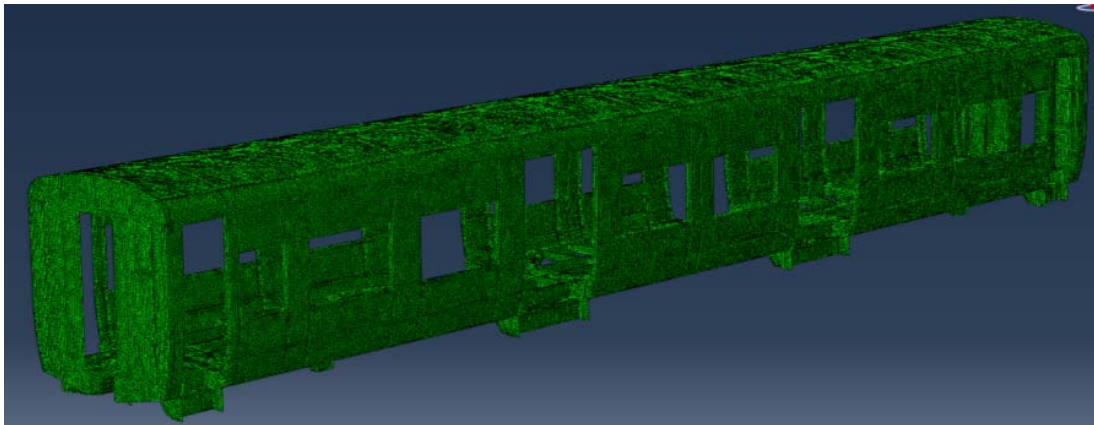


Figura 4. Geometría del modelo de elementos finitos del coche

El modelo elaborado contempla un comportamiento elasto-plástico como ley constitutiva del material de los elementos estructurales. De este modo el análisis realizado simula el comportamiento no lineal de la estructura cuando la carga aplicada provoca esfuerzos mayores que el límite de proporcionalidad del material. Debido a esto, el análisis realizado es capaz de detectar zonas de plastificación y estudiar los caminos alternativos de carga que surgen cuando ocurren plastificaciones locales. Este tipo de análisis permite estudiar los mecanismos resistentes secundarios cuando parte de la estructura (elementos principales más solicitados) alcanzan la tensión de fluencia. No se consideró la no-linealidad geométrica del problema debido a que los desplazamientos calculados mediante análisis lineales eran muy reducidos y no se esperan efectos de segundo orden sobre los mismos. Esto se comprobó a través de corridas no-lineales geométricas en donde los resultados obtenidos no difieren de los indicados anteriormente.

En el modelo se incluyeron todos los elementos estructurales que contribuyen a la resistencia de las cargas externas. Para ello se reconstruyó fielmente la geometría del coche de acuerdo a los planos de relevamiento provistos por BRF, respetando espesores de chapas, perfiles y refuerzos. El modelo, además, tiene en cuenta las chapas de los flancos y techo como elementos colaborantes.

Material

El material adoptado para el modelo numérico es acero F24 (similar al SAE 1020), para todos los elementos componentes. El comportamiento del material en la zona plástica (cuando las tensiones superan la fluencia), responde a un modelo elasto-perfectamente plástico. Sin embargo, en el modelo numérico se introdujo un muy leve endurecimiento por deformación del material, para evitar problemas numéricos asociados con la convergencia del problema [5].

RESULTADOS NUMERICOS

Verificación de los ELS y ELU

En este apartado resumen los resultados obtenidos de los análisis y verificaciones realizadas con los modelos descritos anteriormente.

Las solicitaciones máximas en la estructura se obtienen a partir de la combinación C.2, que combina la carga de compresión en la zona de enganche con el peso propio del coche sin sobrecarga de uso. Este caso predomina sobre el caso C.1 ya que la existencia de una carga vertical inferior a la del caso C.2 reduce las tracciones en el bastidor por efectos de una menor flexión. Esto conduce a que las tensiones de compresión que se desarrollan por las cargas en zona de enganche sean mayores que el caso C.1.

En la Figura 5 se muestra la distribución de tensiones en el bastidor del coche para el caso de carga C.2. En la ilustración (sólo se muestra la mitad del coche) se observa que los sectores más solicitados (representados en color rojo) se ubican localmente en los puntos donde existen singularidades en el entramado: unión de refuerzos, transversales y diagonales. En estos puntos, los cambios de dirección de las fuerzas conducen a concentración de tensiones de alcance local, lo que genera la plastificación de la zona. Sin embargo, se observa que la plastificación no se propaga a los elementos adyacentes, lo que indica que la capacidad resistente del bastidor en su conjunto es aceptable.

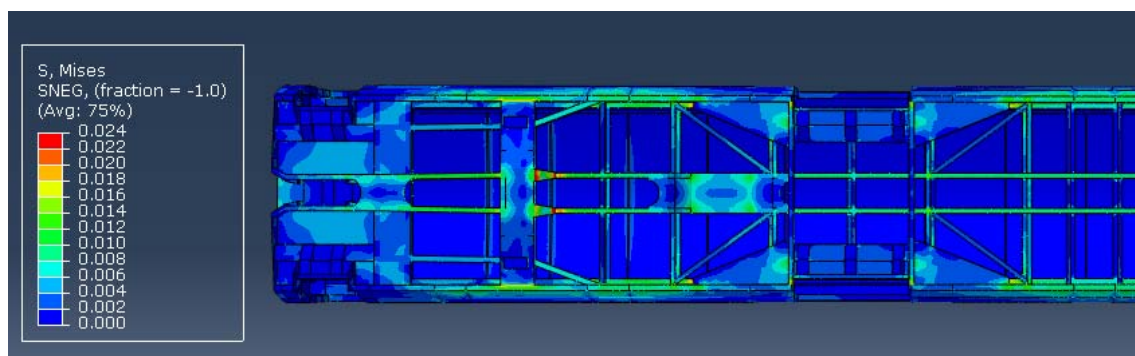


Figura 5. Tensiones de Von Mises en bastidor inferior del coche para el caso de carga C.2. Unidades: t/mm^2 ($1 t/mm^2 = 10000 MPa$).

En la Figura 6 se observa claramente la interrupción de los largueros externos, interrumpidos por el nuevo vestíbulo en cada flanco. Se observa una leve concentración de tensiones como consecuencia de la redistribución de fuerzas que ocurre en ese sector. También pueden apreciarse las chapas de refuerzo cuya colocación se recomendó como parte de este estudio, para aliviar el nivel de tensiones que se registraba antes de su incorporación. Por razones de espacio no se incluyen aquí figuras en donde se observa el coche sin refuerzos. Sin embargo, este caso presentaba importantes zonas de plastificación en coincidencia con la interrupción de la estructura.

Los casos de carga A.1 a A.10, considerados en forma individual y con los factores de carga señalados en la sección 0 de este informe, generan solicitaciones internas menores que las combinaciones de cargas.

En la Figura 6 se ilustra la deformada del coche para la combinación de cargas C.2. Allí puede observarse que los desplazamientos son reducidos, y son del orden de los 12 mm en los sectores más flexibles correspondientes a los dinteles de las aberturas que no cuentan con refuerzos. Sin embargo, estas partes del coche no se consideran críticas desde el punto de vista de la seguridad del conjunto ya que la chapa de los flancos es un elemento estructural secundario. Además, en el modelo se simplificaron algunos elementos de refuerzo existentes en los flancos y techo que colaborarían en reducir la flecha indicada en el coche, pero que no se incluyeron en la discretización ya que no forman parte de la estructura resistente principal del vehículo. En cuanto a los elementos estructurales primarios (entramado inferior, flancos y techo) las deformaciones son bajas, lo que indica que, a pesar del nivel de carga elevado que se impone a la estructura, la geometría del coche se conserva. Este aspecto se considera fundamental desde el punto de vista de la seguridad de los pasajeros.

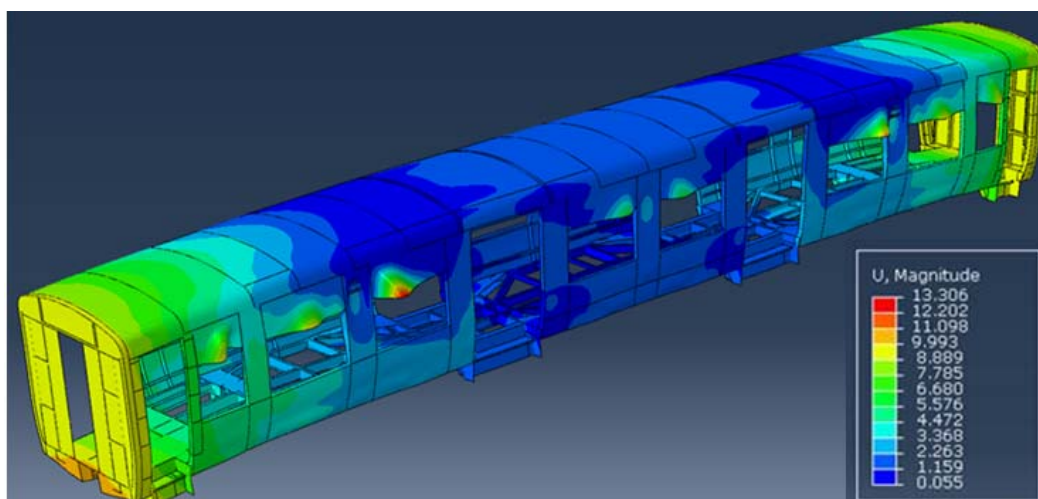


Figura 6. Deformada del coche para la combinación C2 en mm.

Un aspecto para destacar es la deformación que experimenta el coche en el

estado de carga A.8 (carga máxima de operación considerando coche lleno y 100% del peso de la estructura y de elementos no estructurales). La deformada estimada por el modelo se ilustra en la Figura 7.

En esta ilustración se puede apreciar claramente que los desplazamientos verticales se concentran en la zona central del coche. También puede observarse cómo se distorsionan los marcos de las puertas centrales del coche, aunque la misma se consideró aceptable para este tipo de estructuras (del orden del 0.25 %).

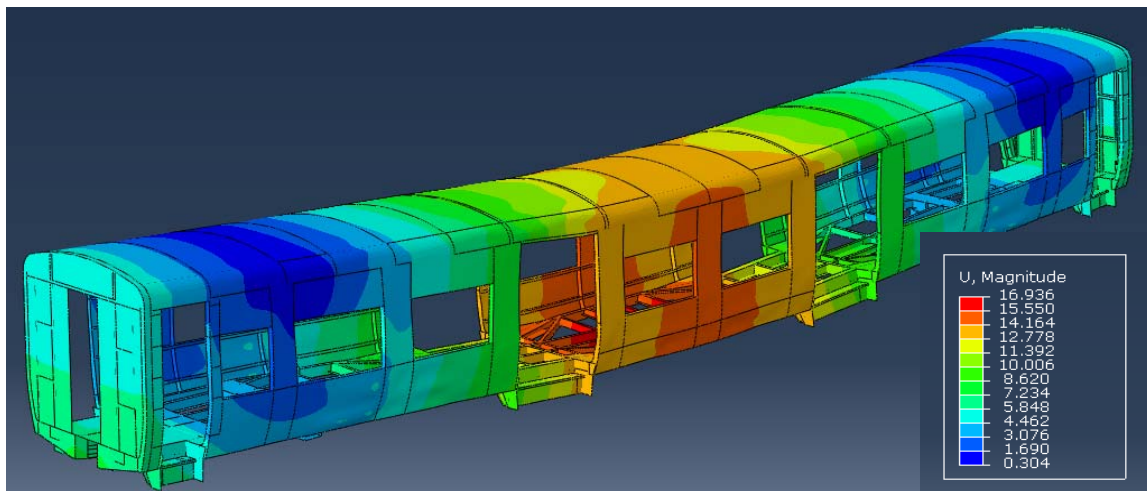


Figura 7. Deformada del coche para el estado de carga A.8 (vista 3D) en mm.

Con el objeto de completar el análisis se incorporó al modelo la chapa del piso en las dos versiones disponibles por el fabricante. El análisis mostró claramente que la colaboración de cualquiera de las dos alternativas en la resistencia de las cargas reglamentarias era marginal, por lo que la aproximación abordada al inicio del estudio resultó satisfactoria (despreciar la colaboración del piso) y se validaron, de este modo, las dos tipologías existentes.

Tal como surge de los cálculos realizados, todos los elementos resistentes de la estructura del coche verifican las condiciones normativas descritas anteriormente en este artículo. Como conclusión general, las condiciones del Estado Límite de Servicio y Estado Límite Último se verifican satisfactoriamente, en la condición reforzada del coche.

De acuerdo a los resultados obtenidos con el modelo numérico, se observan zonas de plastificación local. Estas zonas son reducidas por lo que se consideró que no atentan contra la seguridad estructural del coche. Los análisis elaborados mostraron cómo las cargas se distribuyen en caminos alternativos (elementos estructurales adyacentes) para equilibrar las solicitaciones externas, una vez que se alcanza la tensión de fluencia en un punto de la estructura. Cabe destacar que la norma [6] en su punto 3.4.2 permite este tipo de comportamiento.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un análisis numérico para estudiar el comportamiento de la estructura del vehículo ferroviario BRF. El análisis numérico elaborado permite extraer esfuerzos internos en los distintos elementos componentes para realizar la verificación seccional de los mismos. El modelo numérico se desarrolló de modo tal que represente fielmente la geometría real del coche, que se reprodujo a partir de planos de relevamiento de un coche existente realizado por personal de BRF.

Las verificaciones realizadas contemplan los estados límites de servicio y último. En ambos casos se obtuvieron resultados satisfactorios, según los límites establecidos por la norma aplicada. Para la combinación más demandante se hallaron zonas de plastificación muy localizadas que se consideraron aceptables.

Los análisis realizados permitieron establecer refuerzos para compensar la pérdida de resistencia que significó la interrupción de los largueros de la estructura principal del coche.

REFERENCIAS

- [1] Y.H. Tang, J.E. Gordon, H. Yu, y D.Y. Jeong. "Finite element analyses of railroad tank car head impacts". *ASME Rail Transportation Division Fall Technical Conference, RTDF2008-74022, Chicago, Illinois (USA), 2008*
- [2] D. Ribeiro, R. Calçada, R. Delgado, M. Brehm, y V. Zabel. "Finite-element model calibration of a railway vehicle based on experimental modal parameters". *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 51(6), 821-856, 2013.
- [3] T. M. Rusin, D. G. Kleeschulte, y J. M. Coughlin "Application of the Finite Element Method in the Development of Improved Railroad Car Wheel Designs". *J. Manuf. Sci. Eng.*, 101(3), 378-384, 1979.
- [4] S. Iwnicki. "Handbook of railway vehicle dynamics", CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
- [5] T.L. Anderson. "Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications", 2ndEd., CRC Press, Boca Raton, EE.UU., 1995.
- [6] "Requisitos de dimensionamiento de las estructuras de los vehículos ferroviarios". *UNE – EN – 12663, 2000.*