

## OBTENCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESTRUCTURAS DE IMPRESIÓN DE MÍNIMO TIEMPO PARA LA FABRICACIÓN ADITIVA

### OBTENTION OF MINIMUM TIME PRINTING STRUCTURES DISTRIBUTION FOR ADDITIVE MANUFACTURING

**Martín M. Guardiola<sup>a</sup>, Constanza Navarta Perassolo<sup>a</sup>, Marcos Vicentin<sup>a</sup>, Augusto A. Romero Onco<sup>b</sup> y Sebastián M. Giusti<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Departamento de Ingeniería Mecánica - GIDMA. Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba. Maestro López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria C.P.A. X5016ZAA. Córdoba Capital. Córdoba. Argentina. guardiola.martinm@gmail.com; constanzanavarta@gmail.com; vicentin.marcos1@gmail.com*

<sup>b</sup>*Departamento de Ingeniería Civil - GIDMA. Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba. Maestro López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria C.P.A. X5016ZAA. Córdoba Capital. Córdoba. Argentina. aromero@frc.utn.edu.ar; sgiusti@frc.utn.edu.ar*

**Palabras clave:** Impresión 3D, Optimización topológica, Mínimo tiempo de impresión.

**Resumen.** La impresión 3D por deposición fundida (FDM) es una técnica de manufactura aditiva en donde un objeto es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Existe una relación inversa entre el tiempo de impresión (principal factor influyente en el costo de producción) y la rigidez final de la pieza (una de las funciones principales de una estructura). En base a esto, este trabajo propone una estrategia para determinar la óptima distribución de las estructuras de impresión que permita obtener la mayor rigidez de la pieza posible con el menor tiempo de impresión. Para obtener dicha distribución se utiliza un algoritmo de optimización topológica multimaterial, en donde la representación geométrica del dominio se realiza mediante funciones level-set guiadas por la derivada topológica del problema. Se presentan los conceptos fundamentales del método con el desarrollo de la derivada topológica del tiempo de impresión, ejemplos numéricos de aplicación e implementación del método en casos reales de FDM.

**Keywords:** 3D Printing, Topology Optimization, Minimum printing time.

**Abstract.** Fused Deposition Modeling (FDM) is an additive manufacturing technique in which an object is created by depositing material layer by layer. There is an inverse relation between the printing time (main influencing factor of the production cost) and the stiffness of the final part (one of the main functions of a structure). Based on this, the present work proposes a strategy to determine the optimal distribution of the printing structures that allows obtaining the highest possible stiffness of the part with the shortest printing time. To get this distribution a multiple material topology optimization algorithm is used, where the geometric description of the material domain is performed using level-set functions guided by the topological derivative of the problem. Fundamental concepts of the method, with the development of the topological derivative of the printing time are presented. Also, several numerical application examples and implementation of the method in real cases of FDM are shown.

## 1 INTRODUCCIÓN

La impresión 3D presenta un importante avance dentro de las tecnologías de fabricación aditiva. En este proceso un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Esta tecnología supone grandes ventajas con respecto a las técnicas de fabricación sustractivas, ya que, al realizarse por aporte de material permite generar piezas de geometrías complejas con facilidad, no requiere herramental, permite realizar prototipos y series pequeñas con un tiempo de lanzamiento menor y presentan la posibilidad de aligerar las piezas variando sus características de impresión, logrando así, un ahorro de material.

Dentro de este conjunto de tecnologías se encuentra la manufactura por deposición fundida (FDM), que consiste en la deposición del material fundido a través de un cabezal de extrusión de temperatura controlada. Las instrucciones de impresión son generadas en programas (denominados Slicers) que permiten modificar diversos parámetros, entre ellos: velocidad de impresión, altura de capa, patrón de relleno, temperatura de extrusión, etc.

A pesar de las evidentes ventajas de esta tecnología, aún se encuentra en estudio la influencia de los parámetros de impresión nombrados sobre las propiedades de la pieza final, ver [Alvarez C, Lagos C, & Aizpun \(2016\)](#); [Cantrell, y otros, \(2017\)](#); [Gonabadi, Chen, Yadav, & Bull \(2022\)](#); [Somireddy & Czkansky \(2020\)](#). Por otro lado, es de conocimiento general que uno de los principales inconvenientes de este proceso de manufactura es el elevado tiempo de impresión y su relación inversamente proporcional con la rigidez de la pieza. Esto es, se puede imprimir piezas en menos tiempo utilizando rellenos de impresión menos densos, pero con el costo de obtener estructuras menos rígidas. Una posible solución a este inconveniente sería utilizar patrones de impresión densos solamente en aquellos lugares donde sea estrictamente necesario, e imprimir el resto de la pieza con patrones de impresión de baja densidad.

En este trabajo se propone abordar el problema de obtención de la distribución de estructuras de impresión de un mismo material base que permitan fabricar piezas con la mayor rigidez y con el menor tiempo de impresión posible. Este problema será abordado mediante optimización topológica multimaterial basado en derivada topológica. Se considerará a cada patrón de impresión como un material homogéneo y anisótropo, cuyas propiedades constitutivas se obtendrán mediante técnicas de homogeneización asintótica. Para la representación de los dominios materiales se utilizarán funciones level-set, y su evolución dentro del algoritmo de optimización será guiado mediante la derivada topológica asociada al problema en cuestión.

En la [sección 2](#) se describen brevemente algunos conceptos teóricos asociados al modelo elástico empleado, se establece la función de costo a minimizar y se obtiene la derivada topológica asociada a dicho funcional.

El funcionamiento del algoritmo se expone en la [sección 3](#) y en la [sección 4](#) se incluyen ejemplos académicos para verificar el funcionamiento del código y ejemplos de aplicación con propiedades reales.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Modelo elástico lineal Multimaterial

Tal como ya se ha mencionado, en este trabajo se denomina a la conjunción de un determinado patrón de impresión, un material base y una densidad de relleno como estructura de impresión. Cada estructura de impresión puede considerarse, desde el punto de vista macroscópico, como un material homogéneo anisótropo, cuyas propiedades constitutivas macroscópicas dependen del material base, el patrón de impresión y la densidad de relleno. Estas propiedades se pueden obtener mediante homogeneización asintótica ([Arabnejad & Pasini, 2013](#)).

Para la representación geométrica de los dominios materiales se utiliza el método de level-

set multimaterial (MM-LS) (Wang, Luo, Kang, & Zhang, 2015), en donde

$$\boldsymbol{\Psi}(x) = [\psi_1(x), \psi_2(x), \dots, \psi_n(x)]^T, \quad (1)$$

es el vector de funciones level-set y

$$\boldsymbol{\chi} = [\chi_n^0, \chi_n^1, \dots, \chi_n^n]^T, \quad (2)$$

es el vector de funciones características, donde  $\chi_n^i$  es la función característica asociada al material  $i$ .

La forma débil de la ecuación diferencial que gobierna el problema de elasticidad en tensión plana en un dominio  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$  con frontera  $\partial\Omega$  es

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}(u) \cdot \nabla^s \boldsymbol{\eta} d\Omega = \int_{\Gamma_N} \bar{t} \cdot \boldsymbol{\eta} d\Gamma \quad \forall \boldsymbol{\eta} \in V \quad \text{con} \quad \boldsymbol{\sigma}(u) = \mathbb{C}(\boldsymbol{\chi}) \nabla^s u, \quad (3)$$

donde  $V$  es un espacio de funciones apropiado,  $u$  el campo de desplazamientos y  $\bar{t}$  una carga de superficie aplicada en  $\Gamma_N \subset \partial\Omega$ . El campo de desplazamiento  $u$  se encuentra prescrito en una región  $\Gamma_D \subset \partial\Omega$ .

El tensor elástico efectivo en un punto  $x \in \bar{\Omega}$  se puede expresar mediante los tensores elásticos de cada material y el vector de las funciones características mediante la siguiente expresión:

$$\mathbb{C}(\boldsymbol{\chi}) = \sum_{i=0}^n \chi_n^i \mathbb{C}_i, \quad (4)$$

siendo  $\mathbb{C}_i$  el tensor de cada material (o estructura de impresión).

## 2.2 Problema de optimización

Se busca minimizar un funcional de forma  $\mathcal{L}(u, \boldsymbol{\chi})$ , de la forma

$$\left\{ \min_x \mathcal{L}(u, \boldsymbol{\chi}) = \mathcal{J}(u, \boldsymbol{\chi}) + C(\boldsymbol{\chi}), \quad (5) \right.$$

donde  $\mathcal{J}(u, \boldsymbol{\chi})$  es el término representativo de la energía de deformación

$$\mathcal{J}(u, \boldsymbol{\chi}) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}(u) \cdot \nabla^s u, \quad (6)$$

y  $C(\boldsymbol{\chi})$  es la función de penalización de las restricciones de tiempo. Este término incluye el factor lambda ( $\lambda$ ) de penalización lineal, el cual permite aumentar o disminuir la influencia del tiempo de impresión en el proceso de optimización. A mayor factor de penalización, mayor importancia toma el tiempo en el proceso de optimización y menor es el tiempo de impresión final de la pieza.

Para poder medir el tiempo de impresión de una pieza compuesta por múltiples regiones materiales se asume que el tiempo de impresión de una zona material será proporcional al volumen de dicha región, esto es

$$T_i(\boldsymbol{\chi}) = t_i |\Omega_i|, \quad (7)$$

donde  $|\Omega_i|$  es el volumen de la región  $i$ ,  $t_i$  el tiempo de impresión por unidad de volumen del material  $i$  y, por lo tanto, el tiempo de impresión total será

$$T(\boldsymbol{\chi}) = \sum_{i=1}^n t_i |\Omega_i|, \quad (8)$$

Por último, el término de penalización queda

$$C(\boldsymbol{\chi}) = \lambda T(\boldsymbol{\chi}). \quad (9)$$

## 2.3 Derivada topológica

Siendo  $f(\chi)$  una función definida sobre un dominio  $\Omega$ , la derivada topológica  $\mathcal{T}_D f(\chi)$  mide la sensibilidad de  $f(\chi)$  cuando se introduce una perturbación dentro del dominio  $\Omega$ .

De manera concreta, se define como derivada topológica al siguiente cociente

$$\mathcal{T}_D^{i \rightarrow j} f(\chi) = \lim_{|\Omega_B| \rightarrow 0} \frac{f(\chi_{|\Omega_B|}) - f(\chi)}{|\Omega_B|}. \quad (10)$$

donde  $|\Omega_B|$  es el tamaño de una pequeña perturbación de material  $j$  caracterizada por un disco circular de radio  $\varepsilon$ , con propiedades constitutivas diferentes al material base  $i$ .

Entonces, la derivada topológica de  $\mathcal{L}(u, \chi)$  para el problema planteado se expresa como

$$\mathcal{T}_D^{i \rightarrow j} \mathcal{L}(u, \chi) = \mathcal{T}_D^{i \rightarrow j} \mathcal{J}(u, \chi) + \mathcal{T}_D^{i \rightarrow j} C(\chi). \quad (11)$$

Según [Giusti, Ferrer, & Oliver \(2016\)](#), la derivada topológica de la energía de deformación para materiales anisotrópicos en un punto  $\hat{x} \in \Omega$  puede ser calculada como

$$\mathcal{T}_D^{i \rightarrow j} \mathcal{J}(\hat{x}) = \mathbb{P}^{i \rightarrow j} \sigma(u(\hat{x})) \cdot \nabla^s u(\hat{x}) \quad \forall \hat{x} \in \Omega \quad (12)$$

Donde  $\mathbb{P}$  puede ser reconocido como el tensor Pólya-Szegö de polarización y está dado explícitamente por:

$$\mathbb{P}^{i \rightarrow j} = \frac{1}{2} \Delta \mathbb{C}^i(\hat{x}) [(\mathbb{C}^i(\hat{x}))^{-1} + (\mathbb{C}^j(\hat{x}))^{-1} \mathbb{T}], \quad (13)$$

donde  $\mathbb{T}$  es un tensor de cuarto orden cuya expresión analítica se encuentra en [Giusti, Ferrer, & Oliver \(2016\)](#).

La Ec. (13) es general y mide la sensibilidad de la energía potencial total cuando dos materiales con tensores constitutivos completamente diferentes son considerados. Además, el tensor de polarización  $\mathbb{P}^{i \rightarrow j}$  depende únicamente del tensor constitutivo de los materiales  $i$  y  $j$ .

La función de tiempo total de impresión se puede descomponer de la siguiente manera

$$T = \sum_{i=1}^n t_i |\Omega_i| = \sum_{i=1}^n t_i \int_{\Omega_i} d\Omega = \sum_{i=1}^n \int_{\Omega_i} t_i d\Omega. \quad (14)$$

En base a la definición de derivada topológica e introduciendo (14) en (10) se obtiene

$$\mathcal{T}_D^{i \rightarrow j} T(\chi) = \lim_{|\Omega_B| \rightarrow 0} \frac{T(\chi_{|\Omega_B|}) - T(\chi)}{|\Omega_B|} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\int_{\Omega \setminus B} t_i d\Omega + \int_B t_j d\Omega - \int_{\Omega} t_i d\Omega}{\pi \varepsilon^2}, \quad (15)$$

y por lo tanto, es fácil comprobar que

$$\mathcal{T}_D^{i \rightarrow j} T(\chi) = t_j - t_i. \quad (16)$$

En conclusión, la derivada topológica de la función penalizada es

$$\mathcal{T}_D^{i \rightarrow j} C(\chi) = \lambda(t_j - t_i). \quad (17)$$

Por último, cabe aclarar que las derivadas topológicas se combinan, utilizando el vector de funciones características, componiendo un vector de gradiente topológico. Este vector es el que finalmente se utiliza para guiar el proceso de optimización y los detalles están expresados en [Romero Onco, A., & Giusti, S. \(2020\)](#).

## 3 ALGORITMO

En esta sección se presenta el diagrama de flujo representativo del funcionamiento del algoritmo de optimización junto con las variables de entrada y las salidas obtenidas. (Véase la [Figura 1](#)).

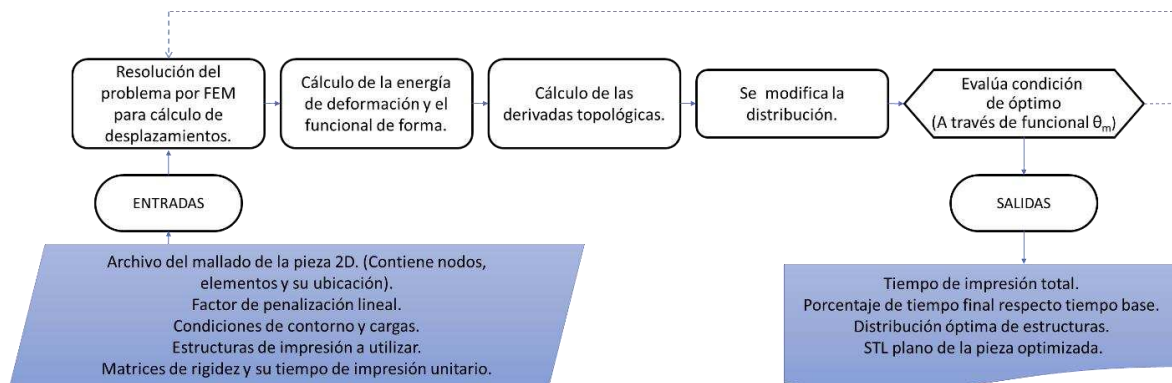


Figura 1: Diagrama de flujo

Cabe aclarar que la primera iteración del proceso se realiza con la totalidad del dominio ocupada por el material más rígido, considerado material base y en cada ciclo se modifica la distribución de los materiales en el dominio hasta alcanzar la condición de optimalidad.

La topología final obtenida se post-procesa en archivos STL que permiten representar los dominios de cada material, con los que luego de darle la altura deseada en un programa de diseño se pueden exportar a un slicer para proceder a la impresión de la pieza.

## 4 RESULTADOS

Se establecen dos ejemplos con propiedades de estructuras de impresión extraídas de Arabnejad & Pasini (2013), utilizando como material base PLA. Las propiedades (homogeneizadas) de dichas estructuras se resumen en las matrices expuestas en la Tabla 1 y Tabla 2 que representan sus tensores elásticos expresados mediante notación de Voigt.

Para determinar los tiempos unitarios de las estructuras de impresión se utiliza un slicer (en este caso Simplify3D), donde se simula la impresión de un cubo de 100mm de lado sin contornos sólidos y con los parámetros de impresión de la estructura. Se obtiene así el tiempo total y se calcula el tiempo de impresión de una unidad de volumen (s/mm<sup>3</sup>).

Cabe aclarar que en los ejemplos aquí planteados se realizó una fijación de los bordes del dominio. Los mismos se asemejan a material sólido para simular los contornos de las piezas impresas en 3D que permiten mantener la forma exterior de las mismas. Los bordes sólidos fijados se corresponden a dos filamentos de impresión.

### 4.1 Viga empotrada con materiales de impresión 3D

El objetivo de este ejemplo es analizar los resultados obtenidos comparando los tiempos de impresión teóricos y los prácticos simulados en el slicer. Además, se analizará la influencia que tiene la interfaz entre las regiones materiales sobre el tiempo de impresión.

El dominio de proyecto para este ejemplo consta de una región rectangular empotrada en su cara izquierda de dimensiones 2x1, con una fuerza puntual unitaria vertical hacia abajo aplicada según la Figura 2.



Figura 2: Esquema de ejemplo a optimizar.

Se obtuvo la distribución óptima de dos, tres; y cuatro materiales (estructuras de impresión) considerando un factor de penalización  $\lambda = 2$ . Las características de los materiales empleados se detallan en la [Tabla 1](#).

	Patrón	Densidad de relleno	Matriz constitutiva [GPa]	Tiempo unitario [ $s/mm^3$ ]	Color
<b>Material 1</b>	Cuadrado	80%	$\begin{bmatrix} 1.9634 & 0.5659 & 0 \\ 0.5659 & 1.9634 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4136 \end{bmatrix}$	0.4474	Azul
<b>Material 2</b>	Honeycomb	50%	$\begin{bmatrix} 0.8636 & 0.5213 & 0 \\ 0.5213 & 0.8636 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1937 \end{bmatrix}$	0.2563	Rojo
<b>Material 3</b>	Triangular	30%	$\begin{bmatrix} 0.4158 & 0.1730 & 0 \\ 0.1730 & 0.4158 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1262 \end{bmatrix}$	0.1751	Verde
<b>Material 4</b>	Triangular	20%	$\begin{bmatrix} 0.2601 & 0.1077 & 0 \\ 0.1077 & 0.2601 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0805 \end{bmatrix}$	0.1219	Amarillo

Tabla 1: Características de los materiales utilizados en la optimización

Para la configuración del slicer se redimensiona la pieza a 140x70x7mm y considerando un extrusor con diámetro de boquilla de 0,25mm, altura de capa 0,1mm y velocidad de impresión 60mm/s. Además, se utilizaron 2 líneas de perímetro en el material exterior.

Las topologías obtenidas en el algoritmo de optimización propuesto se expresan mediante el agrupamiento de elementos finitos que conformarán las regiones materiales, y es por ello que las interfaces serán, en general, poco suaves tal como se observa en la [Figura 3](#). El suavizado de estos bordes permite disminuir dicha irregularidad.

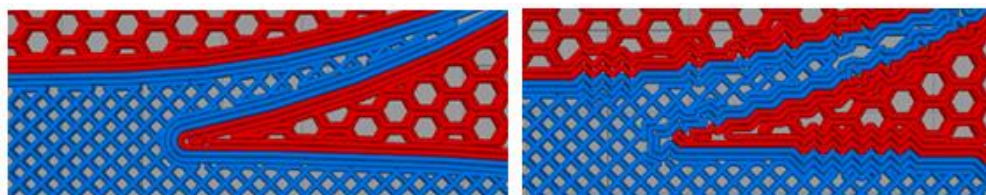


Figura 3: Detalle simulación en slicer. Izq. Con suavizado – Der. Sin suavizado.

En la [Figura 4](#), [Figura 5](#) y [Figura 6](#) se presentan los resultados obtenidos de la distribución de estructuras optimizada (salida del programa) [Izq] y su resultado al realizar el suavizado de bordes con la representación gráfica de cada estructura (simulado en Slicer) [Der].

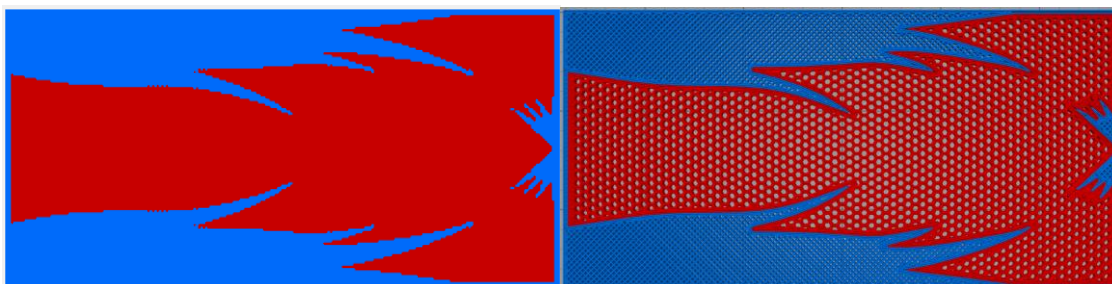


Figura 4: Estructura optimizada con 2 Materiales (materiales 1 y 2) – a. Salida del programa. b. Simulación en Slicer con suavizado de bordes.

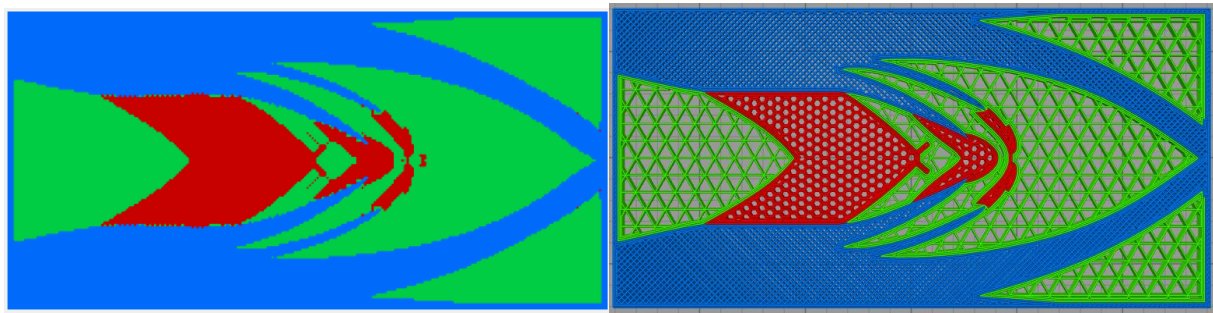


Figura 5: Estructura optimizada con 3 Materiales (materiales 1, 2 y 3) – a. Salida del programa. b. Simulación en Slicer con suavizado de bordes.

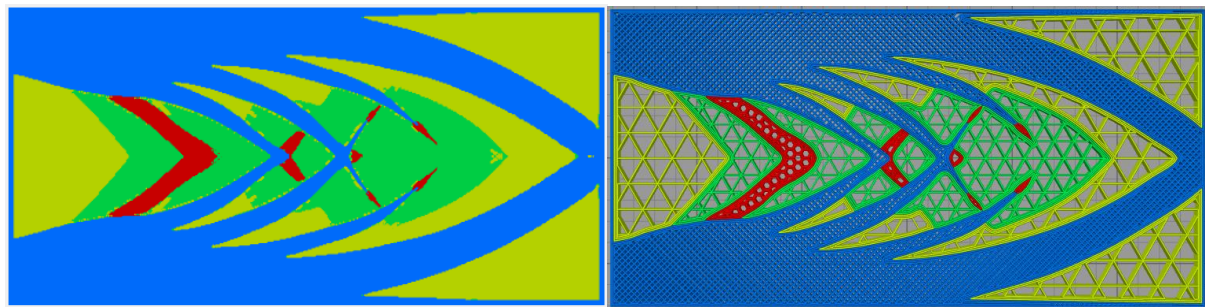


Figura 6: Estructura optimizada con 4 Materiales (materiales 1, 2, 3 y 4) – a. Salida del programa. b. Simulación en Slicer con suavizado de bordes.

Se realizó la comparación entre los tiempos de impresión obtenidos del programa; los obtenidos con los archivos STL de salida simulando la impresión en el slicer; y los obtenidos mediante esta misma simulación, pero con un suavizado de los bordes de los STL. Los resultados de los tiempos de impresión obtenidos se resumen en la [Figura 7](#).

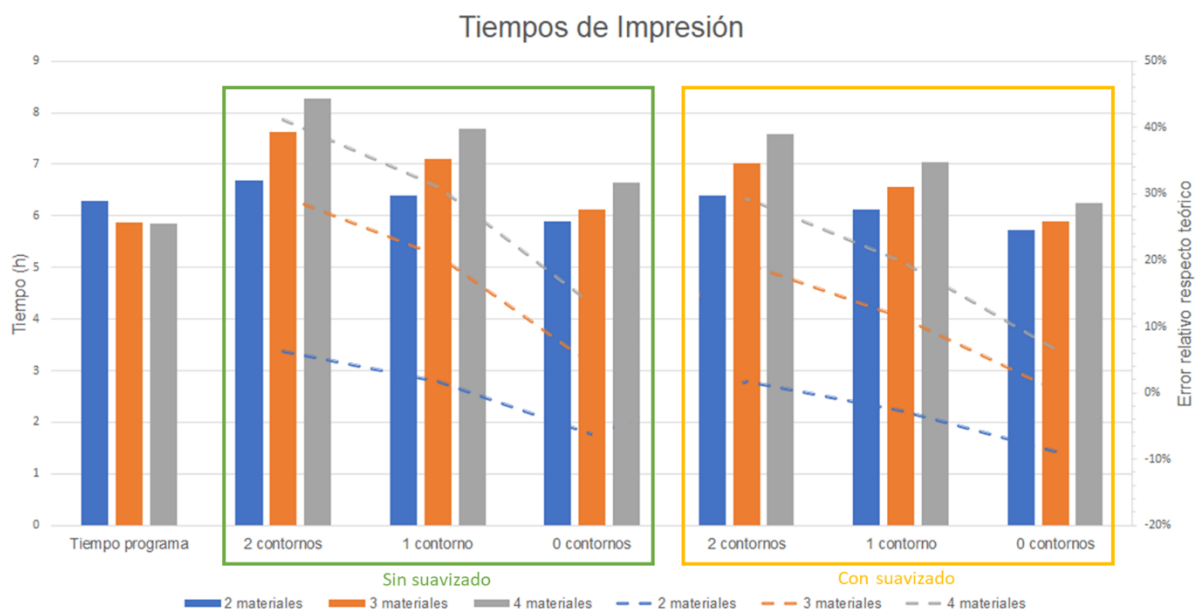


Figura 7: Comparación de los tiempos de impresión obtenidos para los casos considerados.

A partir de los resultados obtenidos se observan las siguientes tendencias:

- El tiempo de impresión teórico obtenido según el algoritmo de optimización tiende a disminuir al aumentar el número de materiales utilizados, mientras que el tiempo

de impresión práctico obtenido de la simulación en el slicer aumenta al incrementar el número de materiales.

- El tiempo de impresión práctico es mayor que el teórico, pero tiende a igualarse cuando se disminuye la cantidad de líneas de contorno de los dominios.
- Con el suavizado de los contornos se disminuye el tiempo de impresión práctico.

Con esto se determina que los tiempos de impresión prácticos son mayores a los teóricos. Este error se puede visualizar en la [Figura 7](#), donde se expresa como error relativo calculado de la forma

$$Er = \frac{T_p - T_t}{T_t}, \quad (18)$$

siendo  $T_p$  el tiempo práctico y  $T_t$  el tiempo teórico.

Esta discrepancia se debe a una serie de factores no tenidos en cuenta al calcular el tiempo de impresión, siendo el principal, que la función de tiempo de impresión no contempla el tiempo necesario para imprimir la interfaz entre dos estructuras de impresión (materiales desde el punto de vista del problema de optimización). Esto es aún más evidente cuando se observa que al disminuir el número de contornos sólidos para fabricar la interfaz, el error relativo disminuye. Hay que notar que la interfaz es indispensable, ya que no utilizar bordes sólidos tiene implicaciones en las propiedades mecánicas de la pieza final debido a la mala unión entre las regiones materiales.

Por otro lado, el error relativo disminuye cuando se realiza un suavizado de los contornos. Y la mayor discrepancia entre estos tiempos se da cuando se utilizan cuatro materiales y dos contornos sólidos sin suavizado.

#### 4.2 Viga sometida a flexión de tres puntos

El dominio de proyecto para este ejemplo corresponde a una viga de dimensiones 5x1 con tres apoyos móviles y una fuerza puntual unitaria vertical hacia abajo, según la [Figura 8](#).

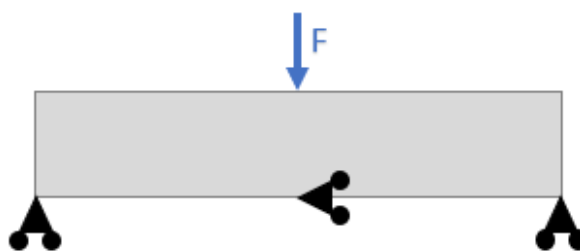


Figura 8: Esquema de ejemplo a optimizar.

Para el análisis se fijó el factor de penalización en  $\lambda = 2$  y se utilizaron dos materiales cuyas propiedades se resumen en la [Tabla 2](#).

	Patrón	Densidad de relleno	Matriz constitutiva [GPa]	Tiempo unitario [ $s/mm^3$ ]	Color
Material 1	Triangular	99%	$\begin{bmatrix} 3.4066 & 1.3529 & 0 \\ 1.3529 & 3.4066 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0788 \end{bmatrix}$	0.5509	Negro
Material 2	Triangular	15%	$\begin{bmatrix} 0.1925 & 0.0791 & 0 \\ 0.0791 & 0.1925 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0588 \end{bmatrix}$	0.0932	Rosa

Tabla 2: Características de los materiales utilizados en la optimización



En este ejemplo se compararán tres topologías distintas. La primera es la obtenida mediante el algoritmo de optimización propuesto, presentada en la [Figura 9](#). La segunda corresponde a una distribución uniforme de patrón triangular de densidad 91,4% y mismo material base, que almacena la misma energía de deformación que la topología optimizada. La última topología es nuevamente una distribución uniforme de patrón triangular y mismo material base, pero con una densidad de 61.3%, que posee el mismo tiempo de impresión que la topología optimizada.



Figura 9: Viga optimizada.

Para la determinación de los tiempos de impresión se redimensiona la pieza a 150x30x10mm. Los resultados para cada topología se expresan en la [Tabla 3](#).

	Pieza optimizada	Pieza sin optimizar con igual $J$	Pieza sin optimizar con igual tiempo de impresión
Tiempo [h]	4.36	6.41	4.36
$J$ [KJ]	0.8097	0.8070	1.934
Material 1	Triangular 99%	Triangular 91.4%	Triangular 61.3%
Material 2	Triangular 15%	-	-

Tabla 3: Comparación de pieza optimizada y piezas de una sola estructura.

Con la distribución de materiales optimizada se logra reducir el tiempo de impresión de la viga en un 36,62% con un aumento de la energía de deformación de un 32% con respecto a imprimir todo el dominio con patrón triangular y 99% de densidad de relleno. Por otro lado, la topología de igual energía de deformación que la viga optimizada tiene un tiempo de impresión 46.98% mayor. En cambio, la topología de igual tiempo de que la viga optimizada posee una energía potencial de deformación 139% mayor. En otras palabras, la topología optimizada posee prestaciones sustancialmente más altas en base a estos dos indicadores que las topologías de distribución uniforme.

## 5 CONCLUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos se puede corroborar que el proceso de optimización disminuye el tiempo de impresión de las piezas, logrando la óptima distribución de estructuras que permitan mantener la mayor rigidez posible. Además, se corroboró, utilizando como factor de comparación la energía de deformación y el tiempo de impresión, que la pieza optimizada utilizando un patrón con diferentes densidades es superior con respecto a las piezas que se obtienen utilizando una sola estructura de impresión del mismo patrón.

Por otro lado, se puede apreciar que la introducción de múltiples materiales genera discrepancias entre los tiempos obtenidos por el programa y los corroborados a través del slicer. Esta discrepancia se atribuye a que la función de costo no considera los tiempos dedicados por el slicer a la impresión de bordes entre interfaces los cuales aumentan con la adición de más materiales al dominio, pudiendo alcanzar valores muy elevados. Con esto se concluye que se

debe contemplar la variación de tiempo provocada por la impresión de la frontera entre materiales.

Por lo tanto, una nueva línea de trabajo sería considerar dentro de la función de costo el tiempo de impresión de interfaz adicionando restricciones perimétricas al problema. Con esto se lograrían obtener piezas con aún menor tiempo de impresión y resultados más próximos a los tiempos reales.

Por último, en este trabajo se estudió experimentalmente las discrepancias que existen entre el tiempo de impresión real de una pieza comparado con el obtenido por el programa y los factores que influyen. Este análisis no se realizó con la energía de deformación final de la pieza por lo que permite una línea de trabajo futura.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los integrantes del Laboratorio de Impresión 3D del departamento de Ing. Metalúrgica de la UTN-FRC por sus valiosas recomendaciones y asistencia, y a FPT Industrial por su apoyo.

## REFERENCIAS

- Alvarez C, K., Lagos C, R., & Aizpun, M. (2016). Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM). *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 24, 17-24
- Arabnejad, S., & Pasini, D. (2013). Mechanical properties of lattice materials via asymptotic homogenization and comparison with alternative homogenization methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, 249-262.
- Cantrell, J., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J., . . . Ifju, P. (2017). Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts. *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Volume 3*.
- Giusti, S. M., Ferrer, A., & Oliver, J. (2016). Topological sensitivity analysis in heterogeneous anisotropic elasticity problem. Theoretical and computational aspects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 134-150.
- Gonabadi, H., Chen, Y., Yadav, A., & Bull, S. (2022). Investigation of the effect of raster angle, build orientation, and infill density on the elastic response of 3D printed parts using finite element microstructural modeling and homogenization techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1485-1510.
- Romero Onco, A., & Giusti, S. (2020). A robust topological derivative-based multi-material optimization approach: Optimality condition and computational algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1-21.
- Somireddy, M., & Czkansky, A. (2020). Anisotropic material behavior of 3D printed composite structures – Material extrusion additive manufacturing. *Materials & Design, Vol. 195*.
- Wang, Y., Luo, Z., Kang, Z., & Zhang, N. (2015). A multi-material level set-based topology and shape optimization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1570-1586.