

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO ESTRUCTURAL DE UN PROTOTIPO DE SEMIRREMOLQUE SOMETIDO A CARGA ESTÁTICA VERTICAL

Juan E. Monti^{a,b}, Sebastián Rossi^a, Jorge J. Eliach^a y Gastón Bourges^{a,b}

^a*Área de Diseño y Desarrollo, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Esmeralda y Ocampo,
2000 Rosario, Argentina, jmonti@inti.gob.ar*

^b*Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario, 2000 Rosario, Argentina, jemonti@fceia.unr.edu.ar*

Palabras Clave: Semirremolque, Estructura, Strain Gauge, Elementos Finitos, Mecánica Computacional.

Resumen. El objetivo del presente trabajo consiste en analizar el comportamiento mecánico estructural de un prototipo de semirremolque tipo 2+1 (dos ejes traseros fijos y un tercer eje central retráctil) sometido a carga estática vertical. Se comparan los valores de tensión obtenidos, en puntos preestablecidos de la estructura, de un modelo computacional y mediciones a campo realizadas con galgas extensiométricas (técnica strain gauge). Se consideran dos configuraciones de apoyo para el semirremolque: la primera configuración consiste en la estructura apoyada entre el camión tractor y las ruedas de ejes traseros; en la segunda configuración, a los apoyos antes descritos, se adiciona el apoyo de las ruedas del tercer eje central de la estructura. En cuanto al modelo computacional, se implementa el Método de los Elementos Finitos, utilizando el software ANSYS Mechanical (R). Los ensayos a campo se realizan en instalaciones de la empresa constructora del prototipo.

1 INTRODUCCIÓN

En la Argentina, los semirremolques son utilizados para gran parte del transporte terrestre de cargas, especialmente las relacionadas al sector agroindustrial. Existen diversos diseños de acuerdo a las diferentes aplicaciones o capacidades de carga y se encuentran regulados por la ley 24449 de tránsito y seguridad vial y las Licencias de Configuración de Modelo (LCM). Entre los trabajos específicos relacionados con el análisis del comportamiento mecánico estructural de semirremolques, podemos mencionar el trabajo de [Lopes dos Santos et al \(2014\)](#), en el cual se realiza el análisis estructural y propuesta de mejoras de diseño de un chasis de semirremolque de 3 ejes, a fin de lograr disminución de peso. En el mismo se llevan a cabo cálculos analíticos y por Método de los Elementos Finitos (en adelante MEF), con el fin de obtener tensiones y deformaciones en la estructura. En otros trabajos, como [Koszalka et al \(2011\)](#), [Dębski et al \(2012\)](#), [Gosavi et al \(2014\)](#), [Singh et al \(2014\)](#) y [Anurag et al \(2016\)](#), se analizan por MEF chasis de camiones y remolques.

Con respecto a la medición experimental de tensiones y su comparación con valores obtenidos por MEF, podemos mencionar el trabajo de [Jadhao et al \(2015\)](#) en el cual se realiza la verificación de tensiones desarrolladas en una viga en voladizo experimental. Se llevan a cabo cálculos analíticos y por MEF de tensiones y deformaciones, contrastándose con los datos obtenidos por medición con galgas extensiométricas, también conocida como técnica Strain Gauge ([Hoffmann, 1989](#)). A su vez, el trabajo de [Erklig y Kütük \(2014\)](#) estudia la ubicación de pegado de galgas extensiométricas en problemas de concentración de tensiones, en el cual se plantean dos modelos simples a resolver (un caso lineal y otro no-lineal). En el mismo se llevan a cabo determinaciones empíricas y se contrastan con los resultados obtenidos por MEF.

Cabe destacar la importancia de la validación de los valores obtenidos por cálculo computacional, a través de la medición experimental con galgas extensiométricas. Esta retroalimentación permite obtener un modelo numérico cada vez más ajustado al comportamiento real.

En el presente trabajo se analiza el comportamiento mecánico de la estructura de un modelo de semirremolque del tipo 2+1 (dos ejes posteriores y un tercer eje central retráctil), con capacidad máxima de carga de 28.4 t, a través del cálculo numérico y su posterior validación experimental. El prototipo evaluado se construyó en el marco de un proyecto de reducción de pesos en semirremolques, llevado adelante por el Área de Diseño y Desarrollo del INTI Centro Regional Rosario y empresas del sector (ver [Figura 1](#)).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelo de semirremolque estudiado



Figura 1: Prototipo de semirremolque 2+1.

La estructura básica del semirremolque consta de 2 vigas principales longitudinales cruzadas por travesaños. Sobre los travesaños se encuentran los perfiles longitudinales ó largueros que soportan el piso del semirremolque (ver Figuras 2 y 3). Las medidas aproximadas de la estructura son: longitud 14455 mm y ancho 2500 mm.

El semirremolque posee 3 ejes con ruedas duales en cada punta. Los ejes 1 y 2 se vinculan a la estructura a través de ballestas elásticas, las cuales se montan y tienen sus puntos de apoyo en los brazos de soporte comercialmente denominados “manotas” (ver Figura 4). El Eje 3 se conecta a la estructura por medio de un sistema que posee 2 resortes neumáticos y es retráctil. Esta característica define dos posiciones de trabajo, “Eje 3 bajo”, cuando el mismo funciona apoyado, y “Eje 3 alto”, cuando se eleva, no actuando como apoyo.

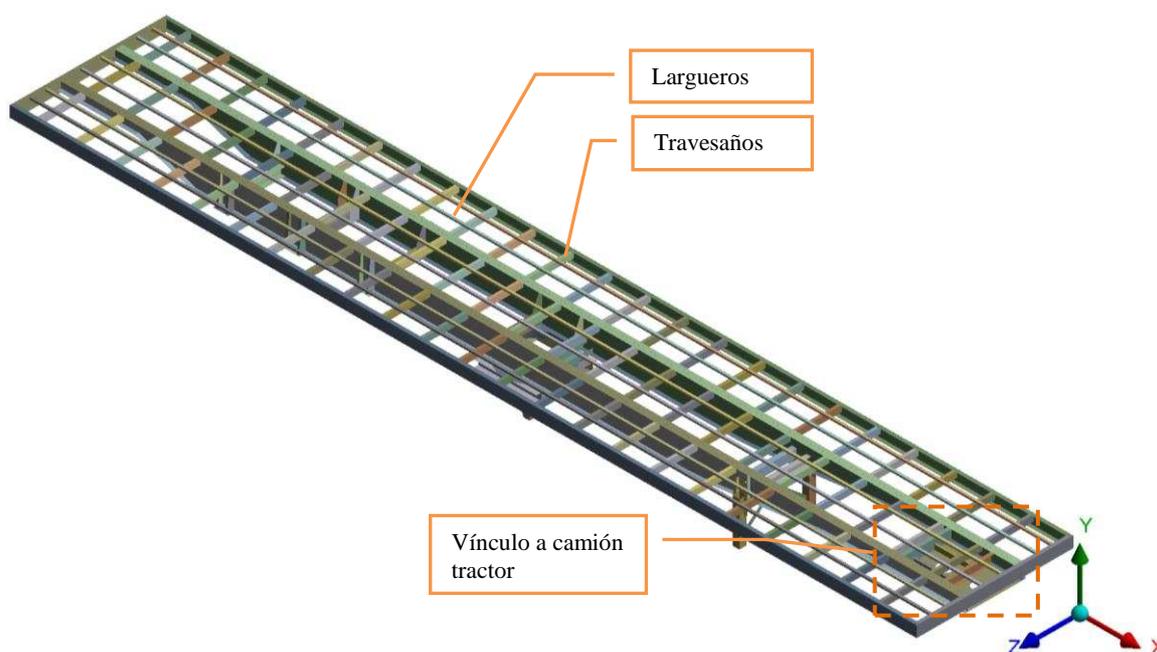


Figura 2: Prototipo de semirremolque 2+1 – Vista superior.

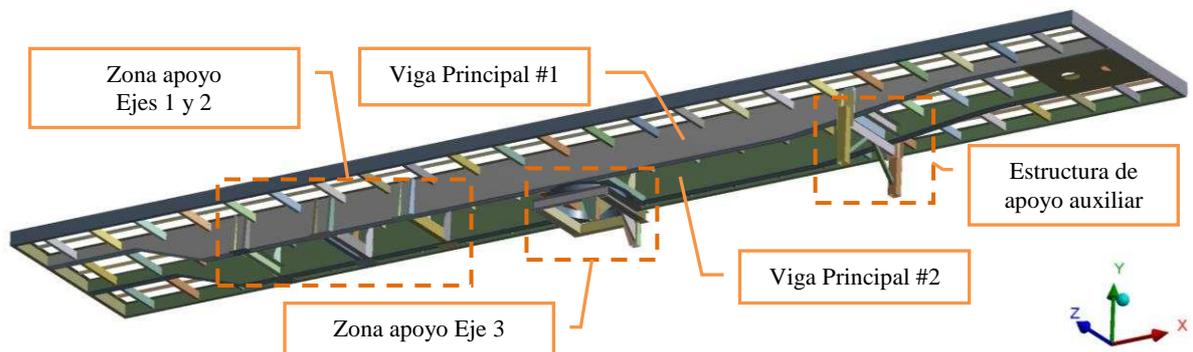


Figura 3: Prototipo de semirremolque 2+1 – Vista inferior.

El vínculo entre el semirremolque y el camión tractor se realiza por medio de un perno - que restringe los movimientos en el plano horizontal, excepto el giro- y de una placa de apoyo que transmite la carga al tren trasero del camión. A su vez, las ruedas duales traseras del camión también se encuentran montadas en resortes tipo ballesta.

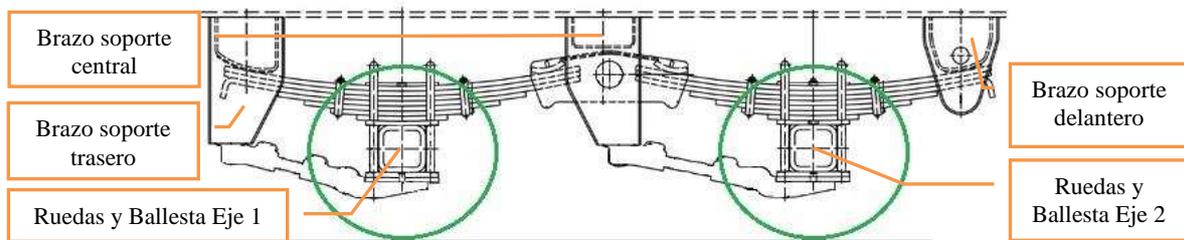


Figura 4: Ejes 1 y 2 – Ruedas, ballestas y manotas.

Cuando el semirremolque se encuentra estacionado, sin carga y desvinculado del camión tractor se utiliza una estructura de apoyo auxiliar para mantenerlo en posición de reposo.

La masa total cargada fue de aproximadamente 24 t (ver Figura 5).



Figura 5: Prototipo de semirremolque 2+1 – Foto de detalles.

2.2 Ensayo a campo

Previo al ensayo experimental a campo se realizaron simulaciones numéricas de los modelos descritos en el [punto 2.3](#) utilizando una carga uniformemente distribuida sobre la estructura y de una magnitud similar a la ensayada posteriormente a campo. Los resultados obtenidos indicaron la distribución de tensiones y sus direcciones principales y el comportamiento estructural general. Esta información se utilizó para definir las posiciones y direcciones de pegado de las galgas extensiométricas sobre el ala inferior a lo largo de una de las vigas principales del semirremolque (ver [Figura 6](#)). Todas las galgas se orientaron según dirección del eje X.

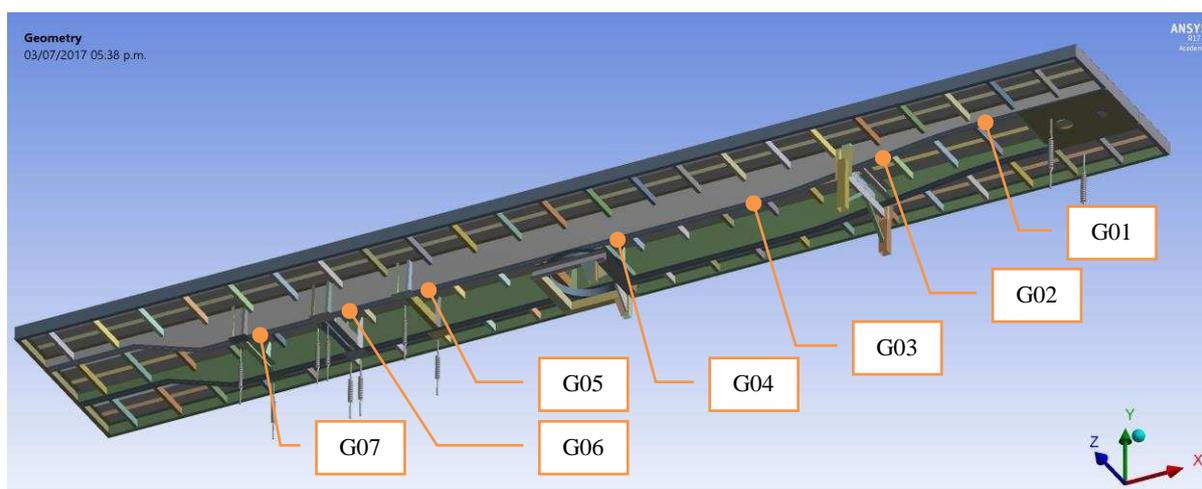


Figura 6: Posiciones de pegado de galgas.

En la experiencia a campo se posicionaron las galgas sobre la estructura y se llevó adelante el procedimiento de pegado y conexión para cada una de ellas ([Hoffmann, 1989](#)), ver [Figura 7](#).

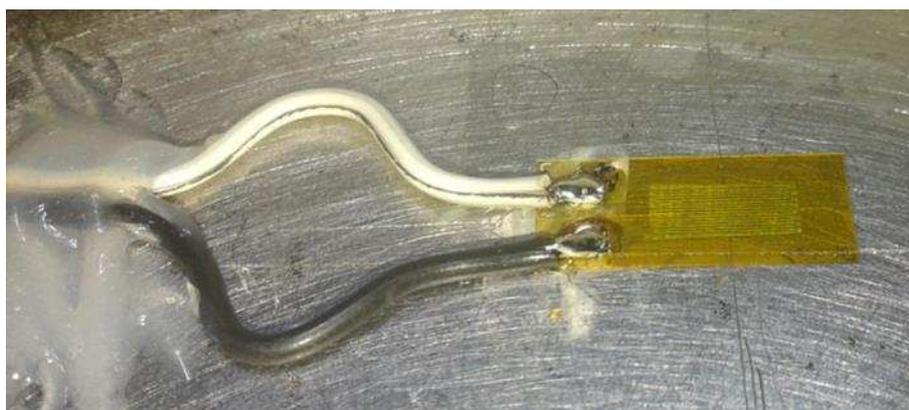


Figura 7: Galga pegada y conectada a cables.

Para la determinación del estado tensional se midieron deformaciones con galgas extensiométricas uniaxiales marca HBM, modelo 6/120 LY41. Estas galgas tienen compensación térmica para emplearse en acero. La resistencia es de 120 ohms. El largo de la grilla de medición es de 6 mm. El equipo que completa el puente de Wheatstone es el QuantumX MX1615B de la marca HBM, el cual alimenta, amplifica la señal, realiza la conversión analógico-digital y transmite los valores medidos a la computadora. El software

utilizado tanto para la adquisición como para el post-proceso de señales fue el [CatmanAP](#).

Dado que la fuente de alimentación del adquisidor admite en su entrada tensión de red (100 a 240 VCA, 50 – 60 Hz) se utilizó un inversor de corriente conectado a la batería del camión tractor (entrada 12 VCC, salida 220 VCA 50 Hz). El cable utilizado fue Marlew EC 0405.

2.2.1 Procedimiento de adquisición de datos

Una vez concluida la etapa de montaje de las galgas, conexionado y puesta a punto de los equipos de adquisición, se procedió a la toma de datos respetando la siguiente secuencia:

- El Semirremolque se encuentra detenido y sin carga, apoyado en las ruedas de los Ejes 1 y 2 y en el camión tractor. El Eje 3 se encuentra elevado (condición “Eje 3 alto”). En esta condición inicial se ponen en cero todos los canales de adquisición.
- Se procede a la carga progresiva del Semirremolque con 12 paquetes de 2000 kg cada uno, resultando una carga total de 24000 kg. La toma de datos se hace de forma continua durante todo el proceso de carga hasta obtener la lectura del estado final de carga máxima de ensayo.
- Con el Semirremolque cargado (condición final del punto anterior), se procede a bajar el Eje 3 (condición “Eje 3 bajo”) de manera que toda la estructura en esta nueva configuración queda apoyada en las ruedas de los tres ejes y el camión tractor. La toma de datos se hace de forma continua durante todo el proceso y luego de esperar un tiempo para la estabilización de lecturas se eleva el Eje 3 (condición “Eje 3 alto”).
- Finalmente se procede a la descarga del semirremolque y se toman los valores finales para controlar los desvíos respecto a los valores adquiridos inicialmente.

2.3 Simulaciones numéricas

Se realizaron dos simulaciones numéricas correspondientes a los siguientes casos que se proponen comparar con los resultados obtenidos en el ensayo a campo:

Caso a): Semirremolque sometido a carga máxima de ensayo con el Eje 3 alto.

Caso b): Semirremolque sometido a carga máxima de ensayo con el Eje 3 bajo.

En primera instancia se generó un modelo CAD de superficies 3D de la estructura completa del semirremolque a partir de la planimetría constructiva.

2.3.1 Modelado de apoyos

Cada conjunto de ruedas dobles y ballesta se esquematiza en la [Figura 8](#).

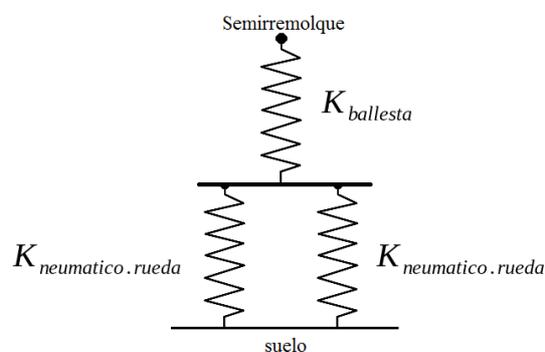


Figura 8: Esquema del modelo para conjunto ruedas duales y ballesta.

Esta configuración puede simplificarse a un único resorte equivalente cuya rigidez se

obtiene a través de la ecuación (1).

$$K_{equiv} = \frac{1}{\frac{1}{K_{ballesta}} + \frac{1}{2 \cdot K_{neumaticorueda}}} \tag{1}$$

Los valores de las constantes de las ballestas ($K_{ballesta}$) del semirremolque y del camión se obtuvieron a partir de las gráficas de comportamiento deflexión – carga de catálogos comerciales (FAESA, 2017).

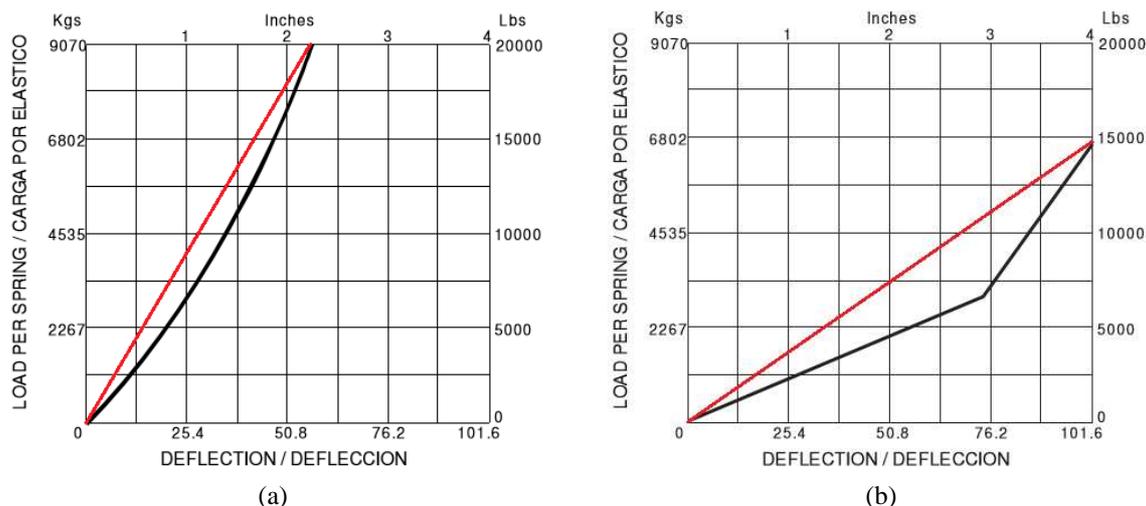


Figura 9: Gráficas de comportamiento de ballestas para: (a) semirremolque, (b) camión. Las unidades de carga están dadas en kg y libras y las unidades de las deflexiones en mm y pulgadas.

Para determinar el valor de la rigidez de las ballestas del semirremolque se adoptó la pendiente de la recta (en color rojo) que aproxima a la gráfica de color negro (ver Figura 9 a). De manera similar, el valor de la rigidez de las ballestas de las ruedas traseras del camión se obtuvo de la pendiente de la recta (en color rojo) indicada en la Figura 9 b. La constante de rigidez de los neumáticos para todas las ruedas ($K_{neumaticorueda}$) se calculó a partir del promedio de valores teóricos de referencia (Braun et al, 2002). En la Tabla 1 se resumen los valores de rigideces para los conjuntos: ruedas duales y ballesta del semirremolque y ruedas duales y ballesta del camión.

Conjunto	Rigidez ballesta semirremolque [N/mm]	Rigidez ballesta camión [N/mm]	Rigidez neumáticos ruedas [N/mm]	Rigidez resorte equivalente: K_{equiv} [N/mm]
Ruedas duales y ballesta (semirremolque)	1557	-	850	812
Ruedas duales y ballesta (camión)	-	632	850	460

Tabla 1: Valores de la rigidez equivalente de los conjuntos ruedas duales y ballesta del semirremolque y camión.

Modelado de los resortes neumáticos del Eje 3: se extrajo de tabla de catálogo comercial un

valor de fuerza de reacción de 39800 N correspondiente a un resorte neumático trabajando en condiciones de presión de 100 psi y altura de diseño teórico de 17" (Contitech, 2017). Para cada resorte neumático del modelo numérico se definió un valor de constante $K_{resorteneumatico} = 1000$ [N/mm], dado que al considerar dicho valor en la simulación, se obtienen fuerzas de reacción sobre la estructura del semirremolque similares al valor teórico de catálogo.

2.3.2 Condiciones de Contorno

Para modelar los diferentes vínculos de apoyo se utilizaron resortes con comportamiento lineal. A su vez, cada resorte equivalente de los conjuntos ruedas duales y ballesta del semirremolque (ver Tabla 1) se subdividió en dos resortes iguales, de manera de replicar los dos apoyos que posee cada ballesta en la estructura (ver Figuras 4, 10 y 11). En la Tabla 2 se resumen los valores de las constantes de rigidez de los resortes utilizados en las simulaciones de caso a) y caso b).

En cuanto a los desplazamientos, se restringe el movimiento en las direcciones de los ejes X y Z (restricción "A", ver Figura 10).

La carga soportada por el modelo es una fuerza de magnitud 240.000 N con dirección y sentido en el eje $-Y$ (condición de contorno "B"). La misma es aplicada en las franjas rojas indicadas en la Figura 10 de manera similar a la carga real aplicada sobre tacos de madera en el piso del semirremolque.

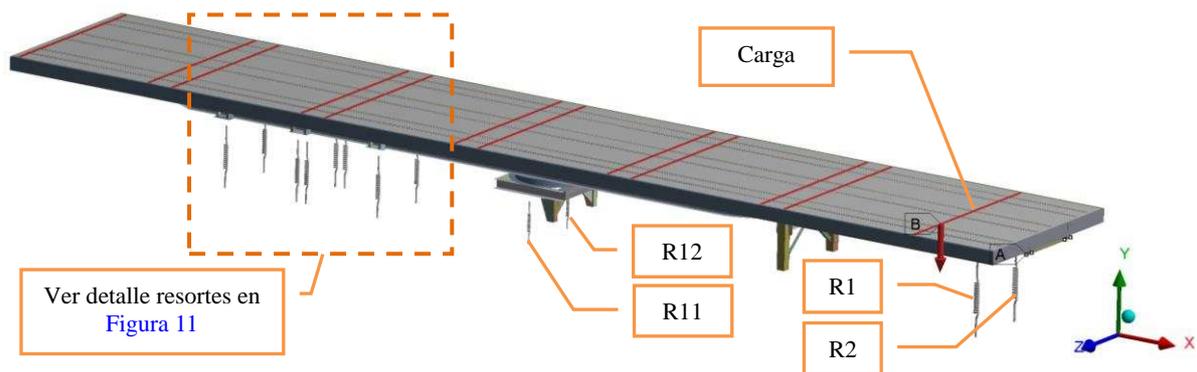


Figura 10: Condiciones de contorno.

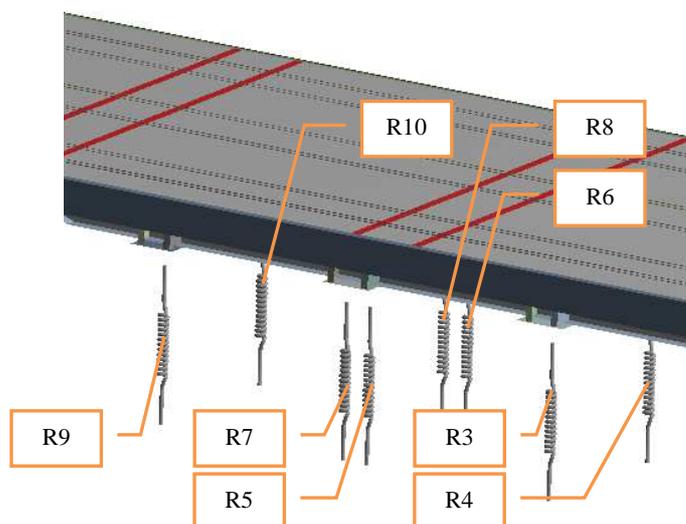


Figura 11: Condiciones de contorno – detalle resortes Ejes 1 y 2

Caso	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
a)	460	460	406	406	406	406	406	406	406	406	-	-
b)	460	460	406	406	406	406	406	406	406	406	1000	1000

Tabla 2: Resumen de constantes de resortes expresadas en [N/mm].

Se referencia a continuación a qué corresponde cada uno de los resortes utilizados:

- R1: ruedas dobles y ballesta posterior camión (lado derecho).
 R2: ruedas dobles y ballesta posterior camión (lado izquierdo).
 R3 y R5: ruedas dobles y ballesta Eje 2 semirremolque (lado derecho).
 R4 y R6: ruedas dobles y ballesta Eje 2 semirremolque (lado izquierdo).
 R7 y R9: ruedas dobles y ballesta Eje 1 semirremolque (lado derecho).
 R8 y R10: ruedas dobles y ballesta Eje 1 semirremolque (lado izquierdo).
 R11: resorte neumático Eje 3 semirremolque (lado derecho).
 R12: resorte neumático Eje 3 semirremolque (lado izquierdo).

El modelo físico-matemático utilizado es el de la Teoría de la Elasticidad Lineal y es resuelto por el Método de los Elementos Finitos (Oñate, 1995). El software utilizado es el ANSYS Mechanical 17.2 (ANSYS, 2016). En cuanto a la discretización del dominio, al tratarse de un modelo CAD construido a base de superficies 3D, se compone de elementos de cáscara tipo Shell181 para análisis mecánico estándar (ANSYS, 2016). La malla consta de 61456 elementos que corresponde a 70305 nodos. Se consideró material acero para toda la estructura con las propiedades mecánicas detalladas en [Tabla 3](#).

Constante	Valor	[Unidad]
Módulo de Young	2.058 E+05	[MPa]
Coefficiente de Poisson	0.3	-
Límite fluencia a la tracción/compresión	480	[MPa]

Tabla 3: Propiedades del material.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de ensayos a campo

Los valores de deformaciones específicas adquiridos a campo se convierten a valores de tensión a través de la ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Donde

σ : tensión [MPa]; ε : deformación específica [m/m] y E: módulo de elasticidad del acero, 205800 [MPa].

La [Tabla 4](#) presenta los valores de tensión para las galgas G01 a G07 al inicio y al final de la carga y de la descarga del semirremolque (ver [punto 2.2.1](#) apartados b y d).

Pos. galga	Carga		Descarga	
	inicial	final	inicial	final
G01	-1.2	59.1	60.6	0.2
G02	-0.2	79.2	80.3	-1.1
G03	-0.9	66.3	64.7	-2.5
G04	-0.7	49.3	50.8	-2.3
G05	-1.1	-13.1	-8.6	-2.3
G06	-0.8	-37.0	-39.3	-2.7
G07	-1.6	-42.4	-39.0	-7.1

Tabla 4: Valores de tensión para carga y descarga expresados en [MPa].

Se observan diferencias entre los valores de carga final y descarga inicial y a su vez, los valores de la carga inicial y descarga final son distintos de cero. Estas diferencias podrían deberse al ruido eléctrico, tanto el inducido en los cables de medición -ya que el blindaje de los cables no ofrece un apantallamiento perfecto- como al propio ruido introducido por el equipo de medición (para una deformación nula este ruido representó un valor de 0.05 MPa valor medio cuadrático y 0.25 MPa pico a pico). Otra explicación posible de los valores registrados es la influencia de la variación de la temperatura durante el ensayo, pudiendo darse desvíos de hasta 2 MPa según hojas de datos HBM de las galgas.

La [Tabla 5](#) presenta los valores de tensión obtenidos en el ensayo del [punto 2.2.1 c](#).

Pos. galga	Eje 3 alto (estado inicial)	Eje 3 bajo	Eje 3 alto (estado final)
G01	61.6	38.2	61.0
G02	79.1	39.6	78.8
G03	66.1	18.8	66.2
G04	48.4	-16.4	48.2
G05	-13.6	-46.3	-13.9
G06	-37.0	-53.3	-36.6
G07	-42.8	-50.4	-42.4

Tabla 5: Valores de tensión correspondiente al descenso y elevación del Eje 3 expresados en [MPa].

En la [Figura 12](#) se grafican las evoluciones temporales de las tensiones de las siete galgas cuando se baja el Eje 3. Se observa la estabilización de los valores en esa configuración (Eje 3 bajo) y por último la transición nuevamente al estado inicial (Eje 3 alto). Las diferencias entre las tensiones del estado inicial y final de este ensayo son muy pequeñas y no son significativas (ver [Tabla 5](#)). Como se mencionó con anterioridad, las mismas pueden deberse al ruido eléctrico.

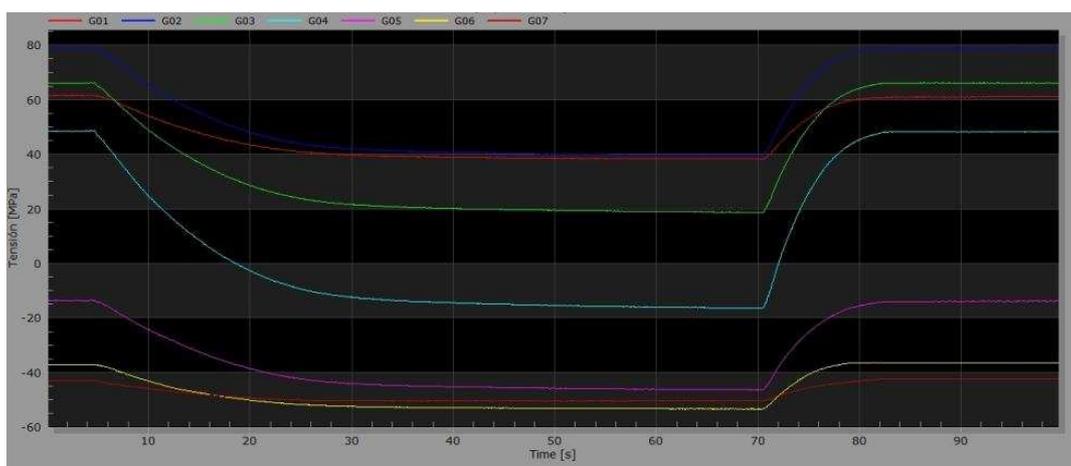


Figura 12: Mediciones en viga principal cuando se baja y se eleva el Eje 3. Abscisas: tiempo [s]; ordenadas: tensión [MPa].

3.2 Resultados de simulaciones numéricas y comparación con resultados de ensayos a campo

Caso a): La Figura 13 corresponde al campo de tensiones normales en dirección del eje X, coincidente con la dirección de pegado de galgas. Se indican a su vez las posiciones de las galgas a lo largo de la viga principal. La Tabla 6 presenta los valores de tensión adquiridos a campo y los obtenidos por simulación numérica, correspondientes al caso semirremolque sometido a carga máxima de ensayo con el Eje 3 alto. Se realiza la comparación y se calculan el error absoluto y relativo.

Se obtiene un error absoluto promedio de 3.8 MPa. El máximo error absoluto se observa en la galga G02 (10.7 MPa), pudiendo atribuírsele a diferencias entre la posición geométrica real y la del modelo virtual, consecuencia de errores en el relevamiento dimensional. Con respecto a los errores relativos, el máximo de 26.9% se da en la posición G05 que corresponde a un error absoluto de 3.5 MPa.

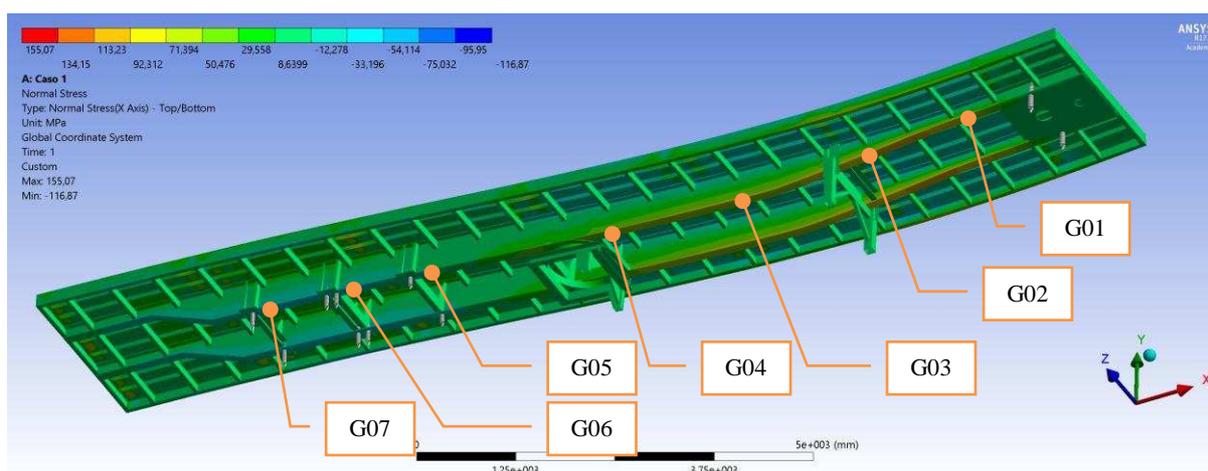


Figura 13: Caso a). Vista inferior – Tensiones normales en eje X (deformación ampliada).

Posición galga:	G01	G02	G03	G04	G05	G06	G07
Medición a campo [MPa]:	59.1	79.2	66.3	49.3	-13.1	-37.0	-42.4
Cálculo MEF [MPa]:	62.0	90.0	66.5	48.7	-16.6	-42.0	-38.5
Error Absoluto [MPa]:	2.9	10.7	0.3	0.6	3.5	4.9	3.9
Error Relativo [%]:	4.9	13.5	0.4	1.2	26.9	13.4	9.3

Tabla 6: Valores de tensión para el caso a).

En la [Figura 14](#) se grafican los valores de tensión de la medición a campo y los calculados numéricamente. Se observa que la simulación numérica posee un comportamiento similar al ensayo experimental.

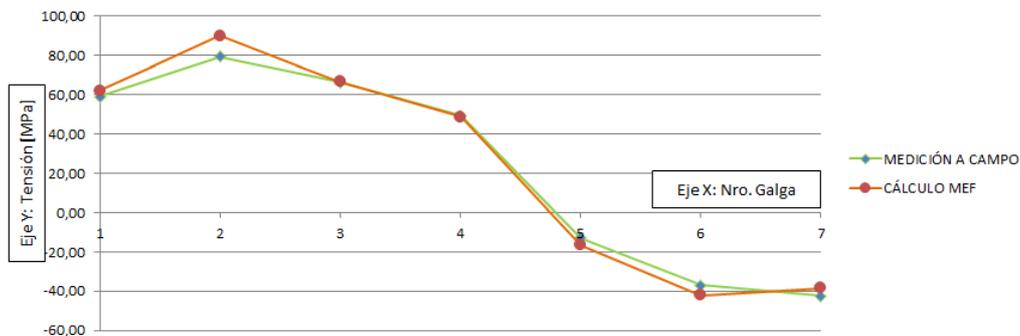


Figura 14: Caso a). Gráficas comparativas Medición a campo vs MEF.

Caso b): La [Figura 15](#) corresponde al campo de tensiones normales en dirección del eje X, coincidente con la dirección de pegado de galgas. Se indican a su vez las posiciones de las galgas a lo largo de la viga principal. La [Tabla 7](#) presenta los valores de tensión adquiridos a campo y los obtenidos por simulación numérica correspondientes al caso semirremolque sometido a carga máxima de ensayo con el Eje 3 bajo.

Se analizan comparativamente los valores adquiridos a campo con los obtenidos en la simulación numérica y se calculan los errores absoluto y relativo. Se obtiene un error absoluto promedio de 4.7 MPa. El máximo error absoluto se detecta en la galga G07 (12.2 MPa) y corresponde a su vez al máximo error relativo de 24.1%. Además, se observa que para esta galga existe una diferencia de 5.5 MPa entre el valor inicial antes de la carga y el valor final luego de la descarga (ver [Tabla 4](#), posición G07), no habiéndose determinado la causa de dicha diferencia.

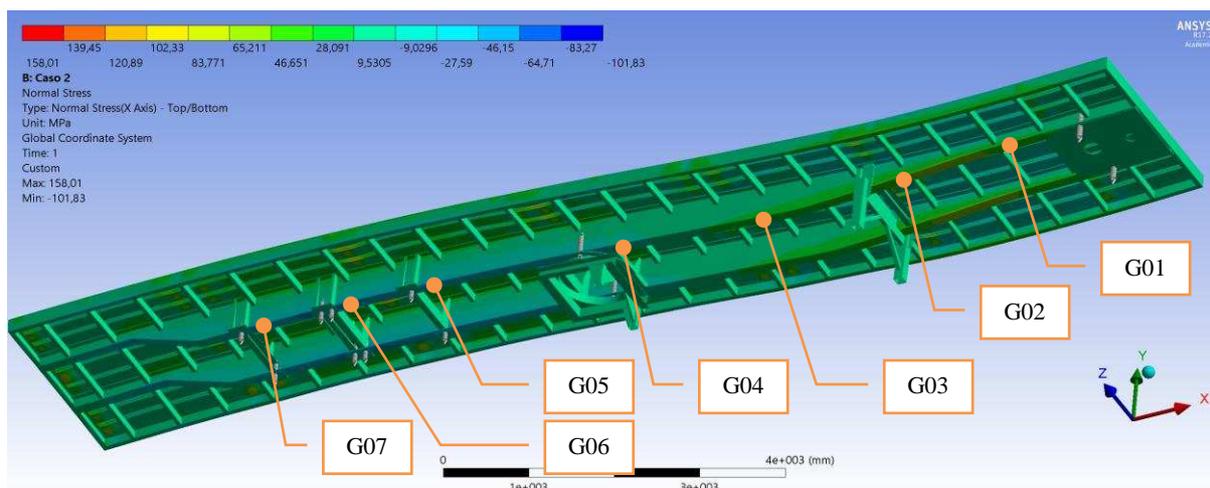


Figura 15: Caso b). Vista inferior – Tensiones normales en eje X (deformación ampliada).

Posición galga:	G01	G02	G03	G04	G05	G06	G07
Medición a campo [MPa]:	38.2	39.6	18.8	-16.4	-46.3	-53.3	-50.4
Cálculo MEF [MPa]:	35.6	46.5	18.6	-20.3	-44.8	-47.8	-38.2
Error Absoluto [MPa]:	2.6	6.8	0.1	3.9	1.5	5.5	12.2
Error Relativo [%]:	6.9	17.2	0.8	23.8	3.2	10.4	24.1

Tabla 7: Valores de tensión para el caso b).

En la Figura 16 se grafican los valores de tensión de la medición a campo y los calculados numéricamente. Se observa que la simulación numérica en general posee un comportamiento similar al del ensayo experimental. Sin embargo, en la galga G07 se hace visible el error absoluto entre ambos valores correspondientes a dicha posición.

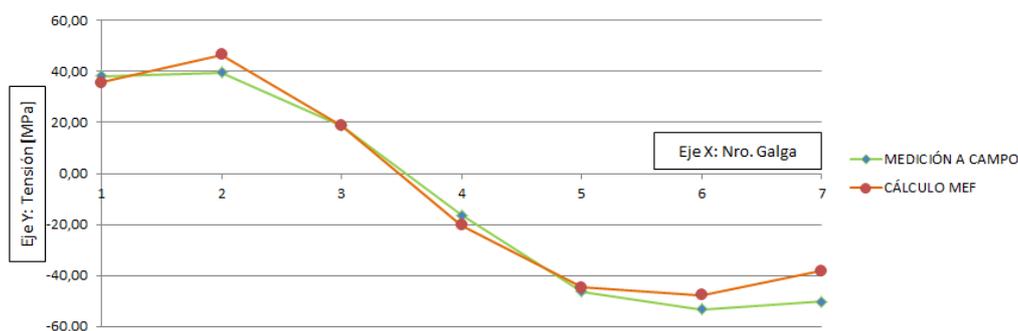


Figura 16: Caso b). Gráficas comparativas Medición a campo vs MEF.

Cabe destacar que las mediciones a campo traen aparejados errores propios de la técnica experimental. Entre otros, pueden mencionarse los propios de la técnica strain gauge (posicionado y pegado de galgas), los debidos al relevamiento dimensional de posición de galgas, al ruido eléctrico en los cables y a cambios de temperatura durante el ensayo. Respecto

a estos últimos, dado que durante los ensayos no se registraron temperaturas, no se realizó la correspondiente corrección posterior y por lo tanto se estima su error en 2 MPa, como se mencionó anteriormente. Por otra parte, durante los ensayos pueden darse reacomodamientos de carga o estructurales que podrían influir en los valores adquiridos. En lo referente al cálculo numérico, la modelización trae aparejada simplificaciones e idealizaciones respecto del modelo real, entre las que se pueden destacar el comportamiento lineal y valores de rigidez teóricos adoptados para todos los resortes (ballestas del semirremolque y del camión, resortes neumáticos del Eje 3 y neumáticos de las ruedas). La combinación de los errores descriptos, entre otros, pueden ser la causa de las diferencias detectadas entre los valores numéricos y experimentales.

4 CONCLUSIONES

Se realizó la comparación y el análisis de los datos adquiridos en dos ensayos experimentales a campo y los valores obtenidos por sus correspondientes modelos numéricos.

En general se observa una aceptable aproximación de los valores calculados en los modelos numéricos respecto a los adquiridos a campo. Los errores absolutos en promedio, para ambos casos estudiados, no superan los 5 MPa. Los mismos son atribuibles, entre otras razones, a limitaciones en el relevamiento dimensional a campo, falta de corrección por temperatura, simplificaciones del modelo numérico, entre otras.

En próximos trabajos se espera realizar ensayos experimentales y numéricos para otras condiciones de trabajo, tales como torsión estática del chasis, ensayos de arranque y frenado, entre otros. También se propone implementar modelos de sistemas de suspensión y de neumáticos de mayor complejidad, para obtener una mejor aproximación al comportamiento real. Por último, a fin de poseer un mayor control tanto sobre las mediciones experimentales como numéricas, resulta necesario cuantificar la influencia de las diferentes fuentes de error antes mencionadas.

Agradecimientos: El equipo de Diseño y Desarrollo de Inti Rosario agradece la predisposición y colaboración brindada por el personal de la empresa SOLA Y BRUSA S.A. en la realización de los ensayos.

REFERENCIAS

ANSYS 17.2 Mechanical. 2016.

Anurag, Singh, A.K., Tripathi, A., Tiwari, A.P., Upadhyay, N., Lal S.B. Design and analysis of chassis frame. *International Journal of Research and Engineering*, Vol. 03, No. 04:31-34, 2016.

Braun, S.G., Ewins, D.J., Rao, S.S. Encyclopedia of Vibration, Elsevier, Vol. 1-3, <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEVV00007/encyclopedia-vibration/encyclopedia-vibration>, 2002.

CatmanAP. versión 4.0.3.87.

Contitech. Catálogo de productos. <http://www.contitech.com.ar>, 2016.

Dębski, H., Koszałka, G., FerDynus, M., Application of FEM in the analysis of the structure of a trailer supporting frame with variable operation parameters. *Maintenance and Reliability*, Vol. 14, No 02:107-114, 2012.

Erklig, A., Kütük, M.A. Experimental Finite Element Approach for Stress Analysis. *Journal of Engineering*, Hindawi Publishing Corporation Vol. 2014, Article ID 643051. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/643051>, 2014.

- FAESA. Ficha técnica Ballestas para Remolques y Semi Remolques y Ficha técnica Ballesta para Camiones. <http://www.faesa.com.ar/productos/productos.php>, 2017.
- Gosavi, A., Shrivastava, A.K., Sinha, A.K. Structural Analysis of Six Axle Trailer Frame Design and Modification for Weight Reduction. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 4, Issue 1:523-531, 2014.
- Jadhao, V. B., Charde, R. B., Dhengle S.M. Investigation of stresses in cantilever beam by FEM and its experimental verification. *International Journal of Technical Research and Applications*, Vol. 3, Issue 1:141-144, 2015.
- Koszalka, G., Dębski, H., Dziurka, M., Kaczor, M., Design of a frame to a semi low-loader. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 18, No. 2:215-223, 2011.
- Lopes dos Santos, W., Chagoyén Méndez, C. A., Lapuente Fazio, A. Lucas de Farias, M.J. Análisis estructural y propuesta de mejoría del chasis del semi-remolque de 3 ejes de 15.5m – Prototipo 2014. *VIII Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica COMEC 2014*, Cuba, 2014.
- Oñate, E. *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos - Análisis estático lineal*. Segunda edición. Centro internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España. ISBN: 84-87867-00-6, 1995.
- Singh, A., Soni, V., Singh, A. Structural Analysis of Ladder Chassis for Higher Strength. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 4, Issue 2:253-259, 2014.
- Hoffmann, K. *An Introduction to Measurements using Strain Gages*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.