

Optimización topológica de estructuras reticulares 3D con malla variable

R. Lagunilla Sánchez ⁽¹⁾, **D. Arribas Mantelli** ⁽¹⁾, **B. Vallés Fernández** ⁽¹⁾, **E. Alcalá Fazio** ⁽¹⁾

(1) Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA). Universidad Politécnica de Madrid.
r.lagunilla@upm.es

La optimización topológica es uno de los métodos potencialmente más prometedores de cara a mejorar las características de una estructura. Generalmente este método ha sido aplicado a geometrías continuas, laminares o volumétricas, en las cuales la optimización parte del mallado MEF de la pieza. A partir del mismo, los algoritmos encuentran la solución topológicamente óptima en función del peso, la resistencia, la rigidez u otros parámetros de diseño. Sin embargo, en el caso de querer optimizar estructuras reticulares, se hace necesario crear un reticulado inicial, a partir del cual iniciar el proceso de optimización. Esta malla de partida implica la optimización únicamente se realiza sobre los elementos presentes y que no sea factible evaluar la totalidad de los caminos de carga posibles. Es frecuente en este tipo de optimizaciones encontrar soluciones con estructuras en zig-zag indicativas de que la dirección de carga no estaba presente en la retícula inicial.

El método propuesto contempla un algoritmo que, en base a las soluciones halladas, interpreta las líneas de carga principales e introduce nuevos elementos no contemplados en la malla inicial. De esta forma no es necesario realizar mallas muy refinadas para cubrir, con mayor densidad, las direcciones del espacio, sino que se parte de un mallado más grueso, y con unidades de malla menos complejas, que evoluciona generando líneas de carga no existentes en la malla preliminar.

La metodología ha sido validada experimentalmente aplicándola al diseño de estructuras del tipo cercha triangulada, empotrada en los extremos y sometida flexión. Se ha comprobado mediante los ensayos, como el mejor comportamiento de rigidez específica lo proporciona la estructura determinada mediante la aplicación del proceso de optimización. Se demuestra, también, que soluciones tradicionales, y ampliamente aceptadas, presentan un menor aprovechamiento del material.

Se presenta, por tanto, un método avanzado de optimización topológica de estructuras reticulares que disminuye la influencia del tipo y tamaño de malla, así como de la experiencia del usuario y que proporciona una mejor definición de la solución con menor coste computacional.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente artículo, se pretenden mostrar los distintos progresos realizados en el campo de la optimización topológica, referentes al artículo presentado por E. Alcalá et al. [4], presentado en la edición pasada de este congreso. En este artículo quedaba detallado el problema inicial así como la forma de enfrentarlo.

La optimización topológica de estructuras reticuladas, es un campo que ha experimentado un menor avance por comparación a la de estructuras continuas. Esto es debido principalmente a la falta de continuidad definida por líneas de carga discretas, que implica que el mallado inicial sea un aspecto crítico a la hora de encontrar el diseño óptimo para cada problema planteado.

En el trabajo que se presenta en este artículo se ha abordado el problema de optimización de estructuras reticulares de nudos rígidos (6 g.d.l. por nodo), teniendo en cuenta de este modo no sólo los esfuerzos de tracción-compresión de las vigas, sino también los de flexión, torsión y cortadura.

En la búsqueda de este óptimo estructural, la evolución de esta investigación, tras conseguir un proceso que llega a soluciones bien definidas, se ha dirigido principalmente a aumentar la eficiencia del proceso de optimización. Más concretamente en reducir el tiempo

de cálculo, y a mejorar la validez y eficiencia de las soluciones obtenidas. Por ello, se han llevado avances en distintas direcciones de forma simultánea para lograr estos objetivos:

- Para mejorar y controlar el tiempo de cálculo se ha buscado un método de modificación de los elementos que siga unas pautas determinadas. De este modo, se mejora tanto el número de elementos modificado como el avance del proceso, eliminando aleatoriedad al proceso y aumentando el rendimiento del mismo.
- En cuanto al objetivo de mejorar la eficiencia de las soluciones se ha incluido una forma de evaluar caídas repentinas del criterio de optimización para paliarlas y evitarlas en la medida de lo posible. De este modo, se pueden retomar soluciones previas para reevaluarlas, modificarlas y consiguiendo así mejoras notables en los resultados obtenidos.

El trabajo se concluye mostrando la validación experimental de las soluciones obtenidas. Complementando la validación preliminar realizada mediante comparación por semejanza a un método de optimización topológica de estructuras continuas. Se ha realizado una verificación mediante ensayos que otorga mayores garantías sobre la validez de la investigación.

2. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA EN ESTRUCTURAS RETICULADAS

Los pocos trabajos que han considerado estructuras lineales se han centrado en estructuras reticuladas con secciones fijas y uniones articuladas, eliminando así esfuerzos flectores y torsores. Un ejemplo de este tipo de optimización son los trabajos presentados por S. Sakata et al. en [1] y S. Yunkang et al. [2].

También se pueden encontrar trabajos de este tipo en estructuras de absorción de energía lineales, como el trabajo de C.B.W Pedersen [3], en el que se modelan absorbedores de energía para impactos a partir de estructuras reticuladas.

La característica diferenciadora de este artículo, como ya se ha comentado con anterioridad, es la aplicación y mejora del método en estructuras de nodos rígidos con múltiples estados de carga. El esquema general del proceso puede observarse en la siguiente imagen (figura 1).

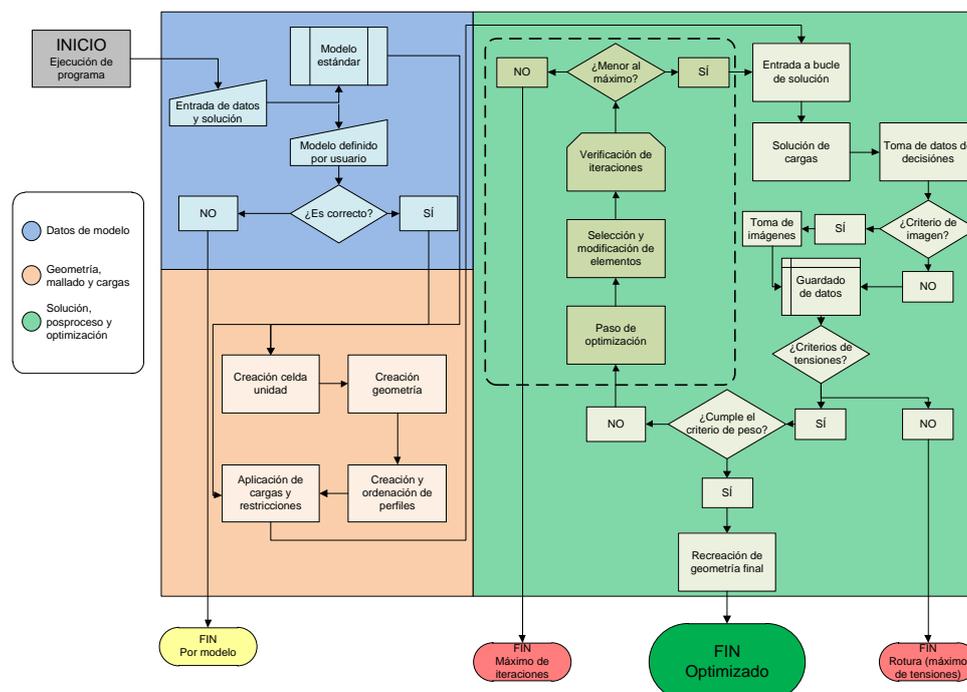


Figura 1. Diagrama de flujo general de la rutina de optimización

En esa imagen, se muestran los diferentes pasos de preproceso para preparar el modelo definición de malla inicial (modulo azul), la generación de modelo y la aplicación de cargas (modulo naranja) y, finalmente, el bucle de solución y optimización (verde), en el cual se aplican las ecuaciones de optimización que controlan la evolución del proceso iterativo. Se han implementado en la lógica de control los criterios de parada del proceso ligados a: umbrales de

- Umbrales de Variables de estado sobrepasadas (i.e. tensión máxima mayor que el criterio establecido).
- El proceso ha alcanzado un máximo de la función de control (Rigidez específica).
- El proceso define una solución (i.e. se alcanza el peso objetivo).

Es en el proceso de optimización donde se han desarrollado los esfuerzos de mejora, dado que es donde potencialmente se puede mejorar el tiempo de cálculo, al mismo tiempo que se gana fiabilidad y rendimiento, llegando a mejores soluciones.

3. CONTROL DEL PASO DE OPTIMIZACIÓN

La búsqueda de mejora en cuanto a la evaluación de elementos susceptibles de optimizar es crucial en este tipo de proceso, sobre todo teniendo en cuenta la gran relevancia de las líneas de carga discretas en las estructuras reticuladas. Por este motivo, lograr un proceso de control de la modificación de las propiedades de los elementos flexible y adaptado a cada estado de la evolución de la optimización reduce el tiempo de cálculo, y mejora la calidad del resultado.

Por este motivo, han sido varios los algoritmos de control probados. A continuación se comentan los considerados más relevantes. Inicialmente, se acotaron los elementos a variar por medio del valor mínimo de rigidez específica (rigidez de un elemento dividido entre su masa) multiplicado por un factor.

$$\frac{R_i}{m_i} \leq U_i \quad (1)$$

Siendo

$$U_i = K \cdot \min\left(\frac{R_i}{m_i}\right) \quad (2)$$

Donde:

- R_i : Rigidez del elemento i
- m_i : Masa del elemento i
- K : Constante de selección

Mediante esta base, todos los elementos que cuya rigidez específica sea inferior que el umbral U_i , serán modificados.

Sin embargo, el principal problema de la utilización de este método se ha producido en instantes con diferencias mínimas en la rigidez específica de un alto porcentaje los elementos. Esto llevó a procesos con variaciones de un elevado porcentaje de elementos en la misma iteración, combinados con otras con modificaciones de un número reducido de perfiles. Se trata, por tanto, de un proceso aleatorio e incontrolado, que precisa mucho tiempo de cálculo si se reduce en exceso el factor de selección (K), o a soluciones poco eficientes si este valor es demasiado elevado.

Por estas razones, se ha pensado en controlar en bucle cerrado este factor, utilizando como control el número de elementos susceptibles de cambio en cada iteración, y ajustando el factor de selección de forma interna.

$$U_i = K \cdot \min\left(\frac{R_i}{m_i}\right); K = K(p, e) \tag{3}$$

Donde:

- $K(p, e)$: Factor de selección de la función objetivo (FO) de optimización (% peso) y del número de elementos modificables por iteración (% Elementos)

De este modo, se puede variar durante toda la evolución de la FO (peso o rigidez específica global), el porcentaje o número de elementos que se van a modificar en cada iteración. Se consigue así una evolución controlada y estable. Además, y aunque pudiera parecer contradictorio, se mejora el tiempo global de cálculo, ya que se elimina mayor número de elementos al inicio (gran variación de la FO) y de un modo más preciso al final (evolución más lenta de la función).

4. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN LINEAL Y MEMORIA (LIMM)

Para la FO, se ha utilizado la rigidez (energía) específica por medio del cociente entre la rigidez y el volumen. Como parte de la lógica de control se ha optado por memorizar la evolución de las variables y la FO, así como el almacenamiento de los estados con máximos locales de la FO para, en caso de un descenso superior a un umbral definido, poder refinar el modelo y retomar la optimización en ese punto. Para ello, ejecuta el algoritmo de interpolación lineal de líneas de carga, que se ha denominado como optimización geométrica. Esta Optimización geométrica elimina las líneas en zig-zag, y los elementos con un extremo libre, reorganizando el mallado. Este proceso, está descrito en el artículo publicado con anterioridad por E. Alcalá et al. [4].

En la figura 2, se muestra la evolución de la rigidez específica del método desarrollado (RIGE LIMM) en función de las iteraciones, y se compara con el método previo (Método Directo) sin las capacidades LIMM (RIGE DM) Se muestra así mismo la evolución del porcentaje de volumen reducido (con identificadores correspondientes).

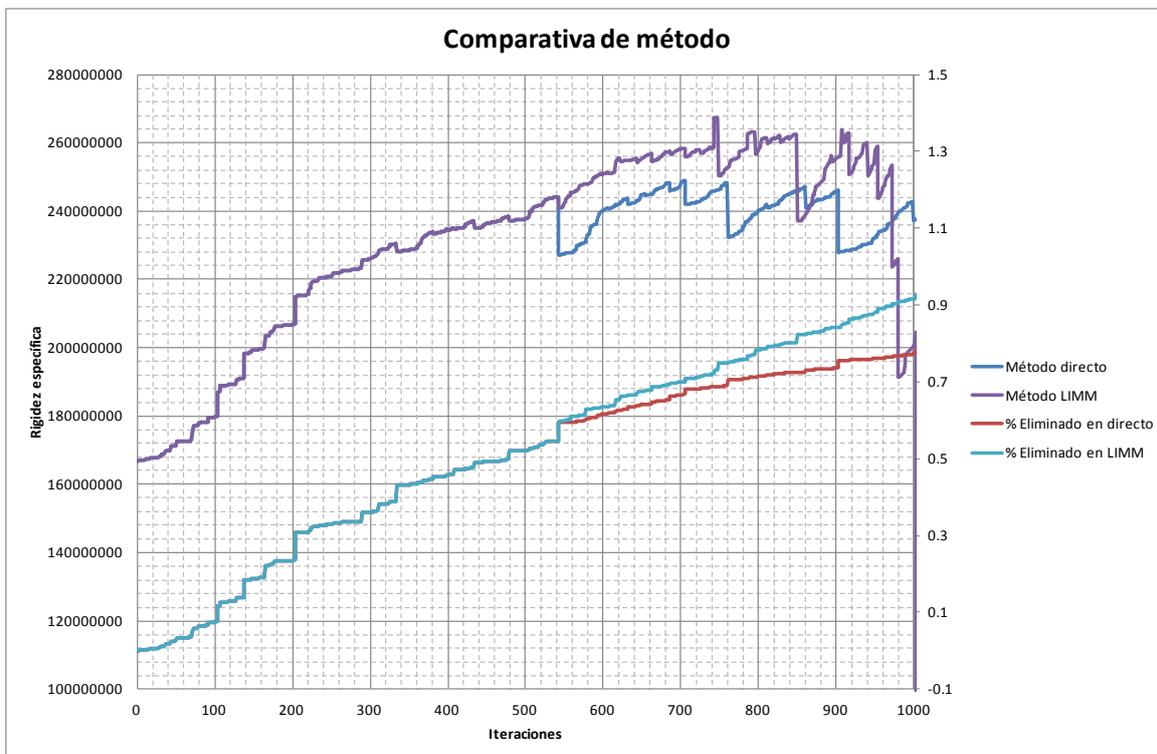


Figura 2. Evolución comparativa entre ambos criterios

Se comprueba que los resultados del L IMM son más eficientes, ya que presenta un mayor valor de la rigidez específica global de la estructura y una mayor reducción de volumen (peso) de la misma. Se observa en ambos casos, que las fases iniciales del proceso siguen un curso similar con ambos métodos, hasta que se presenta la primera caída significativa de rigidez, es decir, el punto en el que se elimina una línea de carga importante.

Un argumento a favor de la estabilidad del L IMM es que la progresión en la modificación o eliminación de elementos es más lineal.



Figura 3. Evolución con criterio de vuelta atrás

La gráfica de la Figura 3 muestra la evolución de la RIGE azul cian, representando la evolución que habría tenido en las iteraciones 200, 208, 212 y 220 si no se hubiera aplicado dicho método. Aunque no se aprecian totalmente en la gráfica por la escala en dichas iteraciones se producen modificaciones significativas de elementos. En el caso de la rigidez específica, se consigue una progresión en aumento hasta cierto punto, con 2 óptimos locales (azul oscuro y verde verticales) que se han podido resolver para seguir incrementando la rigidez específica hasta llegar al óptimo global (del cual no se consigue mejorar). En cambio, en el caso del volumen eliminado, sólo hay una línea de datos, por lo que se llega a la conclusión, de que la mejora de los óptimos locales no lleva a una estructura con mayor cantidad de material, sino que consigue una mayor rigidez específica con la eliminación de la misma masa.

En cualquier caso, también con el método L IMM se aprecian caídas en puntos característicos (óptimos locales), que si bien en ocasiones pueden mejorarse, en la mayoría de los casos son la conclusión definitiva de la optimización.

En vista de estos gráficos, se ha decidido continuar el proceso conforme a la variable de rigidez específica como línea principal de desarrollo, la cual llega a mejores resultados y un óptimo superior, aunque esto no quiere decir que se sigan haciendo comparaciones en siguientes procesos.

5. VALIDACIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL

Para validar el proceso, se han desarrollado dos estructuras de acero, idénticas en principio, pero que han sido optimizadas de forma diferente. Mientras que en una de ellas se ha optado por la solución convencional a partir de una estructura triangulada, en la segunda estructura se ha optado por aplicar la optimización topológica. En ambas estructuras se compararán las deformaciones al aplicar una carga, tanto en un ensayo real, como en el programa ANSYS, para así validar tanto el método de optimización como los ensayos.

La estructura se ha fabricado utilizando barras de acero de sección circular de 3.3 milímetros de diámetro, soldadas entre sí con soldadura tipo TIG. Para elegir el tipo de optimización de cada estructura, se han ensayado una vez fabricadas para determinar la más débil y aplicarla la optimización topológica, situándonos en el caso más desfavorable.

Las estructuras iniciales se corresponden con la solución del caso de carga mencionado en el ensayo anterior, en la situación de 95% de eliminación de material. En cuanto a la estructura optimizada, es una versión simplificada de la optimización, realizada al 85% del total, la cual se corresponde con aquella que tiene una mayor rigidez específica. Esta variable se ha medido como el cociente de la fuerza aplicada entre el desplazamiento en el punto de aplicación de la carga y el peso de la estructura. Finalmente, como estructura comparativa a la optimizada, se ha establecido una estructura origen a la que se ha añadido una cercha.

Una vez definidas las estructuras, se ha aplicado el mismo estado de carga estático tanto en el modelo teórico como a nivel de ensayo real. Para ello se ha realizado una bancada y se ha posicionado un reloj comparador para medir la flecha que se han generado en las distintas estructuras. Tanto el objeto de ensayo como el reloj comparador, se han unido a un mismo bastidor rígido, para evitar posibles falsas medidas si se hubiesen anclado por separado.

El ensayo se ha realizado midiendo incrementos de flecha con el reloj comparador y aplicando carga utilizando pesas de 10 kg. Para realizar la medición, se ha establecido que la lectura sin carga no es válida, debido a los defectos de asentamiento de la estructura a la bancada. Por este motivo, la medida inicial se ha tomado con una pesa de 10 kg, a la que posteriormente se han añadido secuencialmente otras dos pesas de las mismas características. Con ayuda del reloj comparador, se han anotado los incrementos de flecha, y tomado fotografías en cada momento de carga para tener constancia de ello. Además, se ha aplicado carga en ambos sentidos de la estructura, comprobando la simetría. Con esta metodología se han desarrollado todos los ensayos, realizando un solo ensayo en ANSYS para cada modelo debido a la linealidad.

En la tabla 1, se muestran para los modelos y las estructuras experimentales los pesos calculados y medidos así como los cálculos de rigidez específica referenciados a la estructura base analítica, comparando así los resultados de un modo sencillo.

Nombre	Modelo Imagen	Experimental	
		Peso	Rig.e
Base		1	1
		1	0.94
Base		1	1
		1	0.93
Cercha		1.63	1.73
		0.79	0.78
Opt		1.59	1.73
		1.03	0.96

Tabla 1. Datos unitarios de peso y rigidez específica de la validación

Con estos resultados se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Mediante el cálculo analítico, es más rígida la estructura optimizada que la triangulada.
- Las dos estructuras iniciales para el ensayo tienen rigideces muy similares, diferencias menores al 5%.
- Mediante ensayo, la estructura optimizada presenta una mayor rigidez que la triangulada.
- Las estructuras finales de ensayo muestran una rigidez específica menor que los modelos en ANSYS.

Las tres primeras conclusiones satisfacen tanto los métodos de ensayo como el programa de optimización, dando un resultado positivo al trabajo realizado.

En cuanto a la cuarta, hay que comentar que usualmente los modelos de elementos finitos realizan uniones infinitamente rígidas así como empotramientos perfectos y secciones constantes. En el caso real, debido al peso que se le da por soldadura, empotramientos imperfectos y por supuesto, errores de cotas durante la fabricación, el resultado será siempre menor. En cuanto al error, se sitúa por debajo del 10%, por lo que no resulta una diferencia muy notoria y además se muestran resultados coherentes.

Por todas estas razones, hay que notar que la validación final es muy positiva, llegando a similares conclusiones desde el punto de vista más teórico con un programa de elementos finitos, como de una estructura real y ensayos experimentales.

6. APLICACIÓN LIMM A VGDTP

Se han llevado a cabo soluciones estructurales para diversas aplicaciones utilizando el LIMM para casos más concretos, como el ejemplo mostrado en la validación experimental o los que se pueden observar en la imagen 4.

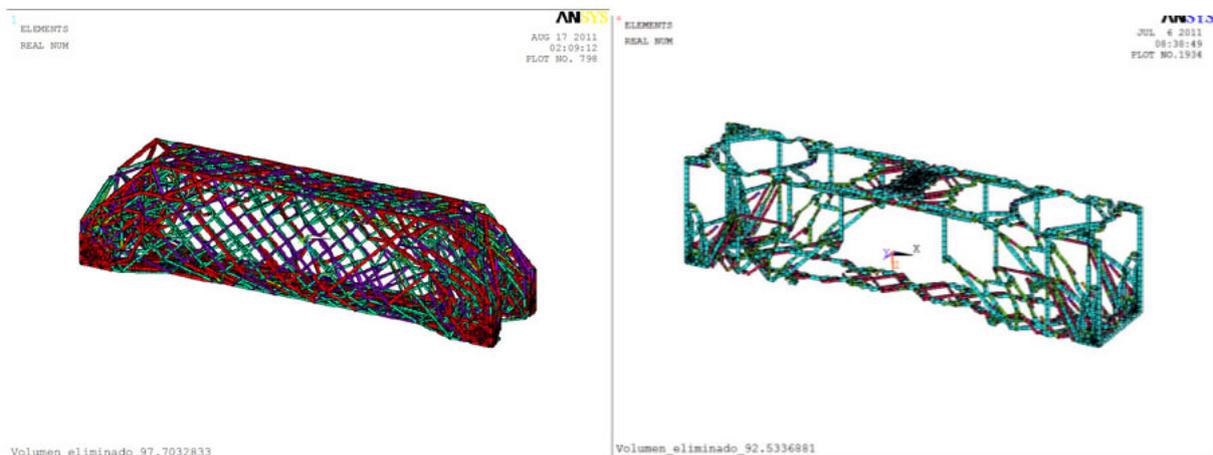


Figura 4. Ejemplos de resultados para distintas estructuras

Estos ejemplos son aplicaciones directas a vehículos de grandes dimensiones para el transporte de pasajeros (VGDTTP), cuya optimización fue el origen de este proyecto.

Por lo validado en la estructura patrón ensayada, el resultado global de la aplicación sería un aumento de rigidez de más del 15%, que se podría traducir en una reducción de peso superior al 5%, dato más que notable en superestructuras superiores a 5.000 kg. Estas optimizaciones en peso son muy relevantes, y más teniendo en cuenta el endurecimiento en las leyes medioambientales. Con esta reducción, se podrían aumentar el número de plazas de pasajeros en autocares interurbanos, reducir los niveles de emisiones de los autobuses urbanos, disminuir la motorización de los mismos o cualquier combinación de estas opciones.

A estos beneficios habría que añadir la implantación de una metodología de diseño a una industria que se basa en la experiencia. La industria de los autobuses y los autocares, debido a sus producciones de series cortas, suele tener una evolución limitada y lenta comparada al mundo del automóvil, y por este motivo, un sistema de diseño estudiado y validado, podría tener una gran aceptación.

7. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados, se podría comentar que la rutina de optimización se ha mejorado de forma considerable, sobre todo en cuanto a tiempo de cálculo, y por tanto coste computacional. Del mismo modo, se han aumentado las capacidades de la misma, de modo que se hace más cómodo y eficiente su utilización y comprobación de cara a posteriores desarrollos del sistema.

En cuanto a la mejora del programa, los resultados obtenidos son:

- Mejora de la eficiencia del proceso de variación de elementos, mejorando la precisión con que estos son seleccionados y pudiendo ser regulado completamente por el usuario. Reducción del tiempo de cálculo a una décima parte para resultados similares.
- Mejora superior al 5% de los resultados de la FO para estructuras dadas, debido a la aplicación proceso de optimización geométrica en los máximos locales del proceso base.

Todo el método ha sido validado de distintas maneras. Inicialmente, el método se validó por comparación con sistemas comerciales de optimización topológica en estructuras continuas, como se puede comprobar en el artículo publicado por E. Alcalá *et al.* [4]. En el presente artículo, esa validación se ha completado con ensayos del mismo modelo comparándolo con una solución típica. Con estos resultados favorables, se confirma la evolución positiva del programa y sus resultados.

Por supuesto, no se puede obviar que los resultados obtenidos han sido probados y ensayados, aplicables a situaciones reales, pudiendo conseguir una mejora considerable en diseño de VGDTP.

Por tanto, el desarrollo en este campo de investigación sigue siendo prometedor, ya que queda mucho por hacer y los progresos continúan avanzando en una buena dirección.

8. REFERENCIAS

- [1] S. Sakata, F. Ashida, M. Zako, *Topology and detail geometry optimization for beam structures using homotopy modeling*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 191 (2002) 4279-4293.
- [2] S. Yunkang, D. Jiazheng, G. Yingqiao, *Independent continuous mapping for topological optimization of frame structures*, Acta Mech Sin, 22 (2006) 611-619.
- [3] C.B.W. Pedersen, *Crashworthiness design of transient frame structures using topology optimization*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 193 (2004) 653-678.
- [4] E. Alcalá, D. Arribas, R. Grimaldi, R. Lagunilla, *Optimización topológica de estructuras reticuladas de nudos rígidos y sección variable*, Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Ciudad Real, España, (2010).
- [5] R. Lagunilla, *Diseño y optimización de estructuras de VGDTP*, Proyecto fin de Carrera, Univ. Politécnica de Madrid, Madrid, (2011).
- [6] ANSYS Inc., *ANSYS Parametric Design Language Guide*, ANSYS Release 11.0