

Propuestas para la optimización de piezas para fabricación aditiva



Proposals for the optimization of pieces produced by additive manufacturing



Amabel García-Domínguez, Juan Claver-Gil y Miguel-Ángel Sebastián-Pérez

Universidad Nacional de Educación a Distancia. ETS Ingeniería Industrial. Departamento de Construcción y Fabricación. Calle Juan del Rosal, 12 – 28040 Madrid (España). Tfno: +34 913 986445

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8585> | Recibido: 13/09/2017 • Evaluando: 13/09/2017 • Aceptado: 10/01/2018

ABSTRACT

• Additive manufacturing allows greater freedom and new possibilities for designers. Thus, at the manufacturing stage, additive manufacturing has very few geometrical limitations in comparison with traditional manufacturing process.

In that context, the optimization of the designs grows in importance. Both topology and multiobjective optimization are fields of great interest as links between the Computer-Aided Design of pieces and the new additive manufacturing technologies. But these kind of approaches have problems related to the non continuous work flow during the optimization process.

This work exposes an initial approximation to topology and multi-objective optimization of pieces obtained by 3D printing by using the solvers included on the software Grasshopper, which work through structures designed by graphic computer programming. Then, 3D models of the pieces are analyzed in order to determinate the resistance and service behaviour of the optimized designs, and the pieces are obtained by 3D printing in order to check their printability.

• **Keywords:** optimization, additive manufacturing, 3D printing, methodology, simulation.

RESUMEN

La fabricación aditiva aporta mayor libertad y nuevas posibilidades a los diseñadores. En la fase de fabricación de los productos diseñados, la fabricación aditiva plantea menos limitaciones geométricas en comparación con los procesos de fabricación tradicionales.

En ese contexto, la optimización de los diseños adquiere una mayor importancia. Tanto la optimización topológica como la optimización multiobjetivo representan campos de gran interés, siendo nexo entre el diseño asistido por ordenador y las nuevas tecnologías de fabricación aditiva. Sin embargo, los esfuerzos en estas líneas encuentran dificultades relativas a la no continuidad del flujo de trabajo durante el proceso de optimización.

Este trabajo expone una aproximación a la optimización topológica y multiobjetivo de piezas obtenidas por impresión 3D mediante la utilización de solvers incluidos en el software Grasshopper, que operan a través de estructuras diseñadas mediante programación gráfica. Los modelos 3D de las piezas son analizados

para determinar el comportamiento en servicio y la resistencia de los diseños. Se comprueba, mediante su impresión 3D, que las piezas se pueden realizar por fabricación aditiva.

Palabras clave: optimización, fabricación aditiva, impresión 3D, metodología, simulación.

1. INTRODUCCIÓN

Los medios productivos condicionan la manera en la que se diseñan los productos que usamos. Las especificaciones fijadas en el diseño de una pieza deben ser viables desde el punto de vista de la fabricación, además de cumplir con los requisitos de las condiciones de servicio. Los procesos tradicionales, habitualmente agrupados en procesos de conformado por deformación plástica, por colada y por arranque de material, plantean limitaciones que el diseñador debe considerar al concebir la pieza. Limitaciones que podrán ser de carácter tecnológico, como el comportamiento de los distintos materiales frente a los procesos, pero también relativas a la propia concepción de esos procesos, y que plantean restricciones en las geometrías obtenibles, muy especialmente en lo relativo al interior de las piezas [1].

La fabricación aditiva, que consta en material capa a capa hasta conformar la geometría final de la pieza en un único proceso, es todavía una realidad reciente frente a los procesos de conformado tradicionales. Los avances tecnológicos están siendo significativos en los últimos años, incorporando nuevos materiales de trabajo y equipos y procesos cada vez más eficaces [2]. También su presencia en la industria crece constantemente, ofreciendo nuevas soluciones en gran variedad de sectores [3-6]. La fabricación aditiva cambia radicalmente el paradigma productivo, ofreciendo nuevos escenarios y posibilidades, tanto en lo relativo a los agentes involucrados y sus roles, como en la manera de pensar y concebir los productos [7,8]. Los precios cada vez más asequibles de las impresoras 3D han introducido en el ámbito de la pequeña empresa (e incluso en el ámbito doméstico) equipos de prestaciones básicas pero que ya consiguen cambiar la relación tradicional entre diseñador, fabricante y consumidor, pudiendo recaer todos estos roles en una misma persona. Una tendencia que podría llevar a convertir estas impresoras en objetos cotidianos de nuestros hogares planteando nuevas estructuras de consumo. Además, la concepción de los diseños como suma de capas de material aportadas sucesivamente permite al diseñador plantear geometrías antes imposibles. Imaginemos una pieza cilíndrica que en servicio se beneficia de la existencia de un conducto interior de desarrollo helicoidal co-

nectando sus dos caras planas. Supongamos que la incorporación de dos nuevos conductos idénticos al primero pero desplazados respecto de él un tercio de circunferencia tomando como centro el eje de revolución de la pieza, mejora el funcionamiento en servicio. No se trata de una pieza compleja, pero sí de una geometría difícil de obtener con los procesos tradicionales y asequible desde la óptica de la fabricación aditiva. Pero las nuevas posibilidades no sólo afectan a las posibles cavidades y formas interiores, también a las partes sólidas. Las tecnologías de fabricación aditiva incorporan al proceso de diseño y de optimización nuevos aspectos como el relleno de esas partes o el espesor de la envolvente o superficie exterior de la pieza. Imaginemos poder actuar sobre estos aspectos en la geometría anteriormente propuesta como ejemplo.

En un contexto en el que la libertad y la flexibilidad aumentan significativamente, la optimización tiene un papel clave como medio para potenciar estas nuevas posibilidades [9,10], en cuanto que al incrementarse significativamente el número de soluciones viables la identificación de las más satisfactorias respecto de los objetivos es clave. Se trata, por tanto, de hallar los valores de las variables consideradas que maximicen la función objetivo dentro

de unos rangos forzados por las restricciones del problema. La optimización podrá centrarse en un aspecto concreto de la pieza o del proceso, o en varios simultáneamente. Desde esta perspectiva, la fabricación aditiva y su optimización plantean escenarios muy interesantes también desde el punto de vista formativo y docente en la ingeniería, al permitir en un contexto muy acotado percibir y reflexionar sobre las interrelaciones entre las etapas y agentes del proceso productivo [11].

El proceso de optimización se realiza durante la fase de diseño de la pieza, y en él los softwares de diseño asistido por ordenador y de optimización tienen un papel clave que condicionará los resultados del producto final. [12]. La selección del software más adecuado representa una tarea inicial de gran importancia [13]. Actualmente existen distintos programas comerciales que integran el modelado 3D de la pieza y la optimización del diseño.

Los estudios orientados a alcanzar determinada resistencia mecánica con el menor material posible, reduciendo el coste, el peso y, en el caso de la fabricación aditiva, también los tiempos de fabricación, representan una de las líneas de trabajo más prolíficas en el campo de la optimización de estos procesos de conformado por adición [14-17]. Además, entender la geometría de la pieza no de manera maciza sino compuesta por una envolvente y un relleno, extiende la optimización a estos dos nuevos aspectos.

Es posible diferenciar dos grandes grupos en los procesos de optimización según la naturaleza del modelo 3D de la pieza, según sea paramétrico o discretizado [18]. Los modelos paramétricos definen la geometría de la

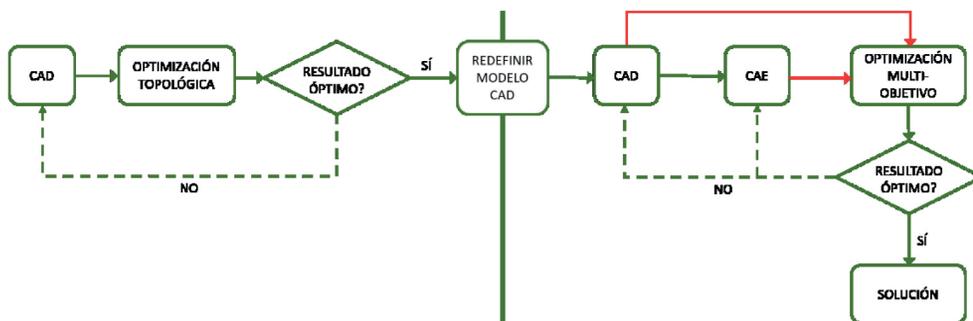


Fig. 1: Flujo de trabajo habitual en los softwares de optimización comerciales

IMPORTACIÓN DE GEOMETRÍA IMPORTACIÓN DESDE: CATIA V5 FORMATO: *.IGS UNIDADES: m	MALLADO DE GEOMETRÍA TIPO DE ELEMENTOS: Caras trianguladas Nº DE NODOS: 5688	ASIGNACIÓN DE CARGA CARGA PUNTUAL ASIGNADA DESDE: contorno CARGA PUNTUAL: -490,5 KN (\vec{z})	GENERACIÓN DE APOYOS RESTRICCIÓN DE APOYOS DESDE: contorno RESTRICCIONES: TX; TY; TZ; RX; RY; RZ
SOLVER DE OPTIMIZACIÓN Nº ITERACIONES: 15 TIEMPO DE PROCESO: 2' 02" VARIABLE: Fracción de volumen RESTRICCIÓN: Límite superior máximo 20% OBJETIVO: Min. Energía de deformación	RESULTADOS EXPORTACIÓN A *.STL, *.OBJ O SIMILAR: Sí	IMPRESIÓN 3D VOLUMEN INICIAL: 588.710,74 mm ³ VOLUMEN FINAL: 58.537,23 mm ³ REDUCCIÓN DE VOLUMEN: 90% NÚMERO DE NODOS FINAL: 1046 TIEMPO DE FABRICACIÓN: 4h 2' PESO MATERIAL: 47 gr PRECIO PIEZA EN MATERIAL: 2,80 €	

Fig. 2: Resumen de las condiciones establecidas en el estudio de caso para el software Grasshopper durante el estudio de selección de software

pieza mediante una serie de variables y sus relaciones. A través de dichas variables se podrá optimizar su geometría interna y externa en relación a aspectos como la cantidad de material empleado o la resistencia de la pieza ante los esfuerzos considerados. Los discretizados definen una malla con un número finito de elementos referidos a una única variable a optimizar. Estas mallas son adecuadas para la optimización topológica de las piezas mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM). Sin embargo, para optimizar otras variables es necesario establecer un flujo de trabajo entre estos modelos y modelos parametrizados, una conexión compleja en la práctica al ser modelos independientes [19-23].

Los softwares comerciales especializados en optimización multi-objetivo destacan por establecer bancos de trabajo entre diferentes programas de manera intuitiva, sin necesidad de entrar en el código de los algoritmos, y conectando software CAD, CAM y CAE para recoger variables y objetivos de manera multidisciplinar. Así permiten al usuario realizar una optimización multi-objetivo evaluando más de una simulación simultáneamente [24]. La Figura 1 resume gráficamente esta estructura. El flujo de trabajo a través de los diferentes módulos se realiza en paralelo. Con variables parametrizadas es posible establecer flujo de trabajo con software CAD, pero cuando las variables son unitarias y corresponden con los elementos discretizados del FEM no es posible establecer este flujo. Como muestra la Figura 1 esto implica volver a modelar la pieza teniendo en cuenta los resultados de la optimización topológica, pero a partir de los parámetros considerados como variables en el siguiente problema de optimización.

Este trabajo desarrolla una propuesta que establece un flujo de datos y operaciones continuo entre los datos numéricos de la geometría inicial, o generada a partir de diferentes algoritmos, y los solvers o aplicaciones de Análisis de Elementos Finitos (FEA) y de optimización. La metodología se plantea mediante programación visual desarrollada con el software Grasshopper, incluido en Rhinoceros, y consiste en la construcción de un modelo de optimización a través de su estructura de programación en la que se conectan diferentes acciones, algoritmos, geometrías, etc., definidas mediante acciones matemáticas secuenciales a partir de datos numéricos. Tras describir el planteamiento propuesto y exponer y discutir los resultados obtenidos, se apuntan las principales direcciones identificadas como trabajos futuros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se apoya en un estudio previo de selección del software de optimización adecuado para este estudio [13]. Para ello se identificaron numerosos software de optimización (tanto topológica como multiobjetivo), se realizó una preselección considerando aspectos de especial importancia (como la capacidad de importación directa a formatos imprimibles o la integración de módulos de optimización tanto topológica como multiobjetivo), y se analizaron los resultados obtenidos con cada herramienta para el caso de estudio propuesto, consistente en el diseño de un gancho de pared. Con todo ello se seleccionó como la alternativa más adecuada el software Grasshopper y algunos de sus solvers, como Millipede. La Figura 2 resume, en la parte superior, la información básica relativa a la definición del modelo de partida y, en la inferior, muestra la pieza una vez optimizada y su exportación al software Cura 15.04 de generación de g-code para ser impresa en una impresora 3D.

La propuesta desarrollada plantea la optimización de la geometría, relleno y envoltorio exterior de la pieza. Como caso de estudio se continúa el análisis del gancho de pared ya indicado.

Para estos tres aspectos se quiere obtener la máxima rigidez con el menor material posible minimizando los desplazamientos de los nodos de la malla. El tiempo de fabricación en impresión 3D es proporcional al volumen de la pieza, igual que lo es la cantidad de material, siendo un objetivo fundamental minimizar el volumen de la pieza. El proceso de optimización para alcanzar estos objetivos se articulará a través de diferentes variables en cada caso y teniendo en cuenta ciertas restricciones. Así, la geometría de la pieza considera como variables las posiciones de los anclajes a la pared y la ubicación de la carga, referidas a la geometría simplificada de partida. La variable vinculada a la envoltorio de la pieza será su espesor y las del relleno serán su geometría y densidad. La alteración de los valores de las variables estará restringida por las condiciones de contorno de partida, las restricciones lógicas de cada variable, como los espesores mínimos admisibles o viables, y las relaciones establecidas entre las variables en la programación. La Figura 3 recoge gráficamente estas consideraciones.

El usuario dispone de diferentes *plug-ins* (también denominados *add-ons* o *solvers*) incluidos en Grasshopper y que ofrecen distintas funcionalidades. Algunos ejemplos de estos *plug-ins* y de sus aplicaciones son Karamba para el análisis estructural basado en el FEM, Topot y Millipede para la optimización topológica, Galapagos, Goat, Millipede y Octopus para la optimización mono-objetivo, y Octopus y Octopus E para la optimización multi-objetivo. Previamente al diseño de la propuesta descrita en este trabajo se analizaron las funcionalidades y posibilidades de todos ellos de cara a la selección de los más idóneos para los objetivos de este trabajo.

A partir de la programación gráfica se incorporan estos *add-ons* para integrar la optimización topológica y la optimización multi-objetivo. Esto se hace desde dos enfoques diferentes. Por un lado considerando un único *solver* de optimización y, por otro, considerando más de uno, lo que permite hablar de una jerarquización de los *solvers*. La Figura 4 esquematiza ambos planteamientos utilizando los logotipos de los *plug-ins*. Para el caso de estudio propuesto se seleccionaron los solvers Karamba, Millipede y Octopus. En el momento de desarrollo de esta propuesta el algoritmo de TopOpt es aplicable únicamente a geometrías 2D, por lo que se descarta. Galapagos está orientado a la optimización mono-objetivo, al igual que Goat, por lo que igualmente se descartan para este estudio.

Las variables, que actúan como inputs en los algoritmos que generan la geometría, se representan con la letra V, y los objetivos

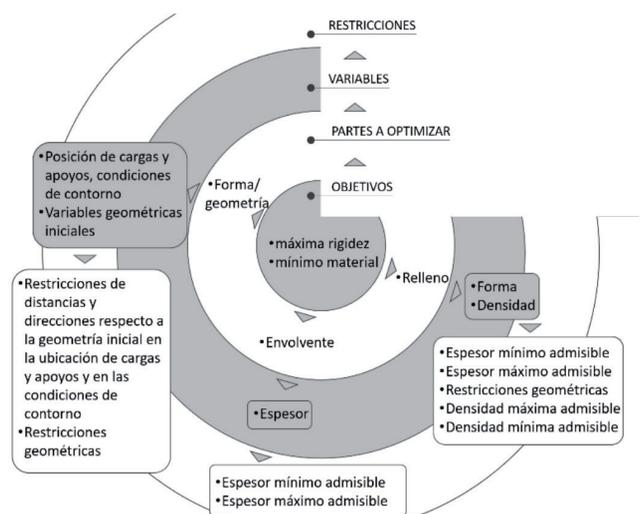


Fig. 3: Objetivos, variables y restricciones de las partes optimizadas

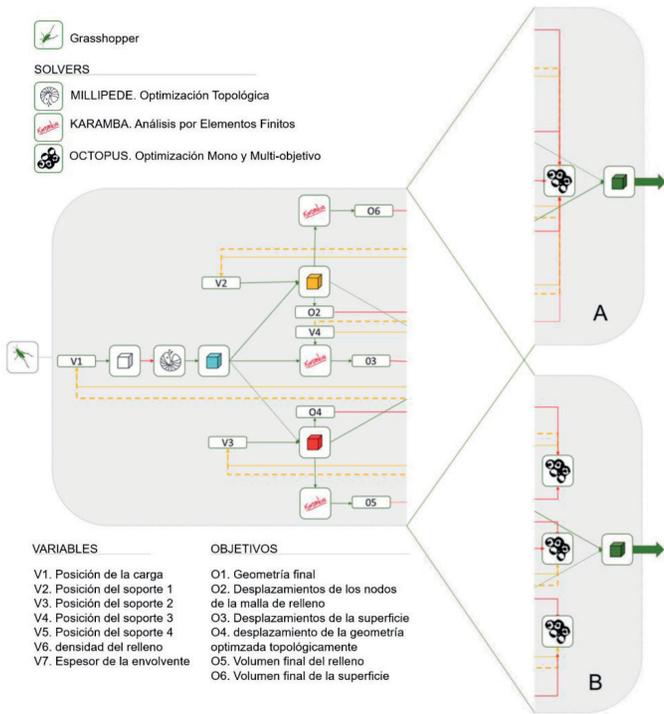


Fig. 4: Representación esquemática de las metodologías con un solo solver de optimización (A) y con más de uno (B)

con la O. Los cubos representan las geometrías generadas a partir de Grasshopper mediante relaciones matemáticas en el caso de la geometría general y algoritmos en el caso del relleno y la superficie. El color blanco del cubo hace referencia a la volumetría

inicial previa a la optimización topológica, que se representa con el color azul. El color naranja al relleno, el color rojo a la superficie de contorno y el color verde a la geometría a exportar, formada por la unión de la superficie y el relleno en una única geometría.

Finalmente, las líneas y flechas indican el flujo de información a través de los nodos y determinan la metodología. Las líneas de color verde indican el flujo de información desde las variables a la geometría y a los solvers de optimización topológica y de FEA en cada caso. Las líneas naranjas representan el flujo de datos de las variables al solver de optimización mono-objetivo o multi-objetivo, siendo la línea discontinua la que representa el flujo desde el solver a la geometría para redefinirla. Las líneas rojas representan el flujo de información de los objetivos, que en el caso del volumen sale de los datos geométricos y en el caso de la resistencia del FEA.

2.1. PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN NO JERARQUIZADA

A continuación se describen los principales aspectos considerados en la programación visual de ambas propuestas. La Figura 5 muestra la programación gráfica realizada en Grasshopper para la metodología de un único solver. Dada la dificultad para visualizar con claridad toda la estructura de la programación usando un medio distinto al propio software, se incluyen algunos zooms que ayudan a ilustrar, a modo de ejemplo, la filosofía de la herramienta, el diseño de algunas de sus partes y los resultados obtenidos en ellas.

Tanto al considerar un único solver de optimización como varios, se parte de la misma volumetría inicial. Su modelo geométrico se realiza desde Grasshopper a partir de su programación visual, estableciendo relaciones matemáticas para poder tomar como va-

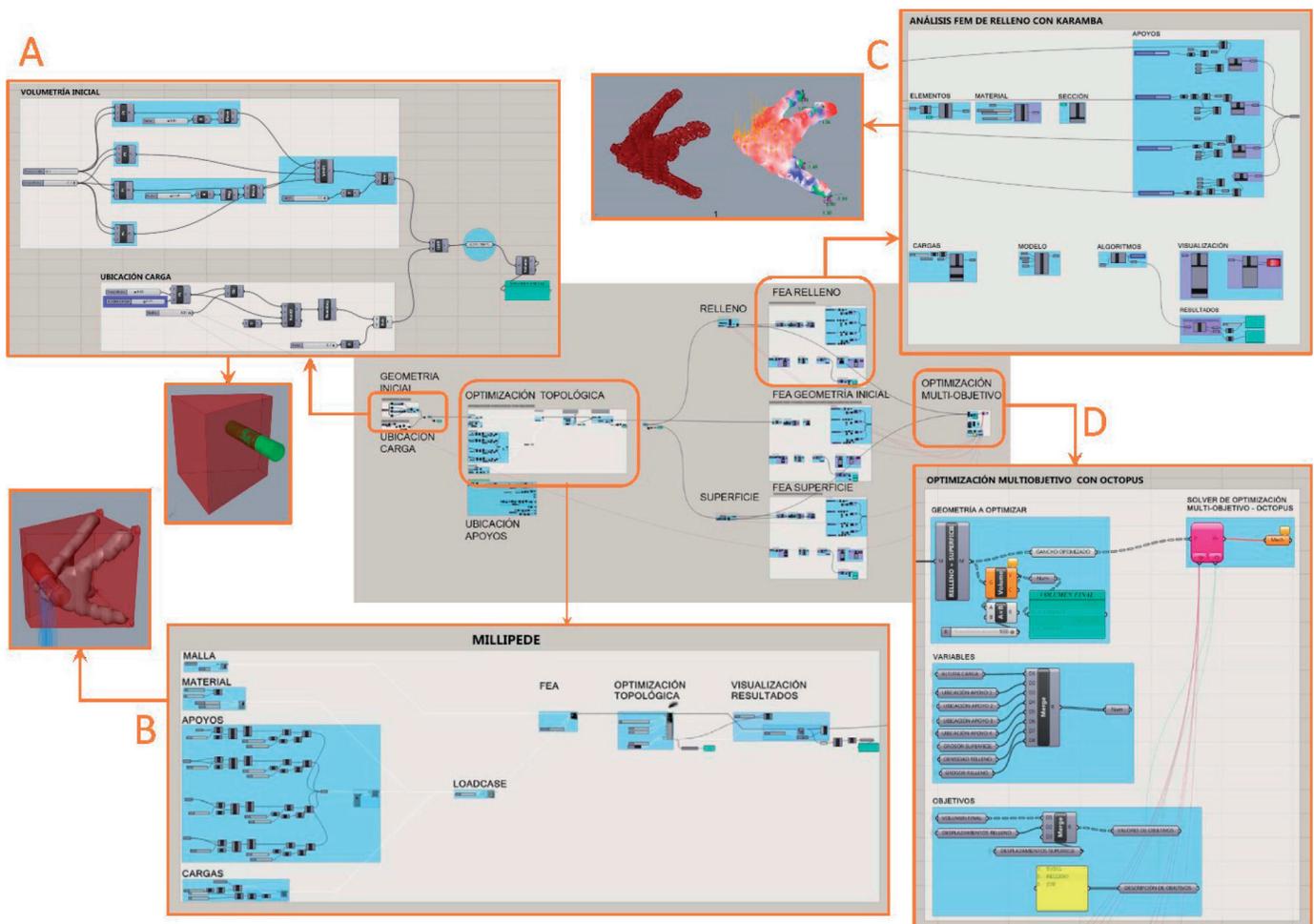


Fig. 5: Estructura de la programación visual en Grasshopper de la metodología con un único solver de optimización

riables los inputs introducidos en su definición. La ubicación de la carga se define de manera independiente para establecerla como una variable a optimizar. La Figura 5, en la parte identificada con la letra A, ilustra la programación lineal de esta parte de la propuesta y el resultado obtenido.

Posteriormente se realiza una optimización de la geometría inicial. Se define desde Grasshopper el tamaño de la malla, los valores característicos del material y la ubicación de la carga y los apoyos para después introducirlos en el FEA. Los resultados de este análisis se introducen en el algoritmo de optimización topológica de Millipede. La Figura 5, en la parte identificada con la letra B, aporta algo más de detalle de la estructura de la programación lineal de esta parte de la metodología y muestra el resultado obtenido.

La geometría resultante de la optimización topológica es una malla sobre la que es posible realizar un FEA para conocer su rigidez a través de los desplazamientos máximos de sus nodos. La ubicación de los apoyos, así como la altura de la carga, se establecen como variables del problema.

Los datos de la geometría obtenida en la optimización topológica se transmiten a algoritmos que generan la geometría del relleno. Estos algoritmos se pueden elaborar desde Grasshopper o importarlos en forma de plug-in a partir del trabajo compartido por otros investigadores. Al igual que para la volumetría general, interesa que se puede realizar un FEA a la malla de la geometría de relleno. Los datos de condiciones de carga y apoyos se comparten con el FEA inicial a través del flujo de información continua en todo el proceso. En función de la geometría del relleno se realizará el FEA desde elementos lineales o superficiales, aunque se mantendrán en ambos casos las mismas condiciones de cargas y apoyos. En la Figura 5, indicado con la letra C, se hace un zoom a la programación lineal de esta parte de la metodología y se muestran gráficamente los resultados del análisis por el FEM realizado a la alternativa obtenida para la geometría del relleno.

A partir de la solución de la optimización topológica, además de la generación del relleno, se genera la superficie de contorno de

la pieza que encierra al relleno. Esta superficie tendrá un grosor a optimizar en función de la respuesta mecánica de la pieza. Al igual que para el relleno, se pueden definir tantas alternativas de diseño como se deseen. Igualmente se somete la geometría obtenida a un análisis por el FEM.

En la optimización multiobjetivo, indicada en la Figura 5 con la letra D, se establecen como variables la altura de la carga, la ubicación de los apoyos, el grosor de la superficie, el grosor del relleno y la densidad del relleno establecida desde su relación matemática con una de las variables introducidas en el algoritmo de Mesh+. Como objetivos se establecen minimizar el volumen total de la pieza, resultante de la suma del volumen del relleno y de la superficie de contorno, y minimizar los desplazamientos en los nodos de la malla más desfavorables.

La Figura 6 muestra los diferentes resultados de la función objetivo para los diferentes valores de las variables establecidas. Todos ellos quedan dentro de la región factible ya que en la definición del problema se restringen los valores de las variables a aquellas posibles para la tecnología de fabricación a utilizar. La interfaz permite visualizar los resultados para que el diseñador pueda valorarlos de manera más intuitiva e intervenir y dirigir la búsqueda con mayor criterio. Los óptimos de Pareto se visualizan con mayor opacidad. Es posible la interacción del diseñador en el proceso iterativo de búsqueda de soluciones óptimas dirigiendo la búsqueda desde la visualización de los resultados geométricos, las variables y objetivos.

2.2. PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN JERARQUIZADA

La Figura 7 muestra la programación gráfica de la metodología con más de un solver de optimización (Figura 4.B). En esta nueva metodología se optimiza primero la geometría generada por la optimización topológica y después se optimizan el relleno y la superficie de contorno de manera independiente. Frente a la estructura mostrada en la Figura 5 con la letra D, puede observarse cómo se incluyen tres programaciones gráficas de optimización multi-objetivo en vez de una. En cada caso se seleccionará del óp-

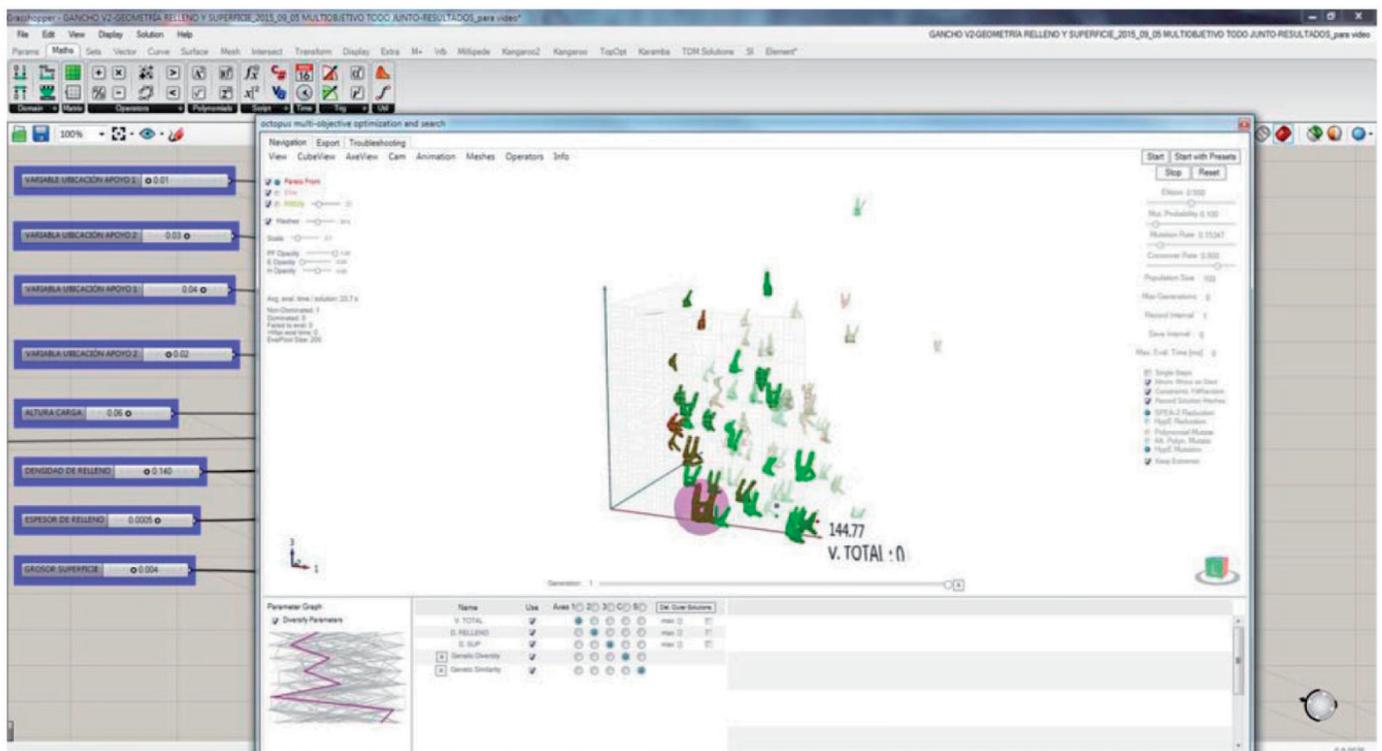


Fig. 6: Optimización multi-objetivo con Octopus en Grasshopper. Visualización de la población generada y óptimos de Pareto destacados con opacidad del 100%

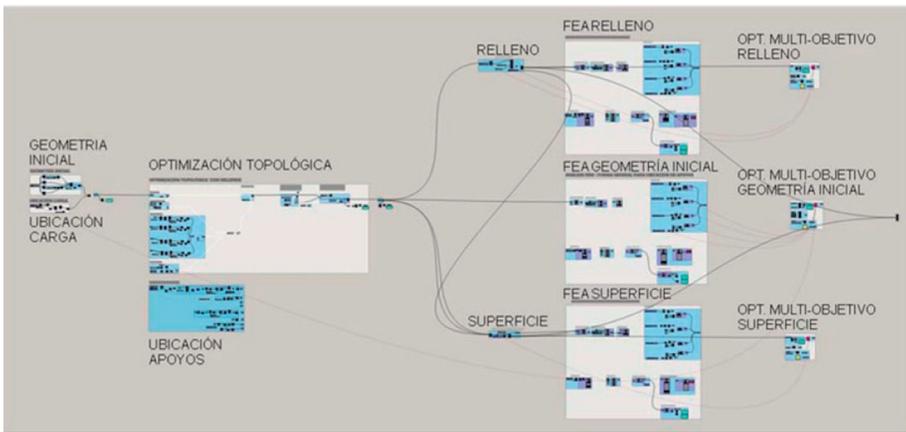


Fig. 7: Estructura de la programación visual en Grasshopper de la metodología con más de un solver de optimización

timo de Pareto más adecuado. Esta independización aporta mayor detalle y control del resultado. Además, la decisión de qué parte optimizar primero introduce cierto nivel de jerarquía, al fijarse esas variables en la solución y continuar el proceso a partir de esa primera acotación.

En cada una de estas optimizaciones se definen variables y objetivos diferentes. En la optimización multi-objetivo de la pieza resultante de la optimización topológica se introducen como variables la altura de carga y la ubicación de los apoyos, y como objetivos minimizar el volumen de la pieza y los desplazamientos máximos. Después se selecciona la solución que se considera más óptima desde la búsqueda mediante algoritmos genéticos del solver de Octopus. En esta búsqueda cada iteración optimiza topológicamente usando valores aleatorios para producir diferentes resultados y comprobar si responden o no a un óptimo de Pareto.

Seleccionada esta solución preliminar se divide el problema en dos independientes: la búsqueda de la solución más óptima para el relleno y para la superficie. En esta búsqueda ya no interviene la optimización topológica y consiste en una optimización de la forma que responde los objetivos definidos desde el FEA. Para el relleno las variables introducidas desde Grasshopper al solver Octopus son la densidad y el espesor, y los objetivos minimizar el volumen del relleno y los desplazamientos máximos.

poner el problema en subproblemas de optimización, siempre con una estructura jerarquizada muy clara.

Tanto para la programación con un *solver* de optimización como para la que incluye varios, una vez realizada la optimización dirigida por el diseñador y realizada la selección de la solución más óptima, se unen las geometrías de la superficie y del relleno para exportarlas como una única pieza al software laminador y simular su fabricación. Esta simulación devuelve datos como el coste de la pieza en material y el tiempo de fabricación, resultados comentados en el siguiente apartado. La Figura 8 muestra pruebas de impresión realizadas a partir de los resultados de optimización únicamente de la geometría general de la pieza.

Las metodologías propuestas permiten considerar simultáneamente durante el proceso de optimización distintas alternativas



Fig. 8: Pieza optimizada impresa. A la izquierda sin soportes y completada al 85%. A la derecha con los soportes y completada al 50%

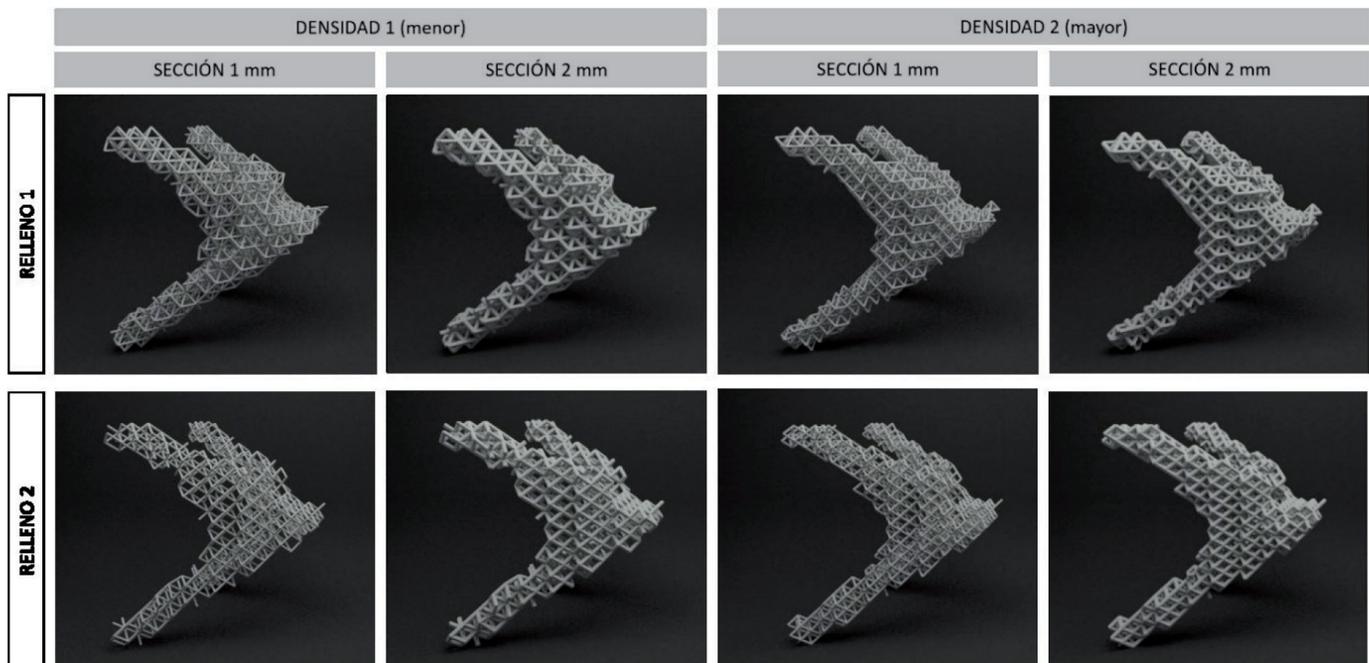


Fig. 9: Alternativas consideradas según el tipo de relleno, su densidad y la sección de sus nervios

OPCIONES DE CALIDAD (media)			
Altura de capa	0.2		
	Grosor de capa inicial	0.3	
	Ancho de capa inicial	100%	
Grosor de superficie	1		
Habilitar retracción	Sí		
	Velocidad	50mm/s	
	Distancia	4.5mm	
OPCIONES DE RELLENO			
Grosor de parte superior e inferior	0.6		
Densidad de relleno	50%		
VELOCIDAD Y TEMPERATURA			
Velocidad de impresión	50mm/s		
	Velocidad de movimiento sin extrusión	150mm/s	
	Velocidad de capa inferior	20mm/s	
	Otras velocidades	Desde velocidad de impresión	
Temperatura de impresión	230°C		
Temperatura de cama	110°C		
Ventilador	Activado		
	Tiempo mínimo de capa finalizada	5seg	
SOPORTES			
Tipo	En cama y en pieza		
Adhesión tipo	Raft		
FILAMENTO			
Diámetro	1,75mm		
Flujo	100%		

Tabla I: Parámetros de configuración de la impresión 3D desde Cura 15.04

tanto de relleno como de superficie, incorporando ambos escenarios a la programación visual. Considerar como puntos de partida de sus respectivos procesos de optimización distintas geometrías para la estructura de relleno, o distintos tipos de superficie para la envolvente (por ejemplo continua o discontinua), se consideran escenarios de mucho interés. En la Figura 9 se muestran ocho variantes de relleno a partir de dos geometrías, para las cuáles se definen dos densidades de relleno diferentes y dos espesores de la sección de la estructura. Para cada alternativa se realizó un FEA, los resultados obtenidos se exponen en el apartado siguiente.

3. RESULTADOS

En primer lugar se comentan los resultados obtenidos para la impresión de las piezas obtenidas mediante ambas programaciones, esto es con un único solver o con más de uno. El estudio se realiza para una impresora 3D Makerbot Replicator 2X y siendo el ABS el material de impresión. En la Tabla I se muestran los pará-

	METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN CON UN SOLO SOLVER	METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN JERARQUIZADA CON MÁS DE UN SOLVER
Volumen de pieza inicial	6E-04 m3	6E-04 m3
Volumen de pieza con optimización topológica	8E-05 m3	9E-05 m3
Volumen de relleno	4E-06 m3	6E-06 m3
Densidad de relleno	5,26%	6,29%
Espesor de contorno	0,001 m	0,001 m
Volumen de pieza con optimización multi-objetivo	6E-06 m3	6E-06 m3
Desplazamiento máximo	4E-04 m	2E-04 m
Tiempo de fabricación	231 min	255 min
Material	34 gr	36 gr
Precio material	2,03 €	2,15 €

Tabla II: Comparación de las piezas obtenidas con ambas metodologías

de material empleado, aspecto directamente relacionado con el coste. Por su parte, el tiempo de fabricación tendrá mayor o menor repercusión según el entorno productivo concreto y el impacto que, en su caso, pueda tener en la planificación de otros procesos.

4. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

A partir de los resultados obtenidos y de la observación de la Tabla II, se puede apreciar que ambas metodologías se muestran eficaces para el caso de estudio analizado. En función de los objetivos y de la complejidad del problema es recomendable uno u otro método. Para procesos de optimización con pocas variables la programación con un único solver de optimización es adecuada. Observando la Tabla II se aprecia que para este caso los resultados son, de hecho mejores. No obstante, la optimización topológica y multi-objetivo se está efectuando para las distintas partes en conjunto, por tanto sin independizarlas, restando control sobre los desplazamientos máximos. Si se considerasen muchas variables este planteamiento plantaría problemas. La búsqueda aleatoria de variables que se realiza durante el proceso puede requerir tiempos elevados de computación. También la visualización por parte

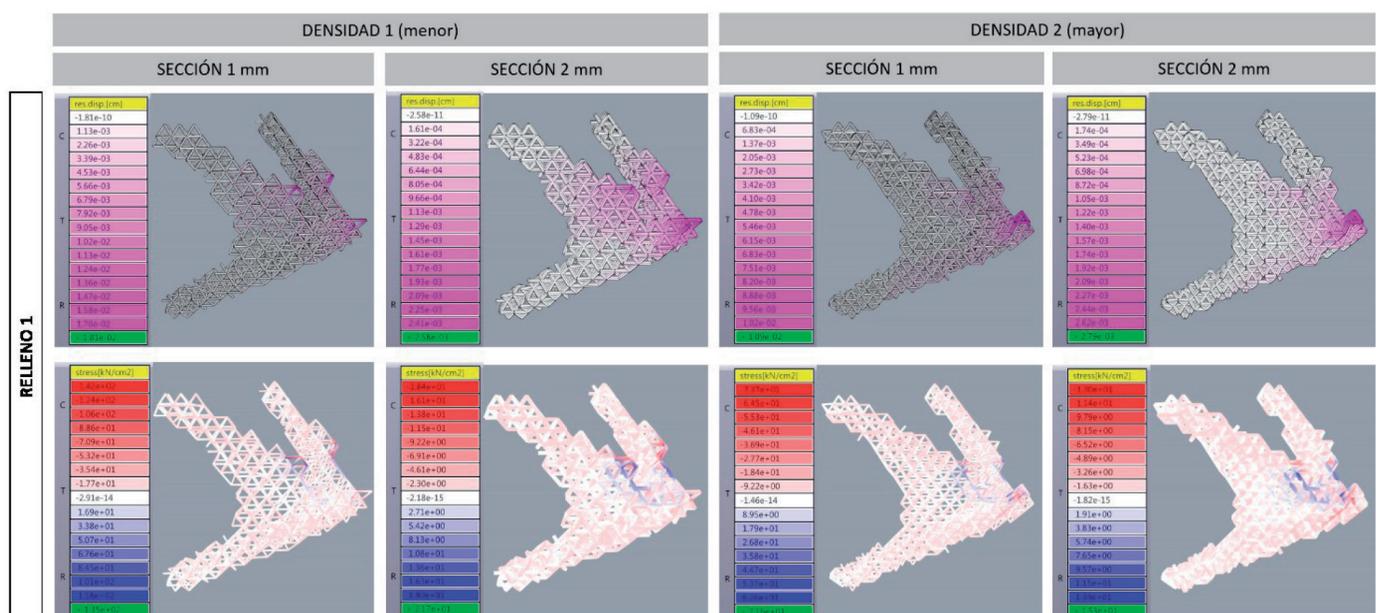


Fig. 10: Análisis mecánico de las alternativas contempladas para el tipo de relleno 1

			NORMAL (N)		CORTANTE (N)	MOMENTO (Nm)	MATERIAL (sin soportes) gr	TIEMPO DE IMPRESIÓN (sin soportes) min	
			COMPRESION MAX	TRACCIÓN MAX	MAX	MAX			
RELLENO 1	DENSIDAD 1 (menor)	SECCIÓN 1mm	-102,41	238,27	51,00	0,14	7	174	2h 54mins
		SECCIÓN 2mm	-79,35	215,38	47,70	0,15	26	295	4h 55mins
	DENSIDAD 2 (mayor)	SECCIÓN 1mm	-84,20	222,89	22,87	0,07	10	220	3h 40mins
		SECCIÓN 2mm	-59,86	177,91	29,84	0,10	33	366	6h 6mins
RELLENO 2	DENSIDAD 1 (menor)	SECCIÓN 1mm	-63,26	377,69	88,56	0,26	5	139	2h 19mins
		SECCIÓN 2mm	-42,44	338,91	903,56	0,27	16	214	3h 34mins
	DENSIDAD 2 (mayor)	SECCIÓN 1mm	-90,27	313,52	49,05	0,12	6	171	2h 51mins
		SECCIÓN 2mm	-57,80	259,60	51,20	0,13	22	269	4h 29mins

Tabla III: Comparación de resultados para las alternativas analizadas

del diseñador se vería comprometida. La interfaz de visualización distingue, por color y por escala objetivos, en tres ejes, y no sería operativo visualizar resultados para más de tres objetivos.

La metodología de optimización jerarquizada con más de un solver encuentra su aplicación tanto si se quiere abordar un problema de optimización complejo como si se desea tener mayor grado de control sobre las partes de la pieza, o sobre las variables y objetivos definidos en la programación.

En lo relativo al estudio de las alternativas de relleno consideradas en el trabajo e ilustradas en la Figura 10 y en la Tabla III, dado que en todos los casos las piezas son capaces de responder a las condiciones de trabajo establecidas desde un punto de vista mecánico, primarían los aspectos económicos vinculados a los tiempos de impresión y a la cantidad de material empleado. Las diferencias de comportamiento que puede suponer la utilización de distintas geometrías de relleno, distintas densidades, o distintos espesores en sus nervios, plantea una línea de trabajo de continuación y ampliación de este trabajo en la que los autores ya están actualmente trabajando. Se trata de incorporar la optimización del relleno y de la envolvente de manera no homogénea a lo largo de la pieza. Esto permitiría adaptar estas partes a las necesidades locales existentes a lo largo de la pieza, del mismo modo que se hace con la optimización de la forma general.

El campo de estudio de este trabajo, tanto la optimización como la fabricación aditiva, y mucho más su convergencia, representan áreas que actualmente están en efervescencia, tanto en el ámbito de la investigación como en el ámbito productivo. Las metodologías propuestas en este trabajo logran establecer a través de la programación visual con Grasshopper un flujo de trabajo continuo en la optimización de piezas diseñadas para su impresión 3D. Los resultados alcanzados se consideran de interés, tanto desde el punto de vista académico [11] como desde el punto de vista del diseño y la producción.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Tofail SAM, Koumoulos EP, Bandyopadhyay A et al. "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities". *Materials Today*. July 2017. Vol 00(00). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>

[2] Wong KV, Hernández A. "A review of additive manufacturing", *ISRN Mechanical Engineering*. June 2012. Vol. 2012, article ID 208760. DOI: <http://dx.doi.org/10.5402/2012/208760>

[3] Tomlin M, Meyer J. "Topology optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) aerospace part". En: *Proceedings of the 7th Altair CAE Technology Conference*, 2011.

[4] Gang-Won Jang, Kyung Joo Kim, Yoon Young Kim. "Integrated topology and shape optimization software for compliant MEMS mechanism design", *Advances in Engineering Software*. January 2008. Vol. 39(1), p 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.12.003>

[5] Muguruza A, Bonada J, Gómez A et al. "Development of a multimaterial additive manufacturing process for electric devices". En: *Proceedings of the 7th Manufacturing Engineering Society International Congress (Vigo 2017)*.

[6] Varela-Gandía FJ, Sánchez-Reche A, Martínez-García A. "Innovative functionalised monofilaments for 3D printing using fused deposition modelling for the toy industry". En: *Proceedings of the 7th Manufacturing Engineering Society International Congress (Vigo 2017)*.

[7] D'Aveni R. "The 3D printing revolution", *Harvard Business Review*. May 2015. Vol. 93 (5), p. 40-48, 2015.

[8] Minguella-Canela J, Muguruza A, Lumbierres DR et al. "Comparison of production strategies and degree of postponement when incorporating additive manufacturing to product supply chains". En: *Proceedings of the 7th Manufacturing Engineering Society International Congress (Vigo 2017)*.

[9] Gardan N. "Knowledge management for topological optimization integration in additive manufacturing". *International Journal of Manufacturing Engineering*. February 2014. Vol. 2014, article ID 356256. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/356256>.

[10] Zhang Y, Bernard A, Kumar R et al. "Evaluating the design for additive manufacturing: a process planning perspective". *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 21, p 144-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.179>

[11] García-Domínguez A, Claver J, Camacho M et al. "Valuation of strategies for the incorporation of 3D printing contents in the teaching of subjects linked to productive processes from different approaches". *Materials Science Forum*. August 2017. Vol. 903, p 76-83. DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF.903.76](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.903.76)

[12] Thomas H, Zhou M, Schramm U. "Issues of commercial optimization software development". *Structural and Multidisciplinary Optimization*. March 2002. Vol. 23(2), p 97-110. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-002-0170-x>

[13] García-Domínguez A, Claver J, Sebastián M. "Study for the selection of design software for 3D printing topological optimization". En: *Proceedings of the 7th Manufacturing Engineering Society International Congress (Vigo 2017)*.

[14] Zegard T, Paulino GH. "Bridging topology optimization and additive manufacturing". *Structural and Multidisciplinary Optimization*. January 2016. Vol. 53(1), p 175-192. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1274-4>

[15] Brackett D, Ashcroft I, Hague R. "Topology optimization for additive manufacturing". En: *Proceedings of the 24th Solid Freeform Fabrication Symposium (Austin, 2013)*.

[16] Langelaar M. "Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing". *Additive Manufacturing*. October 2016. Vol. 12, part A, p 60-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.010>

[17] Sundararajan VG. "Topology optimization for additive manufacturing of customized meso-structures using homogenization and parametric smoothing functions". Supervisor: Seepersad CC, Crawford RH. University of Texas at Austin, Department of Mechanical Engineering, 2010.

[18] García-Domínguez A, Claver J, Sebastián MA. "Methodology for the optimization of pieces for additive manufacturing by 3D printing". En: *Proceedings of the 7th Manufacturing Engineering Society International Congress (Vigo 2017)*.

[19] Olason A, Tidman D. "Methodology for topology and shape optimization in the design process". Master's Thesis. Chalmers University of Technology at Göteborg, Department of Applied Mechanics, 2010.

[20] Kim J. "An efficient approach for solving mesh optimization problems using Newton's Method". *Mathematical Problems in Engineering*. October 2014. Vol. 2014, article ID 273732. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/273732>

[21] Zhang W, Yang W, Zhou J et al. "Structural topology optimization through explicit boundary evolution". *Journal of Applied Mechanics*. November 2016. Vol 84(1). DOI: [10.1115/1.4027609](https://doi.org/10.1115/1.4027609)

[22] Sheffer A, Ungor A. "Efficient adaptive meshing of parametric models". *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. October 2001. Vol.1(4), p 366- 375. DOI: [10.1115/1.1429640](https://doi.org/10.1115/1.1429640)

[23] Park H, Lee KH. "A new parametric control method for freeform mesh models". *Journal of Advanced Manufacturing Technology*. December 2005. Vol. 27 (3), p 313-320. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2196-2>

[24] Chang K-H. *Design theory and methods using CAD/CAE*. 1ª edición. Academic Press, 2014. 516p. ISBN: 978-0-12-398512-5

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado como parte de las actividades investigadoras de la Tesis Doctoral de la primera autora, la cual se está realizando en la Escuela Internacional de Doctorado de la UNED y de la que los otros dos autores son co-directores. Por ello, los autores quieren agradecer el apoyo dado por dicha entidad.