



## Desarrollo de vehículos ferroviarios - vagón doble piso – mediante simulación computacional

Elvira, G.<sup>(1)</sup>; Lafogiannis, G.<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>INTI-Mecánica

### Introducción

Las deficiencias del sistema ferroviario en nuestro país y específicamente en la ex línea Sarmiento, son temas recurrentes en la agenda social. Los usuarios del tren deben someterse en muchos casos a condiciones desfavorables a causa de la creciente demanda de capacidad de transporte, sobre todo en el ramal Once–Moreno, por el que viajan más de nueve millones de pasajeros al mes. Por tal motivo la concesionaria **TBA (Trenes de Buenos Aires)** decidió dar una solución innovadora a este problema mediante la incorporación de vagones de dos pisos (ver Fig.1), desarrollados y construidos íntegramente en Argentina, cuya tarea encomendó a la empresa **Emprendimientos Ferroviarios S.A. (EMFER)**.

Esto llevó a la fabricación de una primera formación compuesta de cinco coches simple piso potenciados y cuatro coches doble piso. El **INTI**, a través de su **Centro de Mecánica**, acompañó en este desarrollo mediante avanzadas técnicas de simulación computacional los análisis estáticos y dinámicos de la estructura completa del coche ferroviario. Estas herramientas permitieron dar al proceso de diseño rapidez y confiabilidad en el análisis, para pasar a la etapa de fabricación en menor tiempo. Por otro lado se pudo conocer en forma muy precisa el comportamiento de la estructura, al punto de descartar procesos de experimentación en prototipos que incrementarían los costos y tiempos del desarrollo.



Fig. 1: Coche ferroviario doble piso

### Metodología

A partir de la definición por parte de la empresa EMFER de una primera configuración estructural del coche ferroviario, se pudo disponer de toda la documentación técnica y planos (ver Fig.2), que

permitieron conocer la geometría, dimensiones y tipos de elementos estructurales que conforman la estructura del vehículo. La etapa siguiente fue la definición y preparación del modelo computacional.

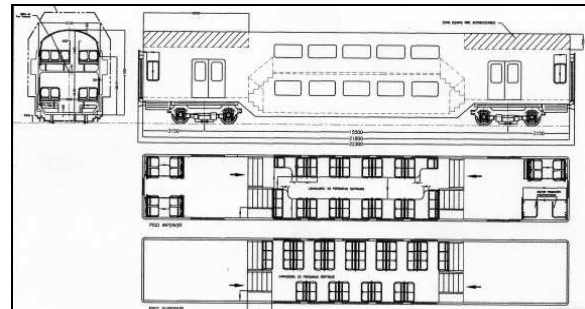


Fig. 2: Planos técnicos de configuración inicial

### Hipótesis de análisis

- ✓ Comportamiento del material elástico lineal (no plastificación)
- ✓ Estados de carga de naturaleza estática

### Modelo Computacional

A fin de poder conocer el comportamiento estático y dinámico en el coche ferroviario de doble piso, se realizó un modelo computacional (ver Fig.3) basado en el método de los elementos finitos. Se modeló la cabecera del chasis con elementos de cáscara tridimensional, debido a sus características geométricas particulares, y al resto de la estructura con elementos de viga (wire frame) (ver Fig.4 Y 5).

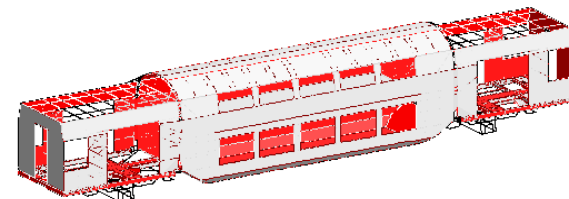


Fig.3: Modelo Computacional completo

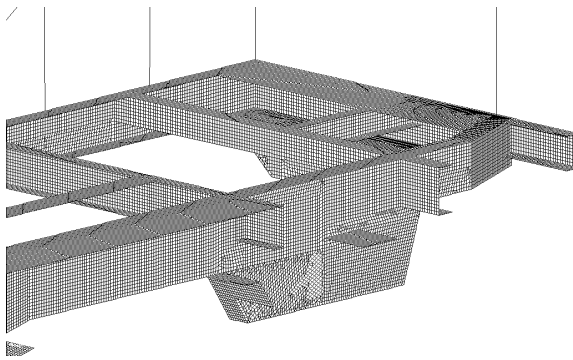


Fig. 4 : Detalle del Modelo Computacional en los extremos del Coche

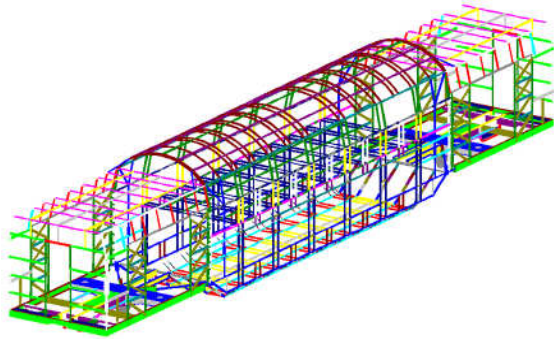


Fig. 5: Modelo Computacional – Bastidor y caja

Aprovechando los dos planos medios de simetría en la geometría y en algunos casos de carga (pesos y compresión), se analizó un modelo computacional de solo un cuarto del vagón. Esto fue acompañado con apropiadas condiciones de borde que aseguren la representación del coche entero. Este modelo esta compuesto por 70510 elementos y 68416 nodos, los cuales permitieron modelar en muy buen grado toda la geometría del vehículo.

Para evaluar las acciones de aceleración lateral, se aprovechó la simetría respecto de un plano medio transversal y se . Este modelo representa el 50% trasero / delantero del vagón.

A fin de analizar el caso de apoyo en tres puntos (torsión) y el de izaje, fue necesario modelar el 100% del coche.

#### Condiciones de carga

A continuación se detallan los casos de carga (Cc) evaluados, primarios y combinados, en los diferentes modelos analizados.

#### Análisis sobre cuarto del coche

- ✓ CC 1: el peso propio
- ✓ CC 2: el peso de elementos montados (12000 kg)
- ✓ CC 3: equipos de aire acondicionado (1500 kg en cada furgón)
- ✓ CC 4: pasajeros sentados y parados (320 pas x 70 kg / pas = 22400 kg)

- ✓ CC 5: carga compresión / tracción en enganche
- ✓ Combinaciones de carga:
- ✓ CC 51: es la combinación lineal y simultanea de los estados de carga 1 al 3 con compresión de 80 Ton.
- ✓ CC 52: es la combinación lineal y simultanea de los estados de carga 1 al 4 con compresión de 80 Ton.
- ✓ CC 53: es la combinación lineal y simultanea de los estados de carga 1 al 4 con un factor g de 1.3
- ✓ CC 54: es la combinación lineal y simultanea de los estados de carga 1 al 4 con tracción de 60 Ton.
- ✓ CC 55: es la combinación lineal y simultanea de los estados de carga 1 al 4 con un factor g de 1.55

#### Análisis sobre medio coche (efectos laterales)

- ✓ CC 1: el peso propio
- ✓ CC 2: el peso de elementos montados (12000 kg)
- ✓ CC 3: equipos de aire acondicionado (1500 kg en cada furgón)
- ✓ CC 4: pasajeros sentados y parados (320 pas x 70 kg / pas = 22400 kg)
- ✓ CC 6: el peso propio (acelerado lateralmente)
- ✓ CC 7: el peso de elementos montados (12000 kg) (acelerado lateralmente)
- ✓ CC 8: equipos de aire acondicionado (1500 kg en cada furgón) (acelerado lateralmente)
- ✓ CC 9: pasajeros sentados y parados (acelerado lateralmente)

#### Combinaciones de carga:

- ✓ CC 51: es la combinación lineal y simultanea de los estados de carga 1 al 4 y los 6 a 9 (laterales) con factor g de 0.3

#### Análisis sobre coche completo (izaje y apoyo en 3 puntos)

- ✓ CC 1: el peso propio
- ✓ CC 2: el peso de elementos montados (12000 kg)
- ✓ CC 3: equipos de aire acondicionado (1500 kg en cada furgón)
- ✓ CC 5: peso del bogie colgando en la cabecera izada (13600 kg)

#### Combinaciones de carga:

##### Izaje

- ✓ CC 52: es la combinación lineal y simultanea de los estados de carga 1 al 3 y 5. Todo con factor g de 1.1
- ✓ CC 51: es la combinación lineal y simultanea de los estados de carga 1 al 3.

Una vez que se verificó la integridad estructural del coche de dos pisos debido a los estados de carga propuestos se paso a la segunda etapa del análisis, esta etapa se enfocó en conocer el comportamiento dinámico del coche, para lo cual se buscó conocer las frecuencias naturales y formas de vibración del vagón.

Esto permitió determinar no solo efectos dinámicos que pudieran comprometer la integridad estructural del vehículo sino también detectar movimientos que resulten molestos a los pasajeros (confort).

**Resultados**

**Estáticos:**

Como primer variable de cálculo se presentan los desplazamientos totales debido a algunos de los estados de carga evaluados (ver Fig.6 ).

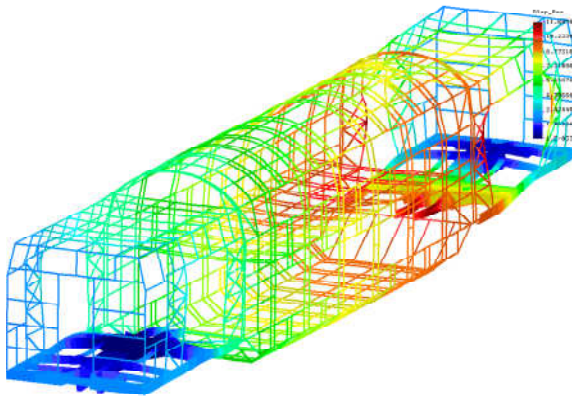


Fig. 6 Deformada y Desplazamientos - vacío + bogie. Ambos con factor g 1.1

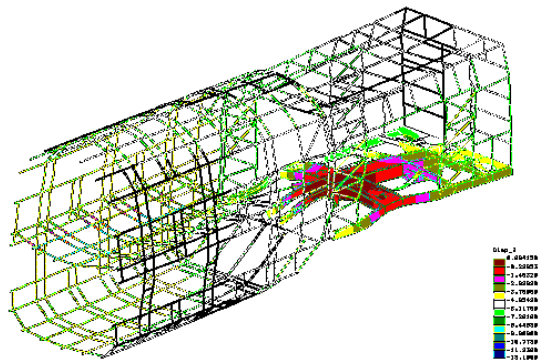


Fig. 7 - Deformada y desplazamientos - pasajeros con factor g 0.3 lateral

En siguiente etapa de análisis, se evalúa el estado de tensional del componente (ver Fig. 8 y 9), verificando de este modo la integridad estructural del vehículo frente a estados de carga operativos y eventuales.

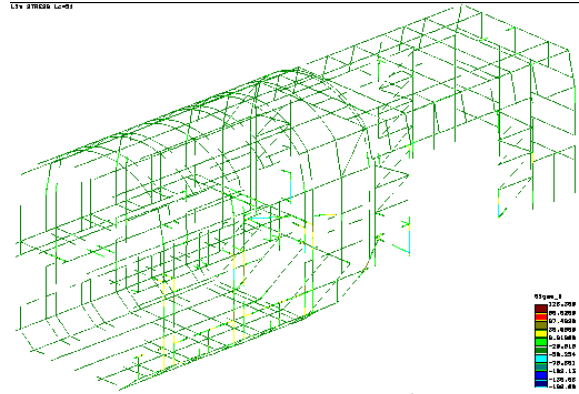


Fig. 8 - Tensiones en vigas (N/mm<sup>2</sup>) - pasajeros con factor g 0.3 lateral

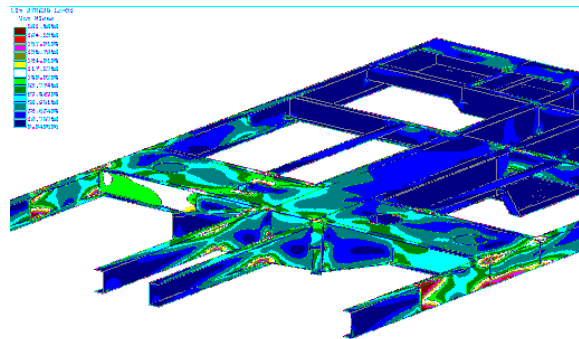


Fig. 9 - Tensiones en cáscaras (N/mm<sup>2</sup>) - pasajeros con factor g 0.3 lateral

**Dinámicos:**

Se presentan a continuación (ver Tabla I) las primeras frecuencias obtenidas del análisis y en las Fig. 10 y 11 se muestran algunos de los modos de oscilación mas destacados.

Tabla I - Frecuencias naturales del vehículo

Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (segundos)
1	9,798E-01	1,0207E+00
2	1,182E+00	8,4631E-01
3	1,382E+00	7,2362E-01
4	2,194E+00	4,5574E-01
5	6,244E+00	1,6016E-01
6	7,506E+00	1,3323E-01
7	7,511E+00	1,3314E-01
8	9,021E+00	1,1085E-01
9	9,273E+00	1,0783E-01
10	9,346E+00	1,0700E-01

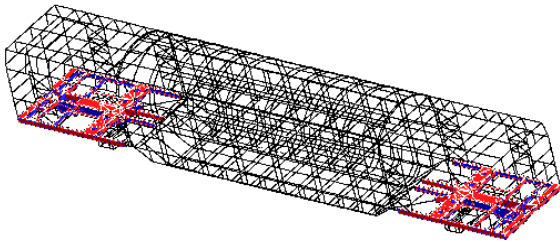


Fig. 10 - Modo 1 - 0.9798 Hz

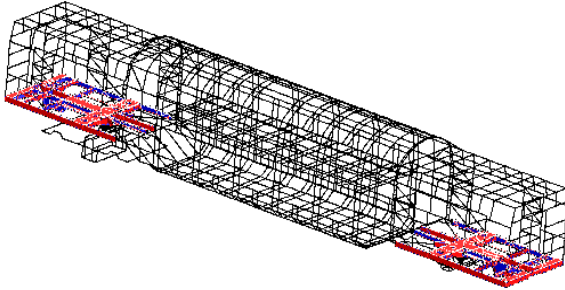


Fig. 11 - Modo 3 - 1.382 Hz

Se destaca que los primeros cuatro modos están dominados por el aporte de las características elásticas de la suspensión. El primer modo presenta una oscilación uniforme alrededor del eje longitudinal. El segundo modo presenta una oscilación vertical uniforme. El tercer modo desarrolla una oscilación uniforme alrededor del eje transversal horizontal. El cuarto modo oscila en forma uniforme alrededor de un eje transversal vertical. A partir del quinto modo se aprecia la participación de la estructura del vagón en los modos de oscilación.

### Conclusiones

Este análisis permitió poder conocer en forma rápida y eficiente el estado tensional desarrollado en la estructura del coche de dos pisos. Esto permitió realizar modificaciones en aquellos elementos estructurales cuya capacidad portante estaba excedida debido a estados de carga eventuales (compresión longitudinal severa).

Para mayor información contactarse con:  
[gustavo@inti.gov.ar](mailto:gustavo@inti.gov.ar)