

# Optimización de uniones y estructuras de autobuses modeladas con elementos finitos mediante análisis modales

F. Badea Romero, E. Alcalá Fazio, J. Pérez Fernández, A. Martín López

INSIA– Universidad Politécnica de Madrid

[Francisco.badea@upm.es](mailto:Francisco.badea@upm.es)

---

*El objetivo principal del proyecto de investigación presentado es el de mejorar la predictibilidad de las tensiones de los modelos FEM de vehículos de grandes dimensiones para el transporte de pasajeros (autobuses y autocares).*

*Debido a las grandes dimensiones de estos vehículos y al tipo de estructura de los mismos (tubular de sección rectangular hueca), para su modelado mediante elementos finitos el tipo de elementos más adecuado desde el punto de vista técnico, económico y de coste computacional es el elemento de tipo viga. Una de las principales desventajas del uso de este tipo de elementos se debe al hecho de que los nodos representan uniones infinitamente rígidas. Esta característica determina un aumento de la rigidez global de las estructuras simuladas (de aproximadamente un 30%), lo que afecta de manera directa tanto, al comportamiento de la estructura, como a la correcta estimación de las tensiones.*

*En base a la investigación realizada, se propone un modelo de unión en el cual se introducen un total de seis elementos elásticos (muelles). Mediante estos elementos se reproduce el comportamiento local de la unión, teniéndose en cuenta las características topológicas.*

*Para caracterizar el comportamiento de la unión y estimar los valores de rigidez de los elementos elásticos, se realizaron análisis modales experimentales sobre estructuras reales y, a partir de las diferencias encontradas en los espectros modales entre la estructura real y los modelos MEF, se estimaron los valores de rigidez característicos de la unión. Los resultados obtenidos han permitido la verificación del comportamiento de los modelos, tanto el de los más detallados (elementos placa), como el de los modelos simplificados (elementos viga). En este último caso se analizaron la versión inicial de nodo rígido y la modificada mediante los elementos propuestos.*

*Mediante la implementación de la metodología descrita, se consiguieron obtener mejoras del comportamiento de las estructuras simuladas con elementos de tipo viga. La diferencia de rigidez entre dichos modelos simplificados, y los modelos detallados realizados con elementos placa y/o sólido, se reduce aproximadamente a un 5%.*

---

## 1. INTRODUCCION

En las últimas décadas, y especialmente en los últimos años, el estudio y la optimización de estructuras mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), se ha convertido en una de las más utilizadas metodologías. Esta evolución ha estado determinada por la mejora del los programas de análisis de elementos finitos los cuales actualmente son mucho más fiables y que conjuntamente con la capacidad computacional de los ordenadores modernos permiten resolver modelos muy complejos en un tiempo razonable y con costes relativamente reducidos.

Dentro de la industria del transporte existe una constante necesidad de obtener mejores productos, con mayores prestaciones y precios reducidos. Una de las líneas de trabajo permanentes es el diseño de superestructuras “ligeras” que ha generalizado el uso de programas MEF en la muchos de los campos de esta industria.

La principal ventaja de la modelización mediante elementos finitos está dada por el hecho de que ofrece la posibilidad de crear, analizar y verificar prototipos virtuales de estructuras sin

la necesidad de que dicha estructura sea fabricada, lo que reduce de manera importante los costes de investigación, desarrollo y verificación de las estructuras [1-3].

En la mayor parte de los códigos MEF para el análisis estructural, existen tres categorías principales de tipos de elementos disponibles: Viga (Beam), Area (Shell) y Volumen. La selección entre estos tipos de elementos para la modelización de una determinada estructura es una decisión importante, generalmente basada en la experiencia del analista, en la que debe tener en cuenta las características de la estructura a ser modelada y los recursos de cálculo disponibles [4]. La importancia de esta decisión deriva de su repercusión directa sobre los costes del proceso de simulación y la calidad de los resultados.

Para la modelización de grandes estructuras tubulares, similares a la estructura superior de autobuses y autocares la utilización de elementos de tipo viga se encuentra ampliamente extendida y aceptada [5, 6]. Sin embargo, a pesar de su aceptación y uso, los elementos de tipo viga tienen algunas limitaciones determinadas por su formulación. Siendo el principal inconveniente su incapacidad para reproducir el comportamiento local de las uniones.

De hecho, para cualquier unión modelada con elementos de tipo de viga, el comportamiento de la unión es infinitamente rígido [7]. Comportamiento que viene determinado por el hecho de que los ángulos de los elementos que comparten un nodo común se mantienen constantes con independencia de los esfuerzos aplicados sobre ellos. Se introducen, por tanto, errores en la rigidez global de la estructura, lo que finalmente se traduce en una serie de errores en el análisis de la misma [8,9].

En este artículo está presentado un tipo de unión equivalente en la cual ser mediante un total de seis elementos elásticos (muelles) que simulan la deformación local producida en la uniones de las estructuras de vigas soldadas, con la finalidad de obtener un comportamiento global más realista.

Para la estimación de los valores de rigidez de los elementos elásticos se ha realizado una correlación del comportamiento modal entre la estructura modelada y análisis modales experimentales sobre subcomponentes. Los resultados de la aplicación de los elementos elásticos mejoran sustancialmente los resultados obtenidos mediante el modelo MEF.

## 2. CARACTERÍSTICAS DEL ELEMENTO DE TIPO VIGA UTILIZADO

Los elementos tipo viga representan una categoría muy importantes dentro de los programas de elementos finitos. Estos elementos tienen una formulación simplificada, en la que los modelos relativamente grandes se pueden resolver en un tiempo razonable con prestaciones computacionales relativamente reducidas.

Generalmente son recomendados para el análisis de estructuras tubulares de grandes dimensiones (estructura superior de autobuses y autocares) [10].

Para el estudio presentado, se utilizó el programa de elementos finitos ANSYS, entre la variedad de elementos tipo viga disponibles, se eligió el elemento de tipo viga denominado "BEAM188".

El elemento BEAM188 es un elemento tridimensional de formulación lineal o cuadrática basado en el modelo de viga de Timoshenko, que tiene en cuenta la contribución de las cortantes y el efecto de inercia rotacional. Es un elemento tridimensional de formulación lineal o cuadrática, definido mediante dos nodos principales (I y J) y las características de la sección del perfil utilizado. Conjuntamente se puede utilizar un tercer nodo K, mediante el cual se determina la orientación del sistema de coordenadas locales del elemento (Figura 1.a).

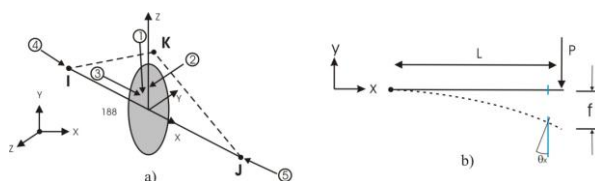


Figura 1. Formulación y características del elemento de tipo viga "BEAM 188" [11]

Cada elemento tiene por defecto un total de seis grados de libertad: tres translaciones y tres rotaciones.

### 2.1. Ventajas de los elementos de tipo viga utilizados

Tal y como se mencionó en los párrafos anteriores, la principal ventaja de los elementos de tipo viga está relacionada a su formulación simplificada, ya que permite analizar estructuras tubulares de grandes dimensiones y alta complejidad en un tiempo reducido, sin grandes requerimientos computacionales y obteniéndose resultados satisfactorios.

Por otro parte el proceso de modelado con este tipo de elementos es extremadamente simple, es necesario definir pares de nodos I y J mediante coordenadas tridimensionales y asociar el elemento viga a estos nodos.

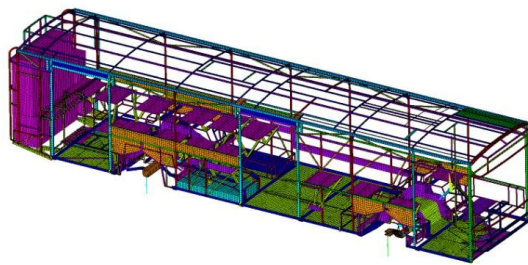


Figura 2. Autobús urbano modelado mediante elementos finitos

Esta última característica confiere una gran flexibilidad en el proceso de modelado y modificación de modelos existentes. Una situación comúnmente encontrada dentro de los procesos de análisis estructurales se refiere a la necesidad de modificar perfiles dentro de modelos ya existentes. La realización de este tipo de modificaciones en modelos con elementos de tipo viga se resume al cambio de las propiedades asignadas al elemento en causa.

Una situación similar para estructuras tubulares modeladas con elementos de tipo área o volumen, implicaría importantes modificaciones geométricas, especialmente en las uniones, que conllevan una cantidad notable de tiempo de modelado por cada modificación planteada.

### 2.2. Limitaciones de los elementos de tipo viga

La principal desventaja de los elementos de tipo de viga está determinada por su incapacidad de reproducir las características geométricas de las uniones y, por tanto, el comportamiento local de las estructuras en las mismas.

De hecho, para cualquier unión modelada, la unión se concentra en un nodo que tiene un comportamiento infinitamente rígido. Esto determina un comportamiento más rígido de de las estructuras simuladas, lo que conlleva a errores en la estimación de los desplazamientos nodales y en los resultados del análisis de tensiones de las estructuras.

En la Figura 3 están presentadas dos de las más comunes configuraciones de uniones simples (a, b) conjuntamente con el modelo equivalente de elementos finitos (c).

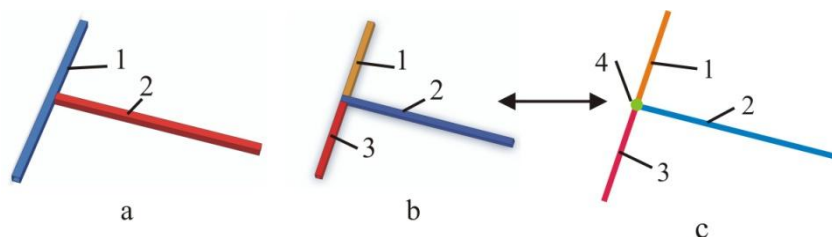


Figura 3. Modelo de unión equivalente realizado con elementos de tipo viga (c) para dos configuraciones de con geometrías de unión diferentes (a, b)

Se puede apreciar que el modelo equivalente realizado con elementos de tipo viga, es el mismo a pesar de que las geometrías de unión de los modelos reales son substancialmente diferentes. Como regla general, para cualquier unión simple que presente una configuración similar a las del las presentadas en la Figura 3 a y b, el modelo de equivalente será siempre igual al modelo presentado en la Figura 3c.

El modelo equivalente realizado con elementos de tipo viga, está formado por tres elementos viga (1-3) y un nodo común (4). Todas las características topológicas al nivel de unión, se concentran en el nodo común (4).

A medida que la complejidad de la unión se hace mayor, el nivel de error en la estimación del comportamiento de los modelos de elementos finitos es mayor.

Debido a las desventajas anteriormente mencionadas, se plantea la posibilidad de modificar los modelos mediante la introducción de elementos que reproduzcan la deformación local y la rigidez de la unión. El resultado de la implementación de dichos elementos proporcionará a los modelos construidos con elementos viga resultados con una mejor aproximación a los modelos detallados construidos con elementos placa o sólido.

### 3. MODELO DE UNION EQUIVALENTE (OPTIMIZADA)

Teniendo en cuenta lo mencionado a lo largo del las secciones anteriores, se plantea que un modelo de unión utilizando elementos de tipo viga que mejore los mejores resultados, es de gran interés para el análisis de estructuras como las de los autobuses y autocares.

En la Figura 4 esta presentado el modelo equivalente (optimizado) para uniones simples.

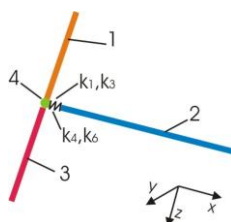


Figura 4. Modelo de unión equivalente (optimizada)

Este modelo se compone por tres elementos viga (1-3), dos de los elementos viga (1, 3) comparten el nodo común (4). Entre el elemento viga (2) y el nodo común (4), existen un total de seis elementos elásticos ( $k_1$ -  $k_6$ ).

Tres de los elementos elásticos ( $k_1$ -  $k_3$ ), representan muelles lineales que actúan en cada una de las direcciones principales (X, Y, Z). El comportamiento de estos elementos elásticos está determinado por la ley de Hooke, mediante la cual se calculan las constantes elásticas (ecuación 1).

$$k_i = \frac{F_i}{d_i} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}} \right], i = 1 \dots 3 \quad (1)$$

Donde:

$F_i$  – fuerza axial correspondiente a las direcciones X, Y, Z

$d_i$  – desplazamiento nodal en las direcciones principales X, Y, Z.

Por otra parte los elementos elásticos  $k_4$  a  $k_6$ , representan elementos elásticos angulares con la característica de rigidez determinada por la ecuación 2.

$$k_i = \frac{M_i}{\varphi_i} \left[ \frac{\text{Nm}}{\text{rad}} \right], i = 4 \dots 6 \quad (2)$$

Donde:

$M_i$  – Par correspondiente a las direcciones X, Y, Z

$\varphi_i$  – ángulo de rotación alrededor de los ejes principales X,Y,Z

Si la estimación de los valores de los seis elementos elásticos se realiza de manera correcta, se consigue obtener un modelo de unión equivalente con un comportamiento menos rígido, en la cual la mayor parte de las características e influencias determinadas por la geometría de la unión son descritas por los elementos elásticos.

Para la estimación de las constantes de rigidez de los elementos elásticos fueron concebidas tres metodologías:

- Estimación de las constantes de rigidez mediante una metodología basada en modelización con elementos finitos
- Estimación de las constantes de rigidez mediante una metodología basada en análisis experimental en probetas reales
- Estimación de las constantes de rigidez mediante correlación con análisis modales experimentales.

A continuación será presentada la metodología y los resultados obtenidos para la de estimación de las constantes mediante correlación con análisis modales experimentales.

#### 4. ESTIMACION DE LOS ELEMENTOS ELASTICOS MEDIANTE ANALISIS MODALES EXPERIMENTALES

En los siguientes párrafos la configuración de unión presentada en la Figura 3a será referenciada como “T1” respectivamente la configuración de la Figura 3b como “T2”.

Para los análisis realizados, se fabricaron probetas con las características dimensionales presentadas en la Figura 5 para cada una de las configuraciones analizadas (T1, T2), utilizando un perfil cuadrado hueco de 40X40X3 [mm].

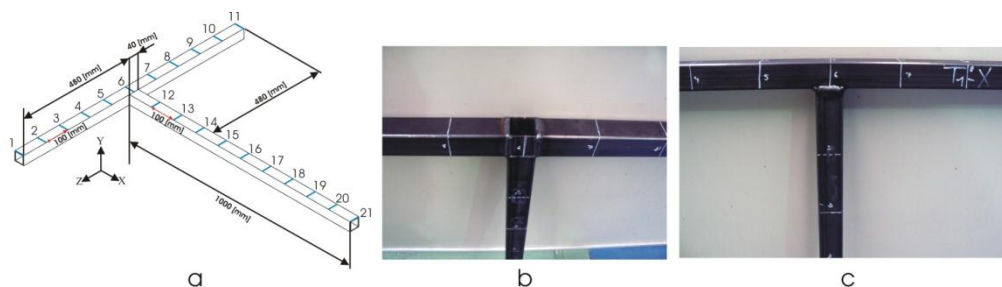


Figura 5. Características dimensionales y mallado de las probetas analizadas

Mediante la realización de análisis modales se pueden caracterizar las propiedades dinámicas y el comportamiento de las estructuras.

Existen una serie de características que definen el comportamiento dinámico de una estructura: las propiedades de los materiales, la distribución de masas, las características geométricas, etc [7]

De acuerdo con la teoría del análisis modal, dos estructuras que tienen geometrías similares, mismos materiales y distribución de masa similar tienen que tener espectros modales muy similares (función de respuesta de frecuencia). [12]

De acuerdo con estos aspectos teóricos, las funciones de respuesta de frecuencia para las uniones T1 y T2 deberían ser extremadamente similares.

En investigaciones anteriores se demostró mediante modelos de elementos finitos que entre las uniones T1 y T2 existen diferencias de significativas de rigidez, principalmente determinadas por la configuración de la unión [7].

Se procedió por tanto a realizar ensayos modales de probetas de uniones T1 y T2 y a determinar las funciones FRF de las mismas. Como se verá posteriormente en los resultados, se pudo comprobar la hipótesis de existencia de diferencias modales significativas entre las uniones, correspondientes a diferencias en las frecuencias modales en las cuales la unión tiene una interacción mayor en la forma modal.

A continuación se realizaron análisis armónicos respetando las condiciones de contorno para la unión equivalente realizada con elementos de tipo viga, se obtuvieron las funciones de respuesta en frecuencia y se compararon los espectros en cada una de las direcciones.

## 5. RESULTADOS

La comparación de las funciones de respuesta en frecuencia entre los análisis modales experimentales se realizó para cada una de las direcciones principales (X, Y, Z).

En la Figura 6a, está presentada las comparaciones entre los resultados obtenidos para las funciones de respuesta en frecuencia para las uniones T1 y T2 obtenidas mediante análisis modal experimental (dirección Y).

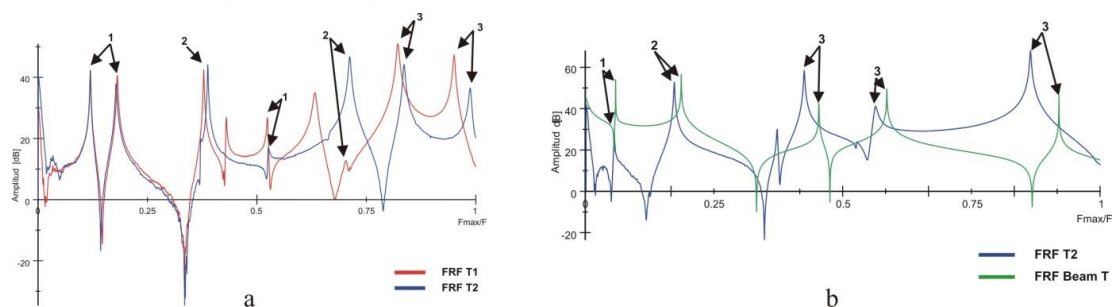


Figura 6. (a) FRF para las uniones T1 y T2 obtenidas mediante análisis modal experimental (b) FRF para la unión T2 y el modelo equivalente realizando con elementos tipo viga

Se pueden observar tres situaciones diferentes:

- Picos modales que no presentan diferencias significativas de frecuencia (1)
- Picos modales que presentan diferencias significativas de frecuencias (2)
- Picos modales que presentan importantes diferencias de frecuencia (3)

Se puede observar que la unión T2 tiene un comportamiento más rígido que la unión T1 (picos a mayores frecuencias). De la misma manera el modelo de unión equivalente realizado con elementos de tipo viga, presenta un comportamiento aun más rígido en comparación a la unión T2 respectivamente T1.

Correlacionando los resultados obtenidos con las formas modales que se obtuvieron tanto en experimentalmente como en modelos de elementos finitos, se determino que los picos para los cuales no existen diferencias significativas de frecuencia, corresponden a formas modales en la cuales la interacción de la unión es muy pequeña (Figura 7a). Consecuentemente las diferencias de frecuencia crecen conforme al grado de interacción que existe en la unión, las mayores diferencias corresponden a formas modales compuestas en las que intervienen flexiones y torsiones en las uniones. (Figura 7b, 7c).

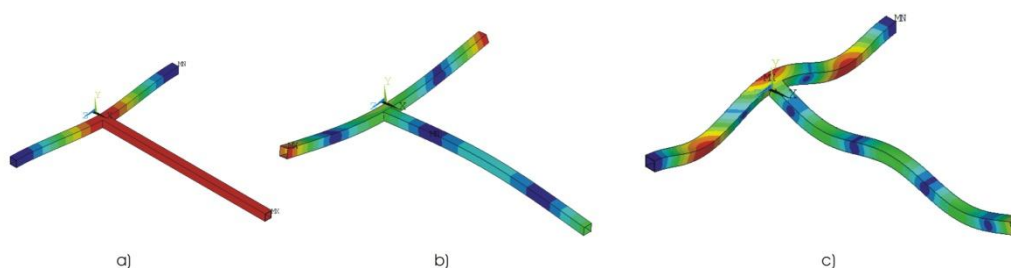


Figura 7. Formas modales correspondientes a la unión T1 (MEF)

En la Figura 6b esta presentada la comparación entre las FRF obtenidas para la unión T2 mediante análisis modal experimental y la simulación harmónica para el modelo de unión equivalente con elementos de tipo viga (dirección Z).

Para realizar la correlación entre el comportamiento modal del modelo equivalente con elementos viga y las uniones T1 y T2, se utilizó un modelo de cálculo en el cual se consideró el elemento viga del modelo equivalente como una masa suspendida concentrada.

En base este modelo, el cálculo de los elementos elásticos se realizó utilizando la ecuación 3.

$$k = (f2\pi)^2 m \tag{3}$$

Donde:

f – frecuencia de resonancia de las estructura

m –masa suspendida equivalente

Aplicando esta metodología se calcularon las rigideces de los elementos elásticos correspondientes para cada una de las uniones T1 y T2.

Como verificación de los valores obtenidos, se realizaron modelos de estructuras que incluían diferentes tipos de unión y para los que se utilizaron elementos de los tres tipos ya mencionados, viga, área y volumen. En la Figura 8 esta presentada una de las estructuras tabulares utilizadas en el proceso de verificación.

Posteriormente, mediante la correlación de resultados modales y armónicos, se realizó una estimación de las mejoras en el comportamiento dinámico que implica la utilización del modelo de unión optimizada.

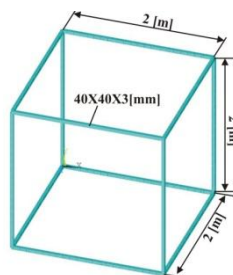


Figura 8. Modelo tubular utilizado para la verificación del comportamiento de los modelos de uniones equivalentes

En la tabla 1 esta presentada una comparación entre las primera cinco frecuencias modales obtenidas para la estructura analizada, modelada con elementos de tipo volumen, área, viga y con elementos viga con uniones optimizadas.

| Modo | Volumen | Área  | Viga  | Viga optimizado |
|------|---------|-------|-------|-----------------|
| 1    | 6.29    | 6.31  | 7.87  | 6.41            |
| 2    | 7.38    | 7.35  | 7.87  | 7.37            |
| 3    | 8.89    | 8.88  | 10.09 | 8.98            |
| 4    | 16.46   | 16.4  | 17.26 | 16.39           |
| 5    | 32.40   | 32.38 | 33.07 | 32.73           |

Tabla 1. Comparación de frecuencias modales para la estructura analizada

Se observa como los modelos realizados con elementos volumen y área presentan resultados similares y como los modelos Viga se desvían significativamente de los anteriores. Por último el modelo generado utilizando los elementos elásticos caracterizados mediante ensayos dinámicos son los que presentan mejor resultado.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha propuesto en el presente trabajo una metodología de generación de modelos MEF de estructuras tubulares realizados con elementos viga que modifica las condiciones de unión rígida entre elementos. Se consigue mediante la misma generar modelos capaces de diferenciar entre uniones geoméricamente diferentes, construidas con perfiles de la misma sección.

Los resultados obtenidos mediante este método presentan un buen grado de aproximación a los modelos realizados con elementos con mayor número de grados de libertad que permiten el modelado detallado de la unión. Se trata por tanto de una herramienta que permite reducir el tiempo dedicado a la generación del modelo, por comparación a los modelos con elementos placa y sólido, así como, en caso de necesidad, a la generación de modificaciones. Se amplía por tanto la capacidad de realizar bucles de optimización en un tiempo determinado reduciendo, en definitiva, los costes de los trabajos de dimensionamiento y optimización de estructuras.

Esta metodología general, de aplicación a cualquier tipo de estructura tubular, es de especial interés en estructuras cuyas propiedades de rigidez sean tan importantes como las de resistencia, por cuanto los resultados de rigidez global son los más afectados por la hipótesis de nudo rígido. Así mismo, el beneficio del método aumenta para las estructuras construidas mediante tubos metálicos en las que el número de los mismos sea elevado, permitiendo un mayor ahorro de tiempo respecto a los modelos realizados con mayor nivel de detalle.

## 7. REFERENCIAS

- [1] S. Dezso, P. Sandor. *Stress calculation and estimation of bus structure in case of transient displacement excitation*, FISITA 2010.
- [2] T. Pine, M. Lee, K. Jones: *Weight reduction in automobile structures an experimental study on torsional stiffness of box sections*. Proc. Instn Mech. Engrs, Part D J. Automotive Engineering, 1999.
- [3] M. Kim, M. Suh, W. Bae: *Development of an optimum design technique for the bus window pillar member*. Proc. IMechE Part D: J. Automobile Engineering, 2001
- [4] S. Nishio, M. Isgarashi: *Investigation of car body structural optimization method*. Veh. Des., 1990.
- [5] B. Gombor: *Dynamic analysis of a bus body frame: determination of the loads and stresses*. Vehicle System Dynamics Vol.43, No.11, November 2005
- [6] P. Eriksson. *Optimization of a bus body structure*, Heavy Vehicle Systems, Vol. 8, No. 1, 2001.
- [7] F. Badea, E. Alcalá, R. Grimaldi, F. Aparicio. *Optimización de uniones y estructuras de autobuses*, Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Ciudad Real, España, (2010).
- [8] A. García, T. Vicente. *Characterization and influence of semi-rigid joints in the buses and coaches structural behavior*, Budapest, 2002, ISBN 963 9058 17.
- [9] A. García, T. Vicente. *Caracterización e influencia de las uniones semi-rígidas en el comportamiento estructural de autobuses y autocares*, Cádiz, 2002, ISBN 84 607 6264 5
- [10] V. Adams, A. Askenazi: *Building better products with Finite Element Analysis*. OnWord Press Santa Fe, ISBN 1-56690-160X, 1998.
- [11] Ansys Inc. *Structural Analysis Guide*, 2010.
- [12] W. de Silva. *Vibration: Fundamentals and Practice*, Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.