

L. Pardo^a, I. Retolaza^b, F. Martínez^b, A. Noriega^c^a Universidad de Oviedo, Gijón, Spain. Lucia.parpe@gmail.com^b IK4-IKERLAN, Arizmendiarieta 2, 20500 Mondragon, Spain. iretolaza@ikerlan.es^c Construction and Manufacturing Engineering Department, University of Oviedo, Gijon, Spain.
noriegaalvaro@uniovi.es

Metodología integral de optimización dimensional y de materiales adaptada al diseño de producto

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Palabras clave:

Materiales

Optimización geométrica

Diseño de producto

Cabina de ascensor

Algoritmos genéticos

En este trabajo se expone el desarrollo de una metodología integral de optimización dimensional y selección de materiales orientada al diseño de producto. Dicha metodología se plantea mediante el uso de algoritmos genéticos y permite realizar una optimización conjunta de los materiales y la geometría en estructuras multimaterial.

La metodología de optimización incluye tres aspectos novedosos: el pretratamiento de datos de materiales y su clusterización, la definición de los objetivos y el postprocesado de los resultados sobre el conjunto de posibles soluciones para poder seleccionar la mejor solución según criterios adicionales impuestos por el diseñador.

La metodología de cálculo se ha implementado sobre el caso práctico real de la base de cabina de un ascensor, construyéndose un modelo paramétrico de la estructura que incluye varios casos de carga, y creando un problema de optimización sujeto a objetivos y restricciones. Los resultados obtenidos muestran la validez de la metodología propuesta.

Integral methodology of materials and dimensional optimization adapted to product design

ABSTRACT

Keywords:

Material optimization

Dimension optimization

Product design

Elevator cab

Genetic algorithms

This paper describes the development of an integral methodology for the material selection and dimensional optimization adapted to product design. The methodology proposes the use of genetic algorithms in order to approach the optimization of materials and dimensions in multi-material structures.

Three innovative aspects are included in this methodology: pre-treatment of the material data and its clustering, definition of objectives and post-processing of the results obtained on the possible solutions in order to select the best one according to additional opinions imposed by the designer.

The methodology has been implemented on a specific case study: the base of an elevator cab. In order to achieve this goal, a parametric model of the structure was built and several load cases were included. With these models, an optimization problem was created, subjected to goals and restrictions. The results obtained show the validity of the methodology proposed.

1 Introducción

En ingeniería mecánica, cuando se aborda el problema de crear un nuevo diseño o de desarrollar un nuevo producto, se busca encontrar los materiales más idóneos y la geometría más adecuada, para cumplir las especificaciones requeridas [1]. Cuando se cumplen todas las especificaciones y se logra dar con la mejor solución para unos indicadores que miden la calidad del diseño, se estará ante una solución óptima para el diseño. Tal es la importancia de la optimización en multitud de aplicaciones, como en el sector transporte, aeronáutico o energía, que ha llevado a los ingenieros a buscar la manera de automatizar este proceso.

Por un lado, existen multitud de metodologías de filtrado, selección y optimización de materiales. Sin embargo, no existe una metodología que, en la práctica, predomine sobre el resto. Entre la multitud de métodos que se describen en la literatura están: método del diagrama [2,14]; método de optimización multi-objetivo [3]; métodos de inteligencia artificial [2]; algoritmos genéticos (AGs) [4]; metodología desarrollada por C. Monroy en su tesis doctoral [5]; entre otros.

Por otro lado, hasta el momento, el software comercial existente solo es capaz de, o bien optimizar la geometría de una estructura, o bien los materiales, y no de forma conjunta. Programas como Hyperworks Optistruct [6], Abaqus Tosca Structure [7] o Ansys [8] realizan optimizaciones topológicas. En cambio, CES Selector [9] o Solid Works [10] permiten la optimización de materiales. La parte novedosa de este artículo radica en la integración de la optimización dimensional y de selección de materiales de un elemento compuesto en una única herramienta orientada al diseño de producto, y que, además, está basada en la optimización mediante algoritmos genéticos [11].

El objetivo es desarrollar una metodología de cálculo capaz de optimizar conjuntamente materiales y geometría, que pueda aplicarse a estructuras multimaterial. Teniendo en cuenta la complejidad de manejar variables de diferente naturaleza y que algunas de ellas solo pueden tener valores discretos, se ha optado por el uso de un optimizador basado en algoritmos genéticos (AGs). El método desarrollado ha sido verificado en el desarrollo de un diseño óptimo de base de ascensor con estructura multimaterial que debe cumplir dos tipos de requisitos, uno relacionado con la resistencia global del sistema y otro relacionado con un problema de indentación local, creando un problema de optimización multiobjetivo.

Por último, se ha realizado un filtrado de las soluciones óptimas que aporta la herramienta para permitir la selección de la solución más viable según el criterio del diseñador (como por ejemplo, disponibilidad o viabilidad técnica/económica).

2 Metodología

2.1 Descripción del caso práctico

El ejercicio de optimización se ha planteado sobre la base de la cabina de un ascensor, modelizada en formato paramétrico mediante Ansys Workbench, asimilándose a un panel tipo sándwich reforzado con perfiles de pultrusión. Por lo tanto, la

estructura está formada por tres tipos de elementos: núcleo, pieles y perfiles.

Sobre el modelo de la estructura se aplican los dos casos de carga que se muestran en la Figura 1. El primero, llamado caso de carga “modelo completo”, es una carga de 1000 kg uniformemente distribuida sobre $\frac{3}{4}$ del fondo de cabina; el segundo, llamado caso de carga “modelo tacón”, es una carga puntual de 100 kg aplicada sobre una superficie de 15 mm de diámetro, que simula el tacón de un zapato.

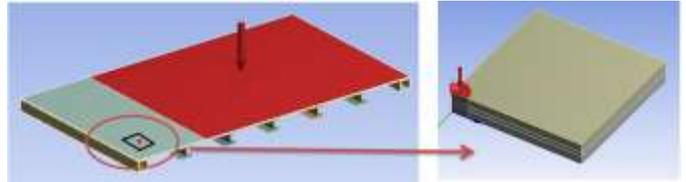


Figura 1. Casos de carga del modelo completo (izda.) y modelo tacón (dcha.)

En cuanto a las especificaciones del problema, se tienen como objetivos: masa y coste del material Y como restricciones: altura máx.= 60 mm, deformada máx.= 3 mm, para el caso de carga modelo completo un factor de seguridad elástico $\sigma_e / \sigma_{max} \geq 3$ y a rotura

$\sigma_r / \sigma_{max} \geq 5$, y para el caso de carga modelo tacón un factor de seguridad elástico $\sigma_{e_tacón} / \sigma_{max} \geq 1$.

2.2 Diagrama de flujo de la metodología integral de optimización

La herramienta de optimización necesita: una base de datos de materiales (Excel), un programa de cálculo por elementos finitos (Ansys), un algoritmo genético (NSGA-II [12]). En la Figura 2 se puede ver un diagrama de flujo que describe la interrelación entre los distintos programas.

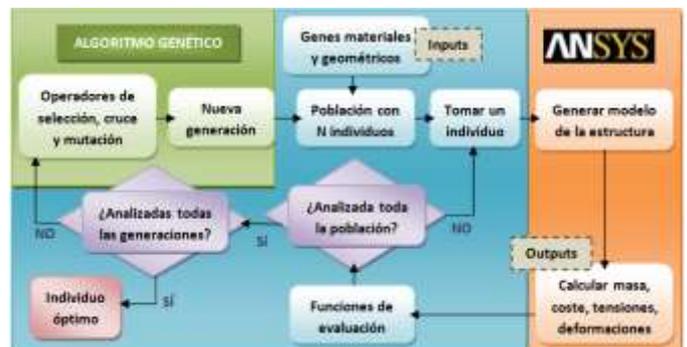


Figura 2. Bucle de funcionamiento del cálculo

La metodología integral de optimización requiere de una base de datos de materiales, a la que la herramienta pueda acceder para crear las posibles combinaciones de materiales, definir los genes que conforman al individuo (formados por las variables de tipo material y geométrico) y formular las funciones de evaluación, que determinan la aptitud o adecuación de cada individuo al problema de optimización en cuestión.

2.3 Base de datos de materiales: reducción del número de materiales

Se parte de una base de datos de materiales creada mediante el programa CES Selector, que contiene 803 posibles



materiales para pieles, 85 para el núcleo y 1.076 para perfiles. Esta base de datos está construida en forma de listado en un archivo Excel, en el que aparecen los nombres de cada material y una relación de sus características y propiedades mecánicas, tales como: coste/kg, densidad, límite elástico, módulo de Young, tensión cortante máxima, etc.

Se encuentran recogidos gran cantidad de materiales, lo que aumenta el espacio de búsqueda y, por tanto, el tiempo y la complejidad del proceso de optimización. Además, se sabe que los AGs no trabajan bien evaluando saltos de tipo escalón, los cuales se dan entre las propiedades de las diferentes familias de materiales. Se debe reducir la base de datos, consiguiendo además que los materiales posean propiedades similares, sin grandes variaciones o saltos bruscos entre sus características.

Se decide entonces agrupar algunas de las características materiales formando índices, teniendo en cuenta que, bajo sollicitación de carga, las pieles y los perfiles trabajan a flexión y el núcleo a cortadura. Los índices para pieles y perfiles son: $E/c \cdot \rho$, $\sigma_e/c \cdot \rho$ (módulo de Young y límite elástico divididos entre coste y densidad). Los índices para el núcleo son: $G/c \cdot \rho$, $\tau/c \cdot \rho$ (módulo de cortadura y cortante máxima divididos entre coste y densidad).

Con estos índices lo que se pretende es maximizar rigidez y resistencia, a la vez que minimizar coste y densidad. Además se consigue relacionar objetivos (masa y coste) con restricciones (rigideces y tensiones). Los índices se calculan para cada material de cada uno de los tres elementos de la estructura (núcleo, pieles y perfiles), y se representan gráficamente sobre un sistema de coordenadas, donde cada punto es un material (Figura 3). Se determina que los mejores materiales son los que maximizan dichos índices, por lo que se calcula el valor del vector que une cada punto con el origen de coordenadas, conservándose el 25% de los materiales para cada elemento con mejor valor según ese criterio, y eliminándose el resto. Finalmente se construye la nueva base de datos que contiene 201 posibles materiales para pieles, 22 para el núcleo y 269 para perfiles.

2.4 Definición del individuo: reducción de la dimensión del problema

El individuo está formado por genes, que son las variables del problema de optimización. Se tienen dos tipos de variables: geométricas y materiales. Se han tomado 7 genes geométricos, que se corresponden con las dimensiones de la estructura (Figura 4).

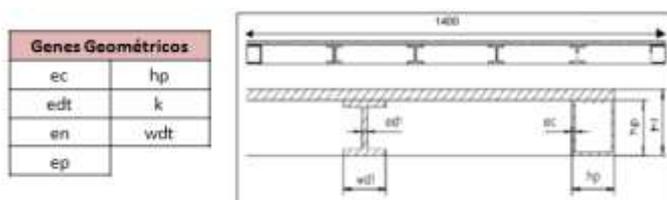


Figura 4. Genes geométricos

La longitud del individuo depende del número de genes y del número de posibles valores que puede tomar cada gen (codificado en binario). El tamaño de la población inicial se fija

en un valor de entre L y 2L, siendo L la longitud del individuo (número total de bits), por lo tanto, si esta se reduce, se consigue disminuir el tiempo y la complejidad del cálculo.

Basándose en los índices de Ashby [13], se han creado 9 genes materiales que relacionan objetivos con restricciones, y que además permiten al algoritmo minimizar coste y densidad, y maximizar rigidez y resistencia (Tabla 1). La longitud del individuo para este caso (7 genes geométricos + 9 genes materiales) es de 81 bits, y el tamaño de población recomendado se encuentra entre 81 y 162 individuos.

Tabla 1. Genes materiales

| | Modelo completo | | Modelo tacón | |
|----------|--------------------------|--|---------------------------------|-----------------------------|
| | Rigidez | Resistencia | Compresión | Cortadura |
| Pieles | $c \cdot \rho / E^{1/3}$ | $c \cdot \rho / (\sigma_e \cdot \sigma)^{1/2}$ | $c \cdot \rho / \sigma_c^{1/2}$ | - |
| Núcleo | $c \cdot \rho / E^{1/3}$ | $c \cdot \rho / (\sigma_e \cdot \sigma)^{1/2}$ | $c \cdot \rho / \sigma_c^{1/2}$ | $c \cdot \rho / \tau^{1/2}$ |
| Perfiles | $c \cdot \rho / E^{1/3}$ | $c \cdot \rho / (\sigma_e \cdot \sigma)^{1/2}$ | - | - |

Posteriormente, se decide reducir los genes materiales a solo uno por cada elemento, 3 en total. Para ello, se normalizan los genes de cada elemento y se calcula su distancia euclídea. La longitud del individuo para este caso (7 genes geométricos + 3 genes materiales) es de 47 bits, y el tamaño de población recomendado se encuentra entre 47 y 94 individuos. Esto se traduce en una reducción del tiempo computacional de un 30%.

2.5 Funciones de evaluación: búsqueda de formas suaves y simplificación del filtrado

Se han propuesto unas funciones de evaluación (FE) que devuelven el valor unidad cuando se está evaluando el valor límite de cada objetivo o restricción (Figura 5). Esta formulación facilita la selección de soluciones finales al poder apreciar visualmente qué individuos no cumplen las especificaciones del problema, ya que presentan un valor de FE superior a 1.

Las especificaciones de masa, coste, altura y deformada, no deben sobrepasar un valor máximo. Sus FE se han definido de la siguiente manera: $(valor_{obtenido} / valor_{requerido})$. En cambio, las especificaciones de factores de seguridad elástico, rotura y tacón, deben sobrepasar un valor mínimo. Sus FE se han definido de la siguiente manera: $(valor_{requerido} / valor_{obtenido})$. Siendo el $(valor_{obtenido})$ aquel que se extrae de los cálculos en Ansys, y el $(valor_{requerido})$ aquel que define el límite máximo de cumplimiento de cada objetivo o restricción.

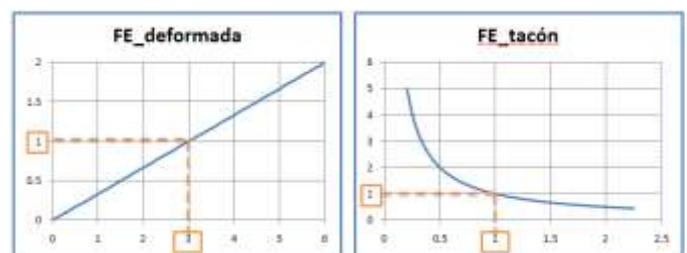


Figura 5. Funciones de evaluación



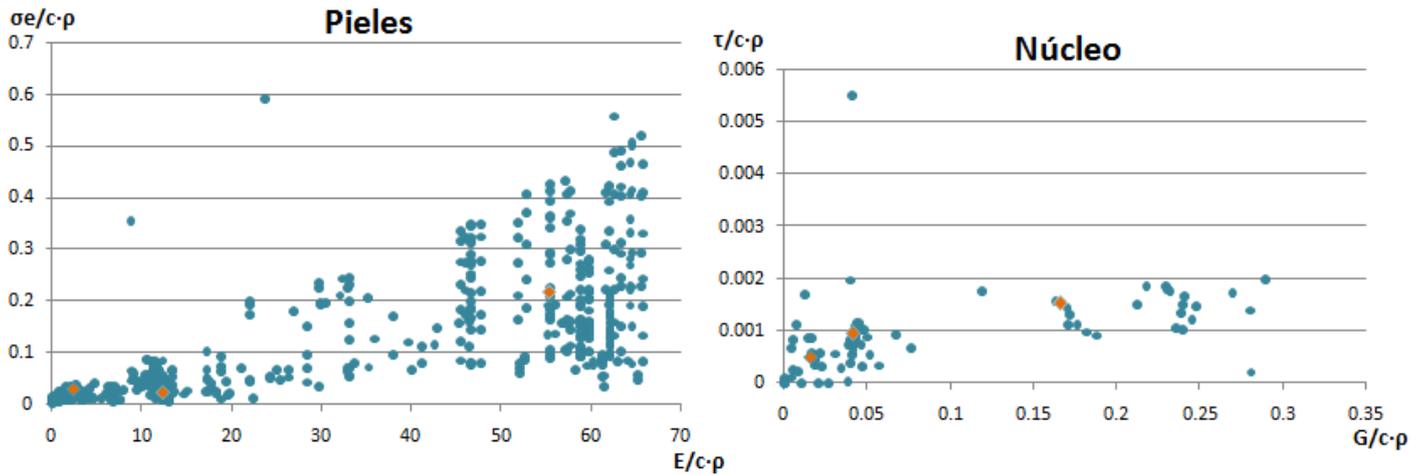


Figura 3. Representación gráfica de los índices para los materiales de piel y núcleo

3 Resultados

La herramienta de optimización no aporta una única solución óptima, sino que ofrece un conjunto de posibles soluciones (frente de óptimos de Pareto) que corresponden a un conjunto de combinaciones de variables (conjunto de óptimos de Pareto). Es tarea del diseñador escoger la solución más apta, según sus necesidades, de entre las contenidas en el frente de Pareto (selección a posteriori). Esta elección se basa en consideraciones más difíciles de enunciar de manera matemática como la disponibilidad de materias primas, la posibilidad de fabricación o el coste de producción.

Se ha impuesto un criterio de selección de los resultados teniendo en cuenta que lo que interesa es minimizar los objetivos siempre y cuando se cumplan de manera estricta las restricciones. Tras esto, se revisa que las soluciones óptimas propuestas se encuentren por debajo de los umbrales fijados para los objetivos. Se realiza un filtrado mediante macros de Excel de manera que se eliminan las combinaciones de materiales que no cumplen las especificaciones, es decir, los individuos que dan valores de FE por encima de 1. A continuación, se ordenan las soluciones válidas restantes buscando los mínimos valores para objetivos (masa y coste).

Finalmente, se han obtenido los siguientes resultados mostrados en la Tabla 2 y la Tabla 3. En la Tabla 2 se puede ver una relación de las combinaciones de materiales correspondientes a los tres elementos de la estructura: núcleo, pieles y perfiles. También se muestran los valores de masa y coste obtenidos para esas combinaciones, indicando en la parte superior de la tabla los valores límite para masa (56,7 kg) y coste del material (valor actual €) que se habían fijado para que los objetivos no pudieran sobrepasarlos.

Tabla 2. Soluciones óptimas ideales

| Núcleo | Pielés | Perfiles | Reducción Masa | Reducción Coste |
|-------------------|---|---|----------------|-----------------|
| Glass foam | Low alloy steel, AISI 5150, annealed | Carbon steel, AISI 1340, annealed | 58% | 50% |
| Glass foam | Carbon steel, AISI 1137, tempered at 315°C | Carbon steel, AISI 1050, tempered at 425°C | 57% | 50% |
| Glass foam | Carbon steel, AISI 1095, tempered at 205°C | Carbon steel, AISI 1095, tempered at 540°C | 56% | 50% |
| Aluminum-SiC foam | Low alloy steel, AISI 4140, tempered at 425°C | Low alloy steel, AISI 5130, tempered at 650°C | 53% | 41% |
| Aluminum-SiC foam | Carbon steel, AISI 1137, annealed | Low alloy steel, AISI 4037, tempered at 315°C | 52% | 40% |

La Tabla 3 expone los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros geométricos de la estructura, debiendo aclarar que los valores de la primera fila se corresponden con las combinaciones de materiales que incluyen "Glass foam" para el núcleo, y los de la segunda fila son para las combinaciones que incluyen "Aluminum-SiC foam".

Tabla 3. Parámetros geométricos ideales

| ec [mm] | edt [mm] | en [mm] | ep [mm] | hp [mm] | k | wdt [mm] |
|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-----|---------------|
| 0.75 | 2.5 | 4 | 0.2 | 40 | 3 | 40.5 |
| 1 | 3.25 | 5 | 0.3 | 38 | 3 | 38 |

Los valores expuestos anteriormente se consideran soluciones válidas idealmente hablando, ya que pese a presentar los mejores valores encontrados para masa y coste, contienen soluciones poco factibles desde el punto de vista técnico a la hora de fabricar la estructura. En la Tabla 3 se ha resaltado con un recuadro en rojo los valores obtenidos para el espesor de las pieles (e_p), queriendo indicar que son valores demasiado pequeños para poder encontrar en el mercado planchas de acero con esos espesores. Lo mismo sucede con los materiales, ya que se obtienen unas soluciones que no siempre son asequibles, como por ejemplo, sería difícil y caro encontrar en el mercado el material "Glass foam" necesario para fabricar el núcleo.

Estas soluciones óptimas ideales se han obtenido debido a que, en los cálculos realizados, se acotaron los rangos



geométricos con la intención de encontrar los mejores resultados posibles, y, además, se hicieron pruebas con todo tipo de materiales sin tener en cuenta si se podría disponer de ellos. Es por esto que, posteriormente, se decide seleccionar otras soluciones o combinaciones de materiales y geometría, de entre las soluciones óptimas que ofrece la herramienta, que son más fáciles de adquirir y fabricar (ver Tabla 4 y Tabla 5).

Tabla 4. Soluciones óptimas realizables

| Núcleo | Pieles | Perfiles | Reducción Masa | Reducción Coste |
|-------------------------|--|---|----------------|-----------------|
| Aluminum 3003 honeycomb | Carbon steel, AISI 1340, tempered at 315°C | Low alloy steel, AISI 9255, annealed | 24% | 41% |
| Aluminum 5052 honeycomb | Carbon steel, AISI 1141, tempered at 425°C | Low alloy steel, AISI 5130, tempered at 650°C | 19% | 28% |

Tabla 5. Parámetros geométricos realizables

| <i>ec</i> [mm] | <i>edt</i> [mm] | <i>en</i> [mm] | <i>ep</i> [mm] | <i>hp</i> [mm] | <i>k</i> | <i>wdt</i> [mm] |
|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|--------------------|
| 0.75 | 3 | 8 | 0.7 | 37 | 3 | 43 |
| 0.75 | 3.25 | 6 | 0.6 | 39 | 4 | 43 |

La Tabla 4 muestra dos combinaciones posibles de materiales para cada elemento de la estructura, y la Tabla 5 recoge sus correspondientes parámetros geométricos o dimensiones.

Para evitar las soluciones que, aunque sean óptimas, no son factibles desde el punto de vista técnico-económico, sería conveniente que el diseñador realizara un estudio a priori de los materiales y el rango de dimensiones disponibles. Se debería investigar previamente qué materiales son más baratos y más fáciles de conseguir en el entorno de la empresa, y con qué espesores o dimensiones pueden ser proporcionados por los fabricantes, creando así una base de datos a medida y definiendo unos parámetros geométricos en consonancia.

4 Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología válida que integra dos tipos de optimización que hasta el momento no podían ser aplicados a la vez: optimización material y topológica.

Se ha adaptado con éxito dicha metodología a la optimización conjunta de los materiales y la geometría de una determinada estructura multimaterial, que se corresponde con la base de la cabina de un ascensor. Además, se trata de una metodología compatible con una herramienta de optimización basada en algoritmos genéticos.

La herramienta no aporta una única solución factible, sino que propone una serie de posibles combinaciones que cumplen las restricciones del problema y que son no dominadas según el concepto de Pareto. De entre este conjunto de soluciones no dominadas y que cumplen las restricciones debe escogerse aquella que se considere más satisfactoria o eficiente, es decir, la que mejor se adapte a las necesidades del diseñador.

Al desarrollar la metodología integral de optimización, se pone de manifiesto la importancia de una serie de cuestiones que deben tenerse en cuenta a la hora de definir el problema:

- Reducir todo lo posible la base de datos de materiales, teniendo en cuenta que no debe haber saltos bruscos entre los valores de sus propiedades mecánicas, sino que las variaciones han de ser más progresivas (para que el AG trabaje correctamente). Realizar un estudio a priori de la disponibilidad de materiales y geometrías para crear una base de datos más específica.
- Reducir el número de genes materiales para poder limitar la longitud del individuo, que influirá en el tamaño de la población inicial, y, por tanto, en el tiempo computacional y la complejidad del cálculo.
- Definir unos genes materiales que relacionen objetivos con restricciones, aportando de este modo más información al algoritmo.
- Formular las funciones de evaluación para que crezcan o decrezcan progresivamente, sin incorporar saltos de tipo escalón que confunden al algoritmo.
- Definir unas funciones de evaluación que devuelvan el valor unidad cuando se estén evaluando los valores límite de las especificaciones, pudiendo ver rápidamente si se están cumpliendo.
- Agrupar todo lo posible las funciones de evaluación referidas a las restricciones para que el algoritmo pueda ser más eficaz a la hora de minimizar los objetivos.
- Filtrar los resultados finales que proporciona la herramienta, descartando las soluciones que no cumplen las restricciones y ordenando los individuos aptos según sus objetivos.
- El planteamiento del problema como uno de optimización con restricciones minimiza la posibilidad de encontrarse con un conjunto de soluciones vacío. Esta posibilidad existe si se realiza un simple filtrado de soluciones que cumplan las especificaciones.

5 Referencias

- [1] Swan, C.C., Arora J.S. Topology design of material layout in structured composites of high stiffness and strength. *Structural Optimization*, **13**, 45-59 (1997). DOI: 10.1007/BF01198375
- [2] Jahan, A., Ismail, M. Y., Sapuan, S. M., et al. Material screening and choosing methods. *Materials & Design*, **31**, 696-705 (2000). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.013>
- [3] Ashby, M. F. Multi-objective optimization in material design and selection. *Acta Materialia*, **48**, 359-369 (2000). [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00304-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00304-3)
- [4] Ashby, M. F. *Material selection in mechanical design*, 3rd edition, Elsevier: (2005).
- [5] Monroy, C. *Design optimization of Composite Structures*[dissertation] Cambridge University, (2008).
- [6] Kulkarni, V., Jadhav, A., & Basker, P. , *Finite Element Analysis and Topology Optimization of Lower Arm of Double Wishbone*



Suspension using RADIOSS and Optistruct. *International Journal of Science and Research*, **3**, 639-643 (2014).

[7] Furbatto, L., Di Lorenzo, G., Pedersen, C.. Optimization in the Abaqus Environment using TOSCA. 2009. Available: http://www.simulia.com/download/pdf2009/Furbatto_SCC2009.pdf

[8] Anand, K., Anadi, M. . Topology Optimization and Structural Analysis of Continuous Linear Elastic Structures using Optimality Criterion Approach in ANSYS. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, **4**, 4865-4873 (2015).
DOI:10.15680/IJRSET.2015.0406138

[9] Granta Design. (n.d.). Available: <http://www.grantadesign.com/ES/products/ces/>

[10] SolidWorks. (n.d.). [En línea] Available: <http://www.solidworks.es/sw/products/simulation/material-optimization.htm>

[11] Goldberg, D. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, (1989).

[12] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, et al. . A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *Lecture Notes in Computer Science*, **1917**, (2000).
DOI: 10.1007/3-540-45356-3_83

[13] Ashby, M. F., Cebon, D. Material Selection in Mechanical Design, *Journal de Physique IV Colloque*, **3**, C7-1-C7-9, (1993).

[14] EHU - UPV Universidad del País Vasco. [En línea]. Algoritmos genéticos, (2004) Available: <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/temageneticos.pdf>

