

El departamento de Construcción y Fabricación de la ETS Ingenieros industriales nos acerca una de sus líneas de investigación: La fabricación aditiva

## Sinergias y oportunidades en torno a la fabricación aditiva

AMABEL GARCÍA-DOMÍNGUEZ, MIGUEL A. SEBASTIÁN, JUAN CLAVER.

---

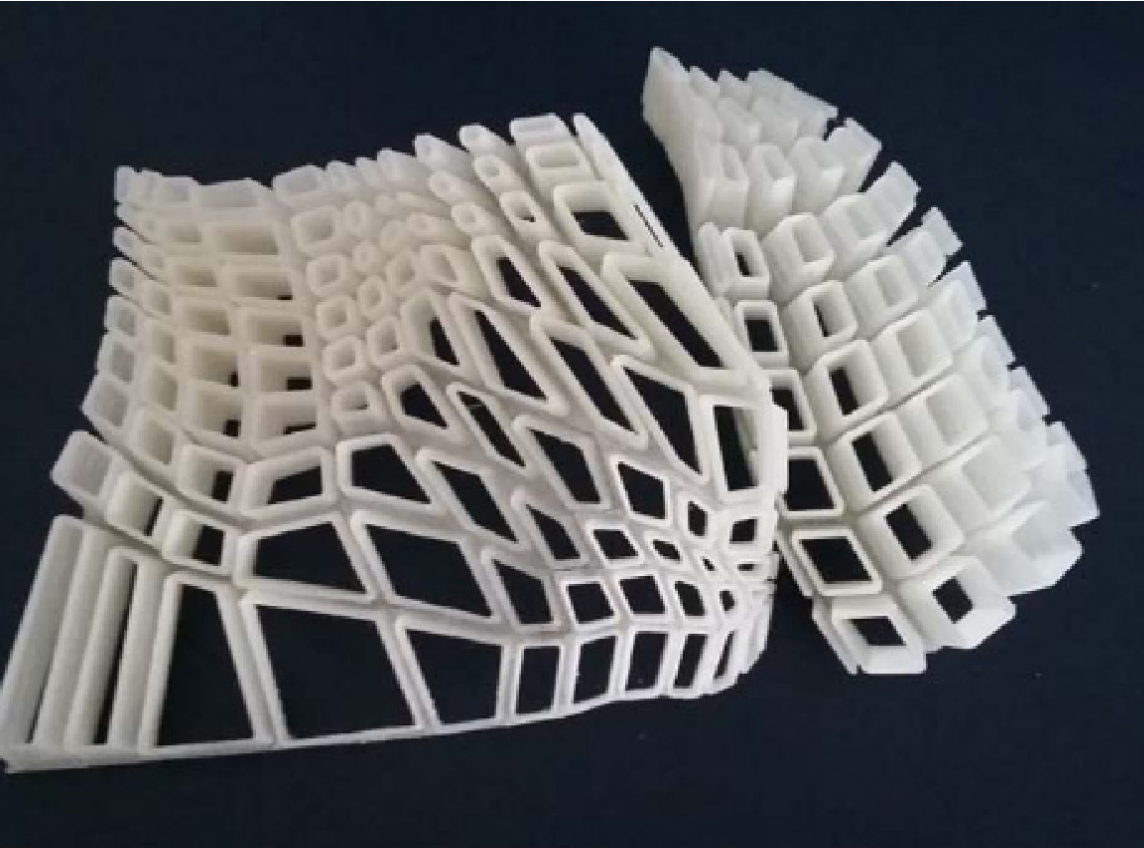
Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación ETS Ingenieros Industriales- UNED

La fabricación aditiva supone un cambio de paradigma respecto de las tecnologías de fabricación tradicional al producir las piezas a partir de un modelo tridimensional virtual mediante sucesivas capas de material hasta la materialización de la misma. Este modo de producción ofrece múltiples ventajas y oportunidades frente a los procesos tradicionales como por ejemplo la obtención de las piezas finales en un único proceso, ofreciendo una respuesta al consumidor más ágil y flexible, o la posibilidad de fabricar piezas complejas, con una gran libertad geométrica en el proceso de diseño.

**L**a fabricación aditiva, en sus inicios limitada a la producción de prototipos para la validación de diseños, ha adquirido un papel con cada vez más protagonismo en la fabricación de productos. Un fenómeno que no supone la obsolescencia de las tecnologías tradicionales, que siguen siendo rentables en grandes producciones o geometrías convencionales, sino la incorporación de las tecnologías de fabricación aditiva al ámbito industrial con un abanico de nuevas posibilidades de diseños, soluciones y productos.

Aparecen incluso nuevos modelos productivos y de consumo, algo fuertemente potenciado por la gran permeabilidad y aceptación que las tecnologías aditivas han tenido en la sociedad. Un fenómeno potenciado por la creciente presencia de los equipos de sobremesa de fabricación aditiva, habitualmente referidos como impresoras 3D, contextos en los que un mismo individuo puede desempeñar el rol de diseñador, fabricante y consumidor.

Con equipos informáticos cada vez más potentes y con la posibilidad de conec-



*Izquierda: Estructura ergonómica generada mediante diseño computacional y producida por fabricación aditiva mediante el modelado por deposición fundida.*

cuentran en la fabricación aditiva la tecnología idónea para su producción ya que no incrementa de forma sustancial el coste frente a piezas estandarizadas.

Con todo ello, se responde eficazmente al reto de las estrategias de customización en masa que consiste en conseguir una agilidad suficiente en el proceso de diseño para dar respuesta a las condiciones particulares del producto sin que suponga un sobrecoste para ser competitivos con productos estandarizados. Productos con criterios ergonómicos, como pueden ser los del sector sanitario o de moda, encuentran gran utilidad en estrategias y tecnologías de este tipo.

En este sentido, se ha explorado e investigado en un primer lugar, la adaptabilidad de los diseños a diferentes geometrías ergonómicas en productos íntimamente vinculados a la geometría del cuerpo y su materialización con tecnologías aditivas, independientemente de su complejidad.

Por otro lado, se han venido desarrollando trabajos que investigan en estrategias de customización en masa con diseños generados computacionalmente desde la programación de algoritmos. En el caso de productos con requisitos ergonómicos, además, se han incorporado modelos tridimensionales escaneados como variables del diseño. Se

tarlos con procesos de fabricación aditiva, se rompe la secuencia lineal de proyección, representación y fabricación. Esta ruptura permite nuevas estrategias de diseño donde las formas no están preconcebidas, sino que surgen como respuesta al planteamiento de un problema y se resuelven por algoritmos.

En este sentido, el diseño computacional adquiere un papel fundamental. El diseñador ya no dibuja las geometrías preconcebidas con herramientas de diseño asistido por ordenador, sino que programa los diseños estableciendo relaciones entre variables, constantes y funciones de tal manera que la forma final de la pieza se genera dependiendo de los valores asignados a las variables. De este modo, una única secuencia de programación permite la obtención de múltiples solu-

ciones en función de la introducción de valores específicos para un caso concreto, como pueden ser aquellos asociados a requisitos formales, técnicos o ergonómicos, entre otros.

Esta nueva forma de diseñar mediante la programación de algoritmos para la generación de geometrías que se produzcan por tecnologías aditivas abre distintas líneas de trabajo e investigación en el ámbito del diseño de productos y de su fabricación.

Por un lado, supone la rentabilidad de productos desde estrategias de customización en masa. Permite la generación de forma automática de multitud de soluciones digitales listas para ser fabricadas con tecnologías aditivas, independientemente de la complejidad. Soluciones que en-



*Férula diseñada computacionalmente con criterios ergonómicos a partir del modelo tridimensional virtual generado con el escaneado de una mano, en la que además se lleva a cabo una personalización en el diseño mediante el co-diseño por parte del usuario de los módulos que la componen.*

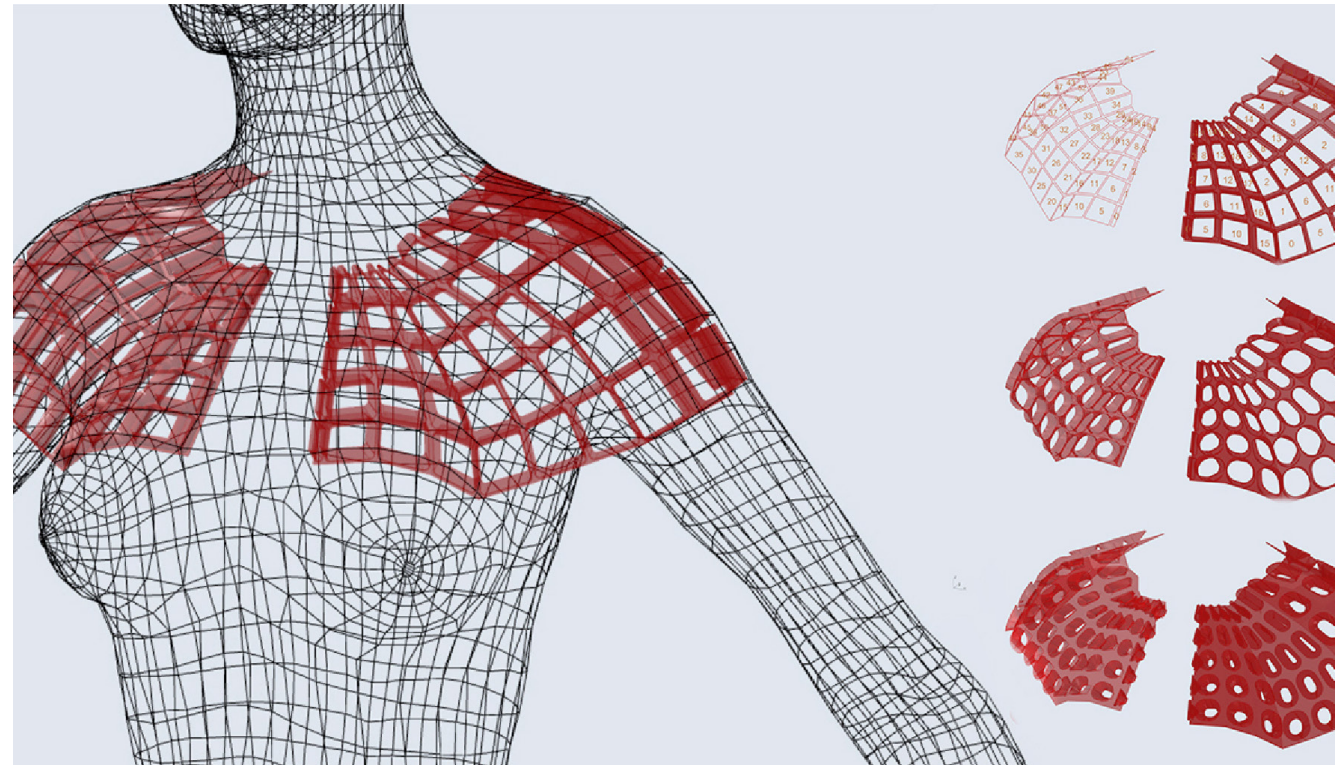
*Férula producida para el taller impartido en XVII Encuentro de Diseño y Cultura Digital organizado por Medialab-Prado, la Escuela de Diseño de Madrid Artediez, la Escuela Superior de Diseño de Madrid y con la colaboración del Museo Nacional de Artes Decorativas en 2017.*

ha podido aplicar y comprobar en estudios de casos reales con fines comerciales de la firma de diseño “Amabel García” las estrategias y producciones con tecnologías aditivas propuestas en los trabajos de investigación desarrollados.

Otra de las grandes líneas de investigación que surge del empleo de la fabricación aditiva en la producción de piezas finales y que es una de las características de diseño más apreciada en muchos sectores es el aligeramiento de las piezas. La posibilidad de aligerar de forma significativa eliminando material en el interior de la geometría es inviable con tecnologías tradicionales, sin embargo, la fabricación mediante sucesivas capas de material permite ubicar el material donde se considera necesario y dejar huecos donde no.

En la actualidad, en muchos sectores como el aeronáutico, sanitario, industrial, moda o arquitectura, entre otros, el aligeramiento de las piezas es uno de los grandes focos de investigación y abarca diferentes escalas, puede estar basado en su volumetría, en la geometría de su relleno o a una escala más reducida en el diseño del propio material.

La optimización topológica es un método efectivo para el aligeramiento de la pieza, donde la geometría se determina a partir de un contorno y unas condiciones de carga predefinidos. Un proceso computacional iterativo toma los resultados de



un análisis de elementos finitos y realiza la distribución del material en el interior del contorno dado para que únicamente haya material donde sea necesario, resultando una pieza notablemente aligerada sin detrimento de su rigidez estructural. Cada vez más softwares de diseño asistido por ordenador incorporan ya en sus funcionalidades algoritmos de optimización topológica.

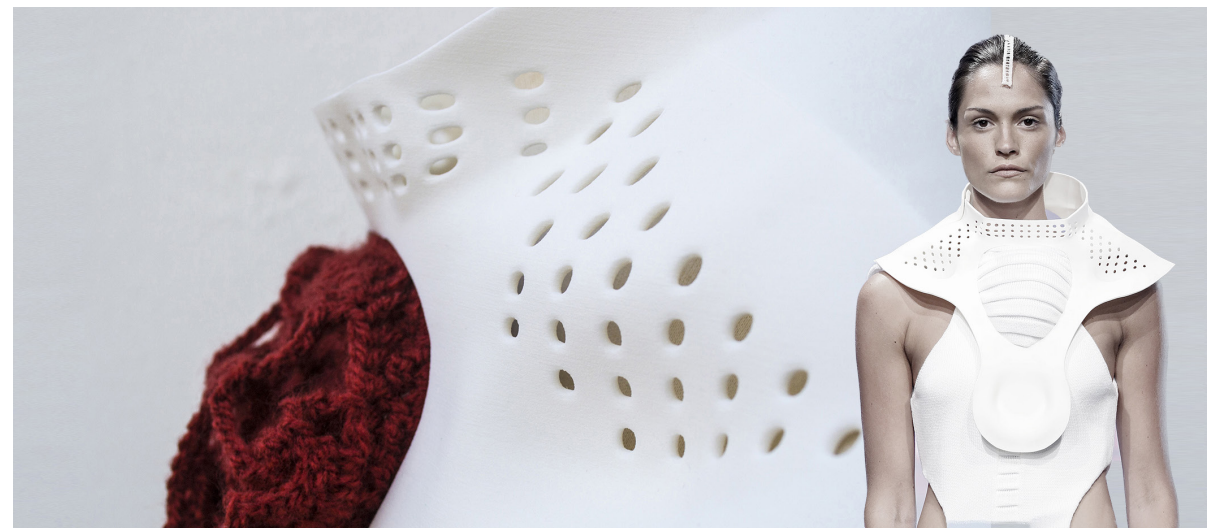
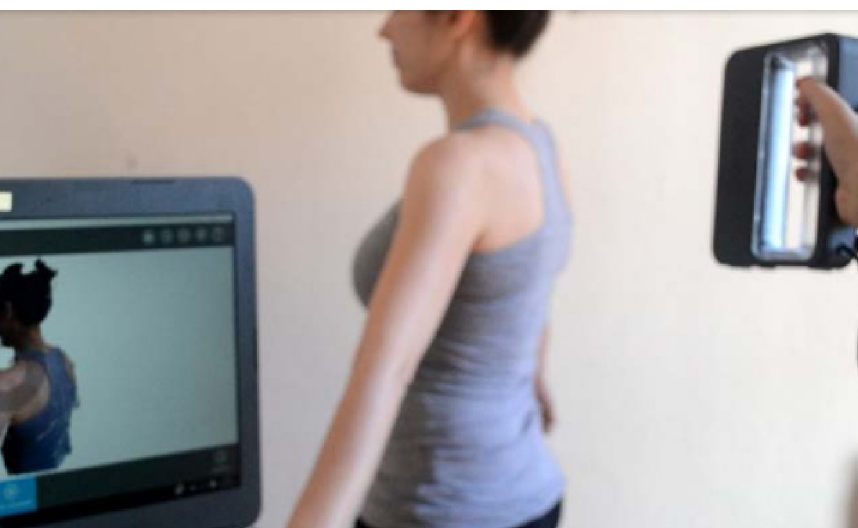
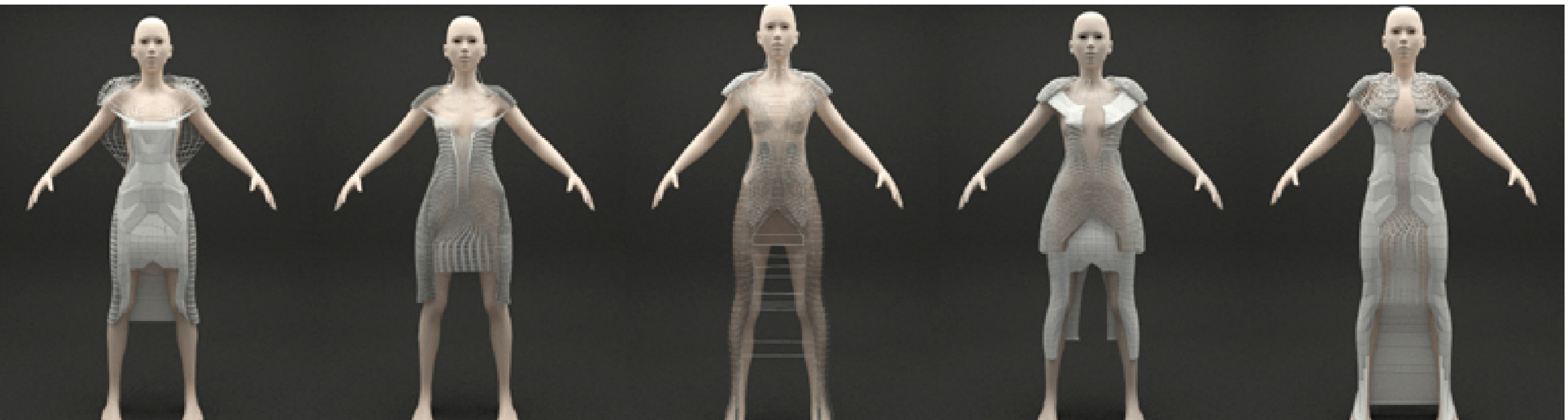
Otra manera eficaz de aligeramiento consiste en la eliminación de material en el interior de la pieza. La fabricación aditiva introduce nuevos conceptos en el diseño de las geometrías, su contorno y su relleno, que pueden diseñarse de forma independiente para producir en un único proceso el conjunto de ambos en una única pieza. Estos conceptos, junto con la libertad geométrica que permiten las

tecnologías aditivas, permiten aligerar las piezas desde su relleno o su contorno sin afectar su geometría general. Existen multitud de estrategias de diseño de rellenos o contornos aligerados, desde patrones predefinidos a generados a partir de algoritmos matemáticos de optimización estructural. Es posible optimizar aún más y de forma más eficaz el aligeramiento de los rellenos de las piezas si éstos se generan mediante diseño computacional y se introduce en la programación análisis de elementos finitos. De esta forma se puede establecer la densidad del relleno en función de las condiciones de carga de la pieza y ahorrar aún más material.

Otra posibilidad de la convergencia entre la fabricación aditiva y el diseño computacional consiste en el desarrollo

*Diferentes soluciones formales generadas a partir de distintas variables introducidas en un modelo paramétrico computacional. Trabajo titulado “Mass customasing through designs parametrisation”, expuesto en .el XXII Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos en 2018*

de metodologías de diseño que aprovechen las oportunidades de las tecnologías aditivas y los recursos informáticos. En el trabajo desarrollado en la tesis doctoral defendida por Amabel García, titulada “Metodología para la optimización de piezas producidas por fabricación aditiva en estrategias de mass customization”, desarrollada en la Escuela Internacional de Doctorado de la UNED (EIDUNED), dentro del Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales de la UNED y dirigida por los doctores Miguel A. Sebastián Pérez y Juan Claver Gil, y expuesto en el artículo titulado “Integration of additive manufacturing, parametric design, and optimization of parts obtained by Fused Deposition Modeling (FDM). A methodological approach” publicado en Polymers en 2020, se desarrolla una metodología de optimización para piezas fabricadas que consiste en la integración de diferentes algoritmos de diseño, simulación y optimización en una única secuencia de programación. En ella se vincula el diseño computacional bajo estrategias de customización en masa, la optimización topológica, el diseño generativo del relleno y del contorno de la pieza resultante con su respectiva optimización estructural y, a su vez, una optimización multi-objetivo con los objetivos que se



*Arriba: Algunos trabajos de la firma Amabel Garcia con diseños personalizados desde la adaptación a la morfología del cuerpo con el escaneado tridimensional y la integración del codiseño del usuario en el desarrollo computacional del diseño*

*Izquierda: Pieza desarrollada para la exposición de los proyectos finalistas de Bilbao International Art and Fashion en 2014. Producción realizada en colaboración con el Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UNED.*

consideren oportunos en función de la tecnología aditiva a emplear y sin restricciones de variables.

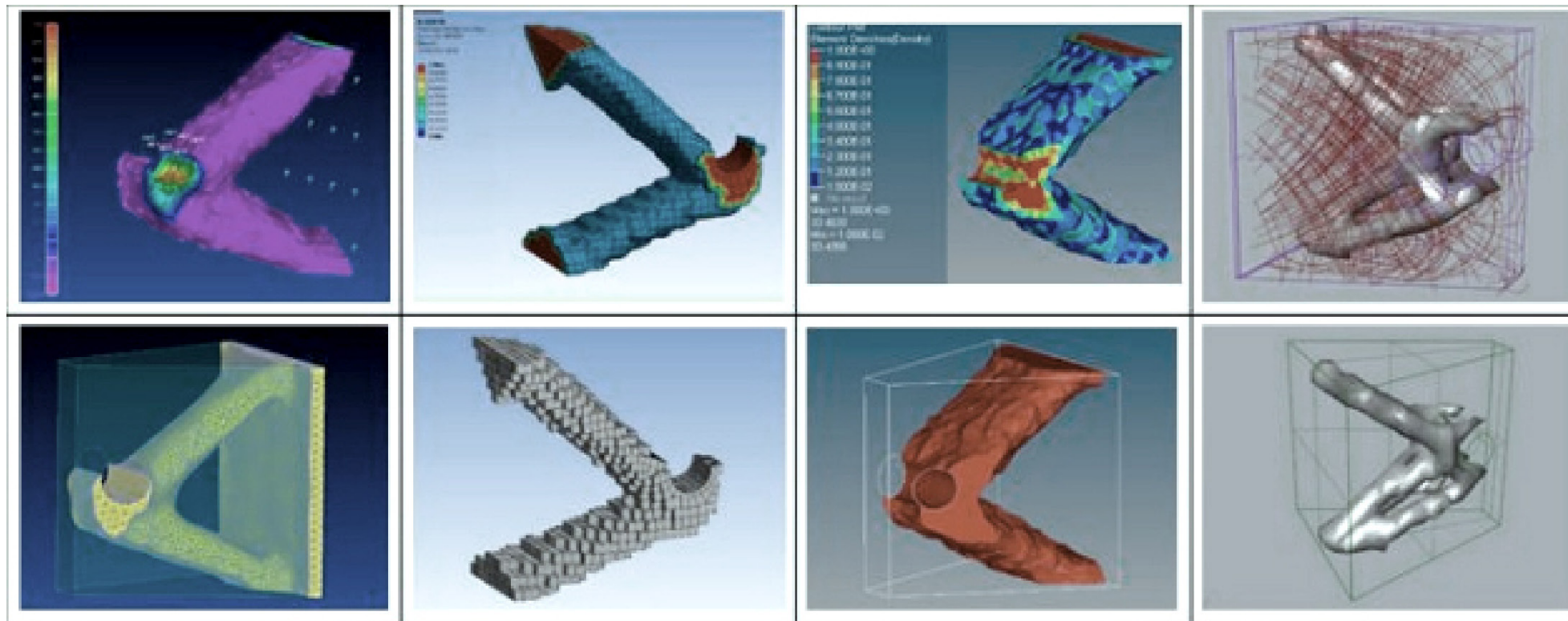
La metodología se desarrolla con Grasshopper, un lenguaje de programación visual embebido en el software de modela-

do tridimensional Rhinoceros. Se trata de un lenguaje de programación flexible en el que no es necesario preestablecer las variables, sino que cualquier valor numérico dentro de un dominio de valores factibles puede tomarse como variable para un determinado problema de diseño o de

optimización. Otra ventaja de Grasshopper como lenguaje de programación para el desarrollo de la metodología de optimización es la posibilidad de establecer un flujo continuo de información en todas las fases de la misma, desde el diseño de partida hasta la optimización

final de la pieza. Frente a otras metodologías en las que la optimización topológica, al estar basada en geometrías discretizadas y no paramétricas, supone una ruptura en el flujo de trabajo con optimizaciones basadas en variables.

Derecha: En el trabajo realizado en el Trabajo Fin de Máster y expuesto en el artículo titulado "Aproximación metodológica a la optimización multiobjetivo de piezas obtenidas por impresión 3D" desarrollado para el XXI Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos en 2017 se recogen los detectados y se comparan los más adecuados para incluir en una metodología con un flujo de trabajo más complejo donde puedan optimizarse más objetivos con un mayor número de criterios y más diversos



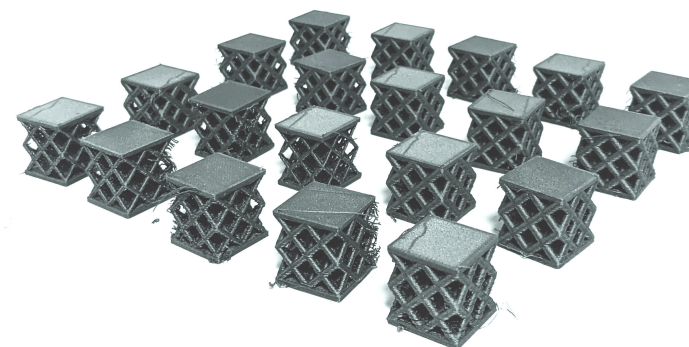
En la metodología desarrollada es posible establecer un flujo de trabajo continuo entre el diseño de partida paramétrico, la optimización topológica basada en modelos discretizados y optimizaciones basadas en modelos paramétricos indistintamente, incluso puede establecer flujos de información no lineales que en un proceso final de optimización tomen como variables valores iniciales del diseño de partida. Este flujo de trabajo continuo, donde no es necesario que el diseñador intervenga para rediseñar los modelos tras una optimización topológica, permite agilizar el proceso de diseño y asegurar la eficacia de su aplicación en mercados de productos en estrategias de customización en masa.

La metodología se puede aplicar a diseños de diferentes escalas, materiales y tecnologías de fabricación aditiva por lo que es de interés en sectores tan diferentes como el industrial, sanitario, moda, arquitectura, etc.

En el estudio de caso desarrollado para la tesis y expuesta en el artículo titulado "Optimization methodology for additive manufacturing of customized parts by

Fused Deposition Modeling (FDM). Application to a Shoe Heel, se aplicó la metodología descrita al diseño ergonómico de un tacón de un calzado urbano a partir del estudio de la pisada y del escaneado del pie del usuario.

Este tipo de calzado es el que tiene un uso más cotidiano y un diseño inadecuado que no considere las condiciones particulares del individuo puede derivar en problemas de salud. Por otro lado, es importante el aligeramiento del calzado más aún en estas partes estructurales que generalmente son macizas. La aplicación de la metodología al estudio de caso aligera de manera eficaz una parte funcional del calzado bajo unas condiciones de carga específica así como con unas condiciones ergonómicas concretas.



Izquierda: Primeras aproximaciones a la optimización de los rellenos de las piezas se expusieron en el trabajo titulado "Infill optimization for pieces obtained by 3D printing" presentado al congreso 8th Manufacturing Engineering Society International Conference en 2019

Abajo: Secuencia de programación de la metodología de optimización de piezas producidas por fabricación aditiva en estrategias de mass customization desarrollada con un flujo de datos continuo generada en Grasshopper



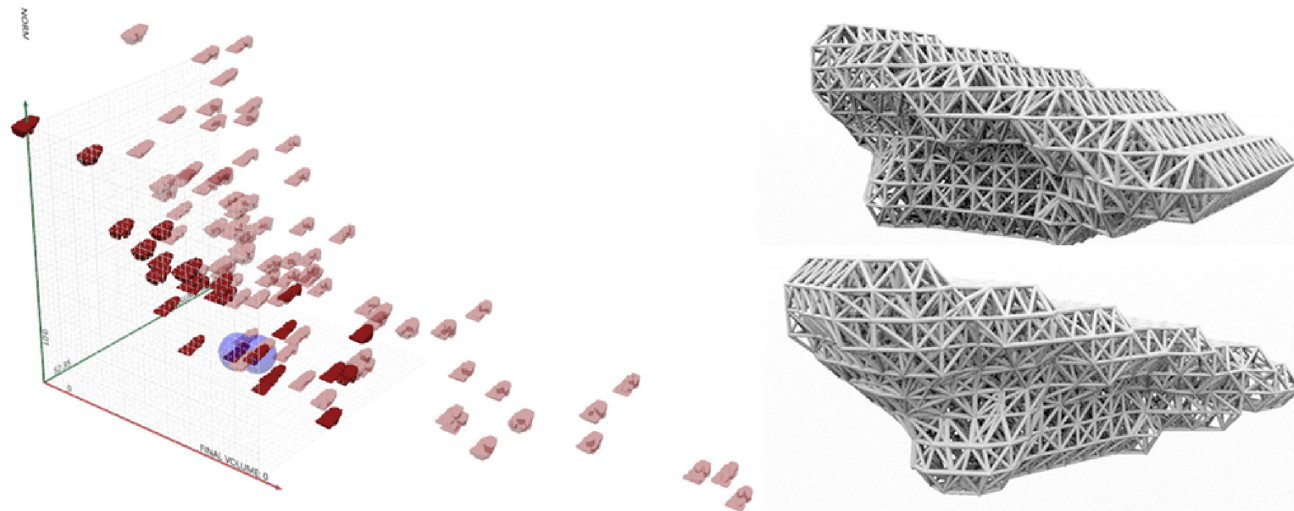
Se agiliza además la respuesta de diseño al introducir condiciones ergonómicas y de carga de diferentes individuos, y comprobar la eficacia de la programación desarrollada ya que el diseño se genera sin tener que intervenir el diseñador más que en la fase final de la selección según criterios estéticos del mejor diseño optimizado.

Se exploran las oportunidades y sinergias de las tecnologías aditivas, así como estrategias de diseño asociadas desde el

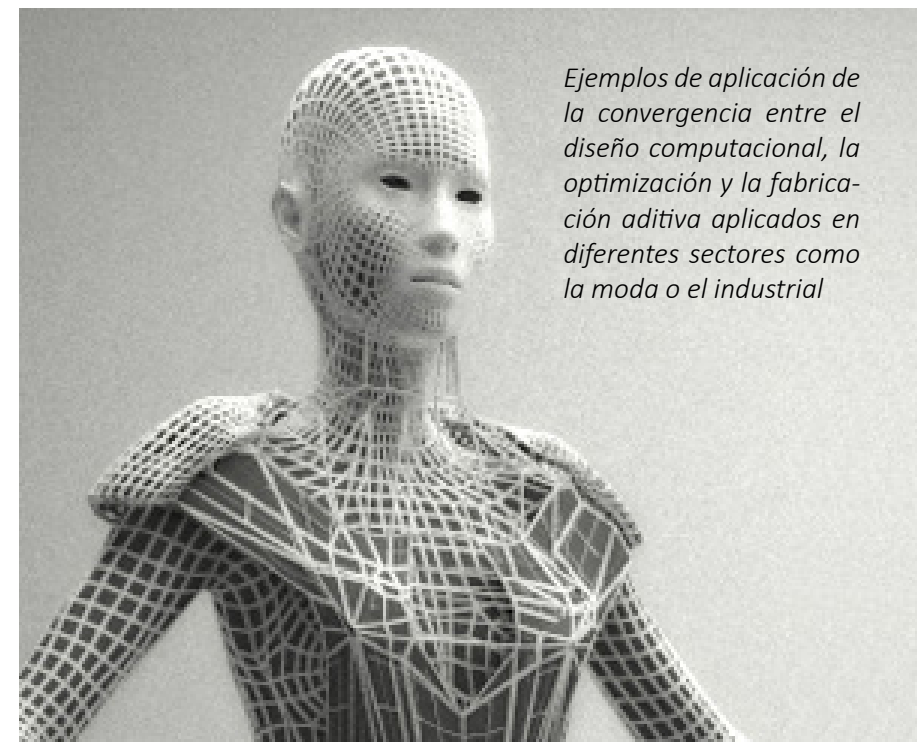
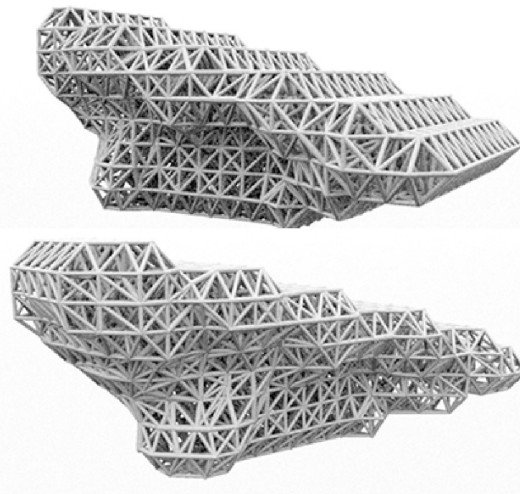
Equipo de Investigación en Fabricación Aditiva pertenece al grupo de investigación en Producción Industrial e Ingeniería de Fabricación (IPME) compuesto por profesores del Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación, de la ETSII UNED y suponen una oportunidad para la concepción de nuevos productos y nuevas formas de producción. En este sentido, es importante la transmisión del conocimiento y de los trabajos e investigaciones realizadas en los diferentes programas de grado y posgrado. Ejemplos de

este esfuerzo divulgativo son las iniciativas puestas en marcha desde el Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UNED con la inclusión de asignaturas específicas tanto en el Máster Universitario de Ingeniería Avanzada de Fabricación como en el próximo Máster Universitario en Investigación en Industria Conectada. Se desarrolla además una oferta específica de cursos de formación permanente iniciada con el curso de “Experto Universitario en Aplicaciones, desafíos y oportunidades de las tecnologías de fabricación aditiva” y el curso de “Fabricación aditiva y FabLab para enseñanza secundaria obligatoria, bachillerato y formación profesio-

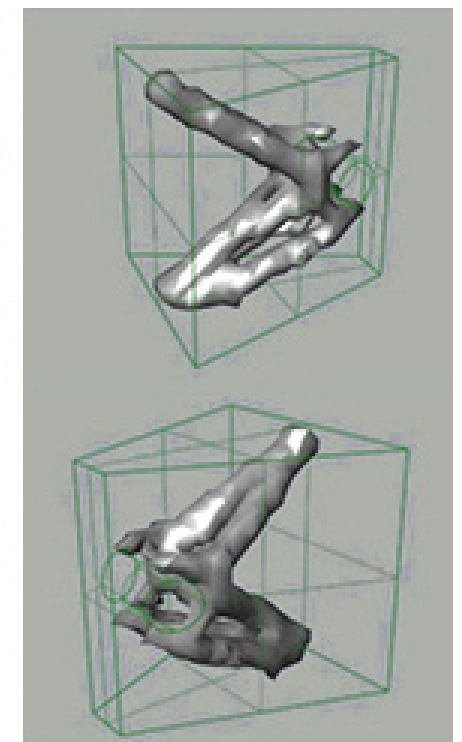
nal”, y que el año pasado culminó con el Máster del Programa de Postgrado y Desarrollo Profesional con Estructura Modular de “Fabricación Aditiva” en colaboración con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el cual afrontará su segunda edición este curso. Se desarrollan además acciones como “La Primera Jornada sobre Estrategias y Aplicaciones de Fabricación Aditiva en PYMES: Una Apuesta por la Reindustrialización y el Desarrollo Local” en colaboración con la Cátedra de Turismo Sostenible y Desarrollo Local y el CSIC, en el Centro Asociado a la UNED en Ponferrada. Por último, con la intención de acercar más aún estas tecnologías a los estudiantes, se está configurando un FabLab que esté a su disposición.



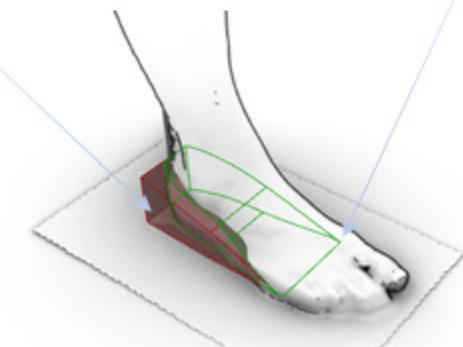
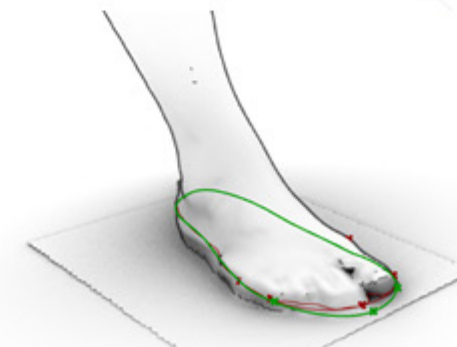
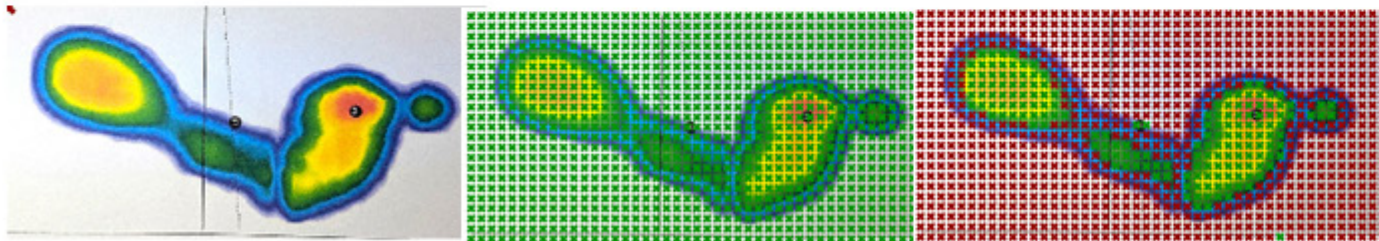
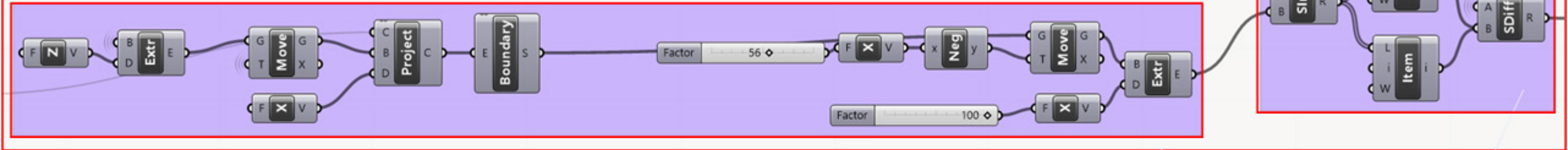
Representación gráfica de las soluciones del problema de optimización multiobjetivo para el estudio de caso de la metodología de optimización de piezas producidas por fabricación aditiva en estrategias de mass customization con una ampliación a una de las soluciones óptimas de la frontera de Pareto.



Ejemplos de aplicación de la convergencia entre el diseño computacional, la optimización y la fabricación aditiva aplicados en diferentes sectores como la moda o el industrial



Secuencia de programación de una parte de la metodología de optimización de piezas producidas por fabricación aditiva en estrategias de mass customization aplicada al diseño de un tacón de calzado urbano, con la representación gráfica del resultado obtenido en el fragmento de la programación desarrollada.



**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

A. García-Domínguez, J. Claver, and M. A. Sebastián, "Methodology for the optimization of work pieces for additive manufacturing by 3D printing," *Procedia Manuf.*, vol. 13, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.158.

A. García-Domínguez, J. Claver, and M. A. Sebastián, "Infill optimization for pieces obtained by 3D printing," *Procedia Manufacturing*, vol. 41, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.07.046

A. García-Domínguez. "Metodología para la optimización de piezas producidas por fabricación aditiva en estrategias de mass customization." Doctorado en Tec-

nologías Industriales, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Diciembre 2019. Disponible online: <http://e-spacio.uned.es/fez/view/tesisuned:ED-Pg-TecnInd-Agarciad>

A. García-Domínguez, J. Claver, and M. A. Sebasti, "Considerations on the Applicability of Test Methods for Mechanical Characterization of Materials Manufactured by FDM" *Materials* 13(1):28, 2020. doi: 10.3390/ma13010028

A. García-Domínguez, J. Claver, and M. A. Sebastián, "Analysis of General and Specific Standardization Developments in Additive Manufacturing From a Materials and Technological Approach"

*IEEE Access* 8, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3005021

A. García-Domínguez, J. Claver, and M. A. Sebastián, "Optimization Methodology for Additive Manufacturing of Customized Parts by Fused Deposition Modeling ( FDM ). Application to a Shoe Heel," *Polymers* 12(9), 2020. doi: 10.3390/polym12092119

A. García-Domínguez, J. Claver, and M. A. Sebasti, "Integration of Additive Manufacturing, Parametric Design, and Optimization of Parts Obtained by Fused Deposition Modeling (FDM)" *Polymers* 12(9), 2020. doi: 10.3390/polym12091993

Máster en Fabricación Aditiva. Programa de Postgrado y Desarrollo Profesional con Estructura Modular. [https://formacionpermanente.uned.es/tp\\_actividad/idactividad/12052](https://formacionpermanente.uned.es/tp_actividad/idactividad/12052)

Equipo de Investigación en Fabricación Aditiva. Grupo de investigación en Producción Industrial e Ingeniería de Fabricación (IPME). Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación. UNED. <http://blogs.uned.es/fabricacionaditiva-additivemanufacturing/>