

# MECANISMOS FLEXIBLES: DESDE EL DISEÑO CONCEPTUAL HASTA SU MANUFACTURA

Francisco Javier Ramírez Gil<sup>1</sup>, Esteban Sepúlveda Orozco<sup>2</sup>, Wilfredo Montealegre Rubio<sup>3</sup>

Grupo de Diseño y Optimización Aplicada (DOA, [www.doa-unal.co](http://www.doa-unal.co)), Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín – Colombia.

<sup>1</sup>MSc [fjramireg@unal.edu.co](mailto:fjramireg@unal.edu.co),

<sup>2</sup>MSc [esepulvo@unal.edu.co](mailto:esepulvo@unal.edu.co)

<sup>3</sup>DSc [wmontealegrer@unal.edu.co](mailto:wmontealegrer@unal.edu.co)

## RESUMEN

Los mecanismos flexibles (MFs) son estructuras monolíticas donde su desplazamiento se da gracias a la flexibilidad de sus miembros estructurales. Esto hace que los MFs presenten ciertas ventajas en comparación con sus homólogos, los cuerpos rígidos, tales como no requerir de lubricación ni ensamble. Este trabajo muestra una metodología sistemática para la producción de un MF tipo pinza, desde el diseño conceptual hasta su manufactura. Para el diseño del MF se usa el método de optimización topológica (MOT), el cual permite diseñar estructuras óptimas de forma automática distribuyendo una cantidad de material dada dentro de un dominio de diseño específico buscando maximizar el desplazamiento en un punto. Al diseño obtenido mediante el MOT se le aplican una serie de operaciones tendientes a disminuir la complejidad de la geometría obtenida con el fin de reducir los costos de manufactura. Con la metodología propuesta se obtiene un MF óptimo, funcional y con geometría innovadora.

**Palabras clave:** Mecanismos flexibles, diseño sistemático, optimización estructural, método de optimización topológica (MOT), método de elementos finitos (MEF).

Recibido: 01 de diciembre de 2016

Received: December 01th, 2016

Aceptado: 12 de Junio de 2017

Accepted: June 12th, 2017

## COMPLIANT MECHANISMS: FROM THE CONCEPTUAL DESIGN TO THEIR MANUFACTURE

### ABSTRACT

*The compliant mechanisms (CMs) are monolithic structures where the displacement is given by the flexibility of their structural members. Thus, the CMs show certain advantages compared with their counterparts, the rigid bodies; since assembling or lubrication are not required. This paper presents a systematic methodology to produce a gripper-type CM, from the design to their manufacture. For designing the CM, the topology optimization method (TOM) is used, where optimal structures are automatically designed by distributing a given amount of material within a specified design domain seeking for maximizing the displacement at a point. Next, a series of operations are applied to the TOM design for reducing the geometry complexity and then manufacturing costs. With the proposed methodology, an optimal and functional CM with innovative geometry is obtained.*

**Keywords:** Compliant mechanisms, systematic design, structural optimization, topology optimization method (TOM), finite element method (FEM).

*Cómo citar este artículo:* F. J. Ramírez-Gil, E. Sepúlveda-Orozco, W. Montealegre-Rubio, "Mecanismos flexibles: desde el diseño conceptual hasta su manufactura," *Revista Politécnica*, vol. 13, no. 24, pp. 65-78, 2017.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un mecanismo flexible (MF) es una estructura monolítica flexible que entrega un movimiento deseado bajo la acción de una fuerza [1]. Estos mecanismos se diferencian de sus contrapartes, los mecanismos rígidos (MR), en que el movimiento se da gracias a la deformación de los elementos que lo componen, mientras que en los MR, el único movimiento es el que se consigue en las juntas, ya que sus elementos se consideran infinitamente rígidos. Además, mientras en los MR cada componente tiene una función diferente, los MFs pueden integrar diferentes funciones en una o en un número reducido de partes [2].

Los MFs presentan diferentes ventajas tales como [2]: mayor rendimiento ya que ofrece alta compactibilidad y precisión, bajo peso y fricción, y eliminación de la lubricación; costo más bajo debido al poco número de componentes, traducido en una fabricación simplificada (pocos moldes), menor complejidad del ensamblaje y reducción del stock; y su capacidad de miniaturizarse, es decir, es posible su fabricación en la escala micro y nano (MEMS y NEMS [3]). Adicionalmente, otra de las ventajas que presentan los MFs es que son considerados diseños bio-inspirados [2]. Nótese que en la naturaleza, la mayoría de objetos que se mueven son muy flexibles, tales como el tallo de las plantas, las alas de los insectos, las anguilas, la trompa de los elefantes y otros tantos ejemplos donde el movimiento proviene de la flexión de las partes [4].

El uso de MFs se ha incrementado en los últimos años por su versatilidad [5], [6], hecho que se evidencia en la gama de aplicaciones industriales que van desde dispositivos de alta precisión en la micro-escala, a grandes componentes de máquinas [7], [8]. Entre los factores que han influido para aumentar la popularidad de los MFs es el desarrollo de nuevos materiales, técnicas de diseño y procesos de manufactura [2]. Además, debido a las crecientes mejoras en hardware y software, el diseño y análisis de MF ha aumentado en cantidad de herramientas disponibles y complejidad abordada [5].

A pesar de todas las potenciales ventajas que presentan los MFs, éstos también experimentan dificultades. Una de las principales desventajas de los MFs es la falla por fatiga, la cual proviene del movimiento de flexión repetido que puede causar que el MF se dañe a una temprana edad de servicio.

Por otro lado, el movimiento en MF es más restringido que en su contraparte y su diseño puede ser más complejo. Además, debido a que los MFs son relativamente nuevos en comparación con los MR, es difícil para los diseñadores encontrar recursos que los guíen en su labor. Aunque existe suficiente literatura para ayudar a dichos diseñadores a entrar en profundidad sobre temas relacionados con MFs, se necesita de recursos más prácticos desde el punto de vista ingenieril, esto es, recursos visuales y concisos que proporcionen inspiración y orientación en la etapa conceptual de su diseño [2]. En consecuencia, se ha realizado un esfuerzo considerable en la creación de métodos genéricos y sistemáticos para facilitar su diseño.

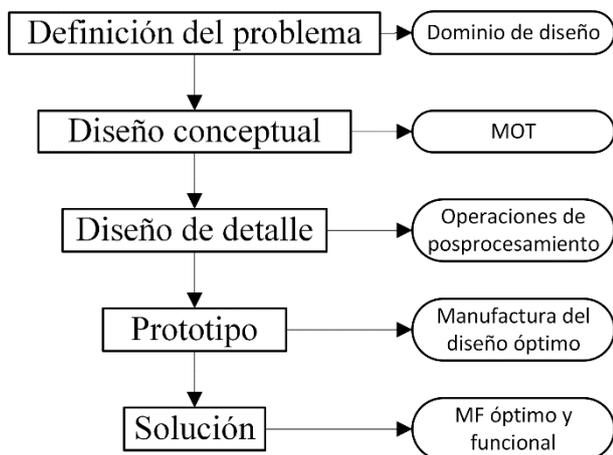
Una técnica para diseñar sistemáticamente MFs, que ha sido ampliamente acogida tanto en la academia como en la industria, es el método de optimización topológica (MOT). El MOT es un método computacional que permite diseñar estructuras óptimas de forma automática, distribuyendo una determinada cantidad de material en el interior de un dominio de diseño predeterminado con el fin mejorar su desempeño frente a un fenómeno físico considerado [9]. La principal ventaja del MOT es que no es necesario contar con una forma preliminar del diseño, lo cual es bastante importante para los diseñadores novatos o para diseños que son altamente complejos en donde es difícil obtenerlo por metodologías tradicionales [10]. Adicionalmente, el MOT puede generar soluciones novedosas y/o puede ser utilizado para ampliar la experiencia y la intuición del diseñador [2]. Sin embargo, el resultado que arroja el MOT debe ser considerado como un primer bosquejo del diseño conceptual, lo cual implica que se requiere una posterior interpretación del diseñador y un posible posprocesamiento para corregir los defectos del resultado del método [11].

Consecuentemente, este trabajo presenta una metodología sistemática para la producción de un MF tipo pinza, desde el diseño conceptual hasta su manufactura. Dicho trabajo muestra el cómo encajar "nuevas" herramientas de diseño como el MOT y "nuevas" tecnologías como la manufactura aditiva (MA), en metodologías de diseño tradicional. Para lograr este objetivo, a los diseños obtenidos mediante el MOT se les aplica una serie de operaciones de posprocesamiento tendientes a reducir la complejidad de la geometría y de esta forma disminuir los costos de manufactura.

Adicionalmente, se verifica el diseño mediante el método de los elementos finitos (MEF) y se procede a la fabricación del mismo por MA. Finalmente, se hace una comparación del desempeño del MF desde el diseño dado por el MOT, del mejorado por el diseñador (interpretado) y del fabricado.

## 2. MATERIALES Y METODOS

Debido a que el diseñador es el responsable de las características técnicas y económicas de un producto, y a la importancia comercial del desarrollo de productos de forma oportuna y eficiente, es importante contar con un procedimiento de diseño definido para hallar las soluciones. Este procedimiento debe ser flexible y al mismo tiempo ser capaz de ser planificado, optimizado y verificado. Sin embargo, este procedimiento puede no ser efectivo si el diseñador no tiene el conocimiento necesario y/o no puede trabajar de manera sistemática [10]. Este procedimiento sistemático es conocido como metodología de diseño.



**Fig. 1.** Modelo de diseño de Pahl y Beitz adaptado al diseño de MFs mediante el MOT.

Dentro de las metodologías de diseño se encuentran los modelos, los cuales dictan los pasos a seguir en el diseño. Algunos modelos simplemente describen la secuencia de actividades que ocurren típicamente en el diseño, mientras que otros modelos intentan prescribir un mejor o más adecuado patrón de actividades [12]. Estos modelos a pesar de ser sistemáticos, son heurísticos, es decir, se basan en la experiencia previa del diseñador y en directrices y reglas prácticas que conducen a lo que el diseñador espera ser la dirección correcta, pero sin garantía

absoluta de éxito [12]. Por lo tanto, con el fin de sistematizar el diseño de MFs, en este trabajo se usa el modelo de diseño de Pahl y Beitz [10], como se ilustra en la Fig. 1, donde el problema consiste en diseñar una estructura flexible, sujeta a cargas y condiciones de frontera, que se desplace lo máximo posible en un punto específico. A fin de disminuir la heurística del proceso de diseño, se usa el MOT para conseguir el diseño conceptual del MF. Luego se siguen una serie de operaciones que constituyen el diseño de detalle. Una vez completada la tarea anterior, el diseño está listo para ser manufacturado, lo que finalmente completa la solución al problema de diseño. En las siguientes subsecciones se detalla el procedimiento seguido en este trabajo al usar el modelo de diseño de Pahl y Beitz.

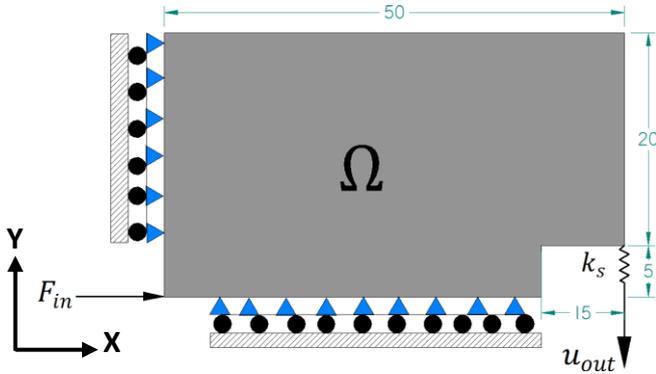
### 2.1 Definición del problema de diseño

En este trabajo se quiere diseñar un MF tipo pinza, el cual es comúnmente usado para labores de manipulación en áreas de la salud y en mecánica de precisión [13], [14]. El dominio de diseño del cual se parte se presenta en la Fig. 2. El dominio de diseño es el espacio permitido para el diseño del MF (región donde el MOT puede redistribuir el material), el cual consta de geometría y condiciones de frontera. Adicionalmente, a este dominio se le pueden predefinir zonas sólidas o vacías, las cuales no pueden ser modificadas por el MOT (regiones de no diseño). Con el propósito de disminuir el costo computacional asociado al MOT, se considera simetría respecto al eje X, y se usa un dominio bidimensional (que es equivalente a diseñar la sección transversal de una estructura 3D). El análisis de la estructura se realiza mediante el MEF con la teoría de esfuerzo plano.

### 2.2 Diseño conceptual del MF mediante el MOT

El diseño de MFs mediante el MOT se puede formular de diversas maneras, pero no hay todavía una formulación definitiva que sea universalmente aceptada [2]. Para una comparativa entre diferentes formulaciones se puede consultar la referencia [15]. De forma general, se puede encontrar dos enfoques para el diseño sistemático de MFs basados en el MOT: el enfoque cinemático (usado por ejemplo en [16]) y el enfoque continuo (usado por ejemplo en [17]). En el primer enfoque, el dominio de diseño continuo se aproxima mediante una densa red de elementos finitos (EFs) unidimensionales (1D) tipo *truss* o *beam*, mientras que la aproximación basada

en el continuo normalmente utiliza un dominio de diseño continuo discretizado en EFs bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D). Mediante el uso de una malla fina, el segundo modelo representa mejor el medio continuo, y por lo tanto, es la aproximación empleada en este trabajo.



**Fig. 2.** Dominio de diseño 2D para un MF tipo pinza considerando simetría con respecto al eje X (medidas en mm).

Por otro lado, la aproximación basada en el continuo dispone de diferentes enfoques para parametrizar el dominio de diseño. Los más conocidos y mejor desarrollados son el SIMP (*solid isotropic material with penalization*) y el método de homogenización [18]. El método SIMP consiste en asignar a cada EF una variable de diseño, comúnmente llamada pseudo-densidad, la cual puede tomar valores entre cero (EF sin material) y uno (EF con material). El método de homogenización produce topologías similares en apariencia a las obtenidas con el SIMP, pero es más complicado ya que requiere de más variables de diseño y mayor tiempo de cómputo [2]. Por lo que se opta por usar el SIMP en este trabajo (la mayoría de los softwares comerciales usan este modelo de material en sus implementaciones). Finalmente, para la solución del problema de optimización se usa a técnica de programación lineal secuencial (PLS), por su generalidad (capaz de resolver problemas no lineales, multifísicos, etc.) y eficiencia para resolver problemas con un gran número de variables de diseño.

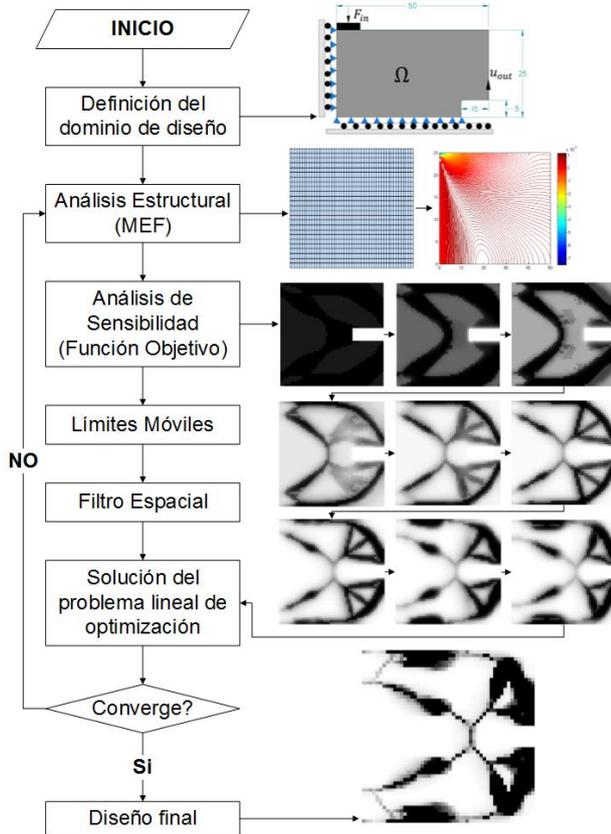
La Fig. 3 muestra el diagrama de flujo empleado para diseñar MFs mediante el MOT usando PLS. Se parte de un dominio de diseño, el cual es discretizado con EFs, usando una malla estructurada o no dependiendo de la complejidad de dicho dominio. Seguidamente se resuelve el problema elástico mediante el MEF. Debido a que la

PLS resuelve sub-problemas lineales en cada iteración del MOT en forma secuencial, tanto la función objetivo como las restricciones deben ser lineales. La linealización se logra mediante series de Taylor de primer orden y se conoce como análisis de sensibilidad, el cual consiste en calcular la primera derivada de la función objetivo con respecto a cada variable de diseño. Por otro lado, en la PLS se debe limitar el espacio de solución de cada variable de diseño, lo cual se logra mediante el uso de los límites móviles. Luego de esto se debe aplicar un filtro con el fin de controlar la complejidad de la topología resultante [19]; es decir, para evitar la aparición de miembros estructurales muy pequeños, escala de grises y tablero de ajedrez [20], que hacen de la manufactura un proceso difícil y costoso. Después se procede con la solución del sub-problema lineal de optimización mediante el método de punto interior [21]. A partir de este punto se verifica el cumplimiento de algunos criterios de convergencia, realizando iterativamente el procedimiento anterior hasta alcanzarlos. Finalmente, si el resultado converge, la topología óptima es graficada en una escala de grises.

En este trabajo, la programación del MOT usando PLS se realiza en MATLAB®. Las geometrías usadas son simples y por tal motivo se realizan y discretizan en este software con mallas estructuradas. El MEF estático lineal es programado usando EFs Q4 y el análisis de sensibilidad se realiza por el método adjunto [22]. Para los límites móviles se usa una regla heurística descrita en [23]. Por otro lado, el filtro usado es el filtro espacial AWSF propuesto en [19]. Este filtro es aplicado sobre los límites móviles con la ventaja de que los posibles valores que puede tomar la pseudo-densidad de cada EF esté relacionada con los EFs vecinos, lo cual implica que  $\rho_e$  no difiere mucho de sus vecinos, disminuyendo el tablero de ajedrez y la dependencia del resultado con la malla [20]. El tablero de ajedrez se genera cuando la variable de diseño en una región varía entre 1 y 0 creando una rigidez ficticia [9]. Finalmente, el criterio de convergencia en el algoritmo de optimización se basa en el valor de la función objetivo  $u_{out}$  de las últimas tres iteraciones  $k$ ,  $k - 1$  y  $k - 2$ , donde se mide si hay o no mejoramiento de dicha función siguiendo la siguiente regla [24]:

$$\frac{|\Delta u_{out}^k| + |\Delta u_{out}^{k-1}|}{2} \leq \varepsilon \quad (1)$$

donde  $\Delta u_{out}^k = u_{out}^k - u_{out}^{k-1}$ ,  $\Delta u_{out}^{k-1} = u_{out}^{k-1} - u_{out}^{k-2}$  y  $\varepsilon$  es una tolerancia dada, normalmente una fracción de la función objetivo cuando la estructura está completamente sólida. Si la tolerancia no se alcanza antes de un número máximo de iteraciones  $k_{max}$ , entonces el algoritmo termina. En las siguientes subsecciones se presenta el problema de optimización topológica aplicado al diseño de MFs y el modelo de material SIMP.



**Fig. 3.** Algoritmo del MOT usando PLS aplicado al diseño de MFs.

### 2.2.1 Formulación del problema de optimización

El problema de optimización para el diseño de MFs se formula teniendo en cuenta una carga estática  $F$  aplicada externamente a la estructura capaz de deformarla y generar un desplazamiento máximo  $u_{out}$  en cierto punto de ella. Luego, el problema de optimización en forma discreta se presenta en la Ec. (2), donde  $\rho$  es el vector de variables de diseño,  $L$  es un vector de ceros con el valor de uno en la posición del grado de libertad (GDL) que se quiere

maximizar del vector de desplazamientos  $U$ , obtenido a partir del MEF. La primera restricción del problema de optimización es la ecuación de equilibrio, siendo  $K(\rho)$  la matriz de rigidez, la cual depende de las variables de diseño debido al modelo de material SIMP [18], descrito en la sección 2.2.2. La segunda restricción asegura que la topología final tenga un volumen  $V^*$  inferior al volumen total del dominio de diseño  $V_t$ , donde  $v_e$  es el volumen del EF  $e$ , el término  $nel$  indica el número total de EFs usados en la discretización de dicho dominio y  $f$  es una fracción ( $0 < f < 1$ ). Finalmente, la tercera restricción se conoce como límites móviles, los cuales controlan la solución, donde  $\rho_e^l$  y  $\rho_e^u$  son el límite móvil inferior y superior de la variable de diseño  $\rho_e$ , respectivamente.

$$\max_{\rho} u_{out}(\rho) = L^T U(\rho)$$

$$K(\rho)U = F$$

Tal que: 
$$\sum_{e=i}^{nel} \rho_e v_e \leq V^* = fV_t \tag{2}$$

$$0 < \rho_{min} \leq \rho_e^l \leq \rho_e \leq \rho_e^u \leq 1$$

Los supuestos que están implícitos en este enfoque son un comportamiento elástico lineal del material y pequeñas deformaciones en la estructura. Para controlar la rigidez del MF resultante y grandes valores para  $u_{out}$  que resultaría en no linealidades geométricas, el MF se diseña considerando que en este punto existe una resistencia al libre movimiento, modelado como un resorte (ver Fig. 2), de tal forma que la rigidez de dicho resorte  $k_s$  controla la rigidez del MF [25]. Adicionalmente, el resorte sirve para “forzar” al optimizador a conectar el material desde el anclaje hasta  $u_{out}$  [2].

### 2.2.2 Modelo de material SIMP

El modelo de material utilizado en este trabajo y uno de los más usados en la implementación del MOT es el SIMP, el cual consiste en definir el valor de una propiedad efectiva del material  $E^e$  en cada uno de los EFs del dominio discretizado  $x$  en función de la pseudo-densidad  $\rho_e$  y la propiedad del material base  $E_0$  de la siguiente manera [9]:

$$E^e(x) = \rho_e(x)^p E_0 \tag{3}$$

donde  $\rho_e$  se encuentra definida dentro del intervalo  $[\rho_{min}, 1]$ . El valor de  $\rho_{min}$ , típicamente  $10^{-3}$ , aparece con el fin de evitar inestabilidades numéricas en el MEF e indica las partes estructurales sin significancia (vacío). Si  $\rho_e = 1$  se tiene la propiedad del material base ( $E^e = E_0$ ) y el EF queda en la topología final (sólido). Los valores intermedios de  $\rho_e$  generan áreas grises en la topología, y por tanto, se usa el factor de penalización  $p$  para disminuir dicho efecto. Normalmente, se toma  $p > 1$  y  $p < 10$ , donde  $p = 3$  es un valor típico.

### 2.3 Diseño de detalle

Debido a que normalmente la topología producida por el MOT no es apta para su manufactura por la escala de grises presente y los bordes poco suaves, a ésta se le deben realizar algunas operaciones de posprocesamiento, las cuales conforman la etapa de diseño de detalle. La Fig. 4 ilustra los pasos seguidos en esta etapa hasta conseguir un MF apto para manufacturar. El primer paso consiste en hacer una interpretación del diseño conceptual obtenido a partir del MOT. La interpretación consta en decidir qué valores de las pseudo-densidades se considerarán, es decir, que EFs quedarán en la estructura final, y cuáles no. Esto se hace ya que usando el SIMP se pueden obtener pseudo-densidades entre  $\rho_{min}$  y 1, donde los valores intermedios significan cualquier material diferente del material base y del vacío, es decir, forma una estructura con diferentes materiales, lo cual es muy complicado de manufacturar a menos que se utilicen técnicas avanzadas para la fabricación de materiales compuestos como los funcionalmente gradados [26]. Luego de la eliminación de la escala de grises, se obtiene una topología bien definida, solo con regiones blancas y negras (*black and white design*). Sin embargo, como dicha topología proviene de una discretización con EFs rectangulares, los contornos de ésta son poco suaves (dientes de sierra).

El problema de los dientes de sierra en la topología se soluciona suavizando los bordes. En la suavización de la topología se usa un software CAD, particularmente, en este trabajo se usó Solidworks®. Para realizar este procedimiento, la topología interpretada es guardada en un formato de imagen. Luego, esta imagen es importada al CAD, la cual generalmente no tiene las dimensiones correctas, con lo que es necesario escalarla a las medidas requeridas. Una vez escalada la imagen, el diseñador suaviza los contornos manualmente con

curvas *spline*. Finalmente, dicho modelo 2D suavizado se extruye uniformemente una profundidad igual al espesor con el fin de crear el modelo 3D, el cual queda listo para su manufactura. Cabe anotar que en el intermedio de cada etapa se hace un análisis mediante el MEF de la topología actual del MF. Este análisis se hace con el fin de detectar elementos estructurales sometidos a grandes esfuerzos y donde el esfuerzo supere el límite elástico del material (el MF no se desea deformar permanentemente para poderlo usar varias veces), la estructura debe ser modificada engrosando dichos elementos. También se pueden hacer cambios a la estructura con el fin de favorecer su desempeño y/o eliminar características de difícil manufactura.

### 2.4 Fabricación del prototipo por manufactura aditiva

La topología óptima posprocesada se fabrica en ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*) usando una impresora 3D Fortus 400mc mediante la técnica FDM (*fused deposition modeling*). En la manufactura aditiva (AM, por sus siglas en inglés), impresión 3D o prototipado rápido [27] del prototipo mediante FDM se crea la pieza capa por capa de abajo hacia arriba, calentando y extruyendo un filamento de material termoplástico de nivel de ingeniería (ABS). Dicha tecnología se suele emplear para generar geometrías complejas como las resultantes del MOT y piezas funcionales como prototipos y piezas de producción de bajo volumen [28]. Adicionalmente, este proceso de manufactura es adecuado ya que reproduce fácilmente la geometría intrincada del MF tipo pinza obtenido mediante el MOT y evita el fabricar los costosos moldes requeridos por métodos de manufactura de polímeros convencionales como moldeo por inyección, extrusión o soplado.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La solución al problema inicialmente planteado (Sección 2.1), según el modelo de diseño Pahl y Beitz (ver Fig. 1), se presenta en esta sección, mostrando los resultados de las diferentes etapas.

### 3.1 Diseño conceptual del MF tipo pinza

En el MOT existen diversos parámetros de entrada los cuales afectan la topología final, es decir, cada grupo de parámetros produce una topología

diferente, por lo que es común hacer un estudio de éstos y definir cuáles son los más apropiados para un problema específico [23]. En la Tabla 2 se hace una comparación considerando tres valores diferentes para el tamaño del filtro, la calidad de la malla, la cantidad disponible y el tipo de material, la

rigidez de la pieza de trabajo en el punto de salida, el valor inicial de las variables de diseño y el número de iteraciones máximas permitidas. Cuando el parámetro no varía, se considera el valor dado en la Tabla 1.

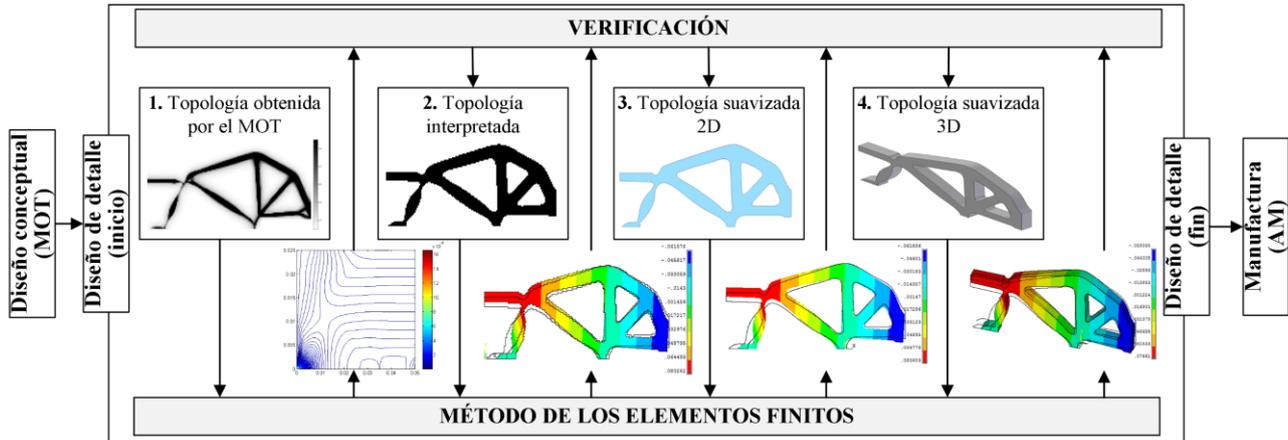


Fig. 4. Procedimiento seguido en la etapa de diseño de detalle para el desarrollo de MFs mediante el MOT.

Tabla 1. Parámetros de diseño usados en el MOT.

Parámetro	Valor
Número de EFs en X	150
Número de EFs en Y	75
Factor de penalización ( $p$ )	3
Rigidez de la pieza de trabajo ( $k_s$ )	300 N/mm
Máximo material permitido ( $f$ )	20 %
Radio de filtro ( $R_{max}$ )	0.5 mm
Fuerza aplicada ( $F_{in}$ )	50 N
Módulo de Young ( $E$ )	71.1 GPa
Relación de Poisson ( $\nu$ )	0.33
Tolerancia ( $\epsilon$ )	$10^{-3}$
Máximo # de iteraciones ( $k_{max}$ )	200

De la Tabla 2 se observa lo siguiente:

- Cuando no hay filtro ( $R_{max} = 0$ ), el MOT presenta problemas de tablero de ajedrez y miembros estructurales delgados, pero un valor alto para  $R_{max}$  (más de 8 EFs dentro del radio de filtro) incrementa la escala de grises.
- La discretización es mejor entre más EFs se

usen, ya que aumenta la definición de los bordes y asegura la convergencia del MEF, pero el costo computacional incrementa exponencialmente con el número de EFs [5]. No se observa independencia de malla porque se usó el mismo tamaño de filtro en los tres casos, lo cual implica que para el caso I ( $nel = 1250$ ) y II ( $nel = 5000$ ) no actúa dicho filtro debido al tamaño del EF.

- Si  $f$  es pequeña, la topología es similar a una estructura tipo cercha, pero si  $f$  es grande, el material es desperdiciado acumulándose en zonas que no aportan al desempeño del MF.
- Cuando no se usa el artificio de un resorte en el GDL a maximizar, la topología es tan flexible que alcanza desplazamientos irreales ( $u_{out} = -747.48$  mm). Por el contrario, cuando  $k_s \rightarrow \infty$ ,  $u_{out} \rightarrow 0$ .
- Debido a que la PLS usa un valor inicial para  $\rho$ , el resultado depende de cual se tome, y por ser un proceso iterativo, el resultado final es distinto.
- El número máximo de iteraciones permitido es un compromiso entre el tiempo de cómputo y la resolución de la topología, ya que para pocas

iteraciones ( $k_{max} = 30$ ) ésta aun parece no estar definida y usando muchas iteraciones ( $k_{max} = 500$ ) la ganancia es poca a costa de un tiempo adicional de simulación, que generalmente es alto en comparación con un número intermedio de iteraciones ( $k_{max} = 200$ ).

- El material no es influyente en la topología, ya que se comparó el módulo de Young del ABS ( $E = 20 \text{ MPa}$ ) con el del aluminio ( $E = 71.7 \text{ GPa}$ ) y las diferencias no son significativas haciendo una inspección visual a la topología. Esto indica que se puede diseñar la topología de manera general con el MOT sin incluir propiedades reales del material. De hecho, en la literatura se encuentra que normalmente asumen un  $E = 1$  [29].

La Tabla 2 se asemeja al diagrama morfológico comúnmente usado en los modelos de diseño tradicionales para la generación de alternativas de solución. De hecho, en dicha tabla se presentan dos alternativas, la 1ª se identifica con líneas punteadas, mientras que la 2ª con líneas sólidas. La selección de los parámetros se basa en aquellos que producen la mejor topología en términos de menor escala de grises, mejor definición de bordes y menor tiempo de cómputo. Para el MF tipo pinza diseñado en este trabajo se selecciona la 1ª alternativa (ver Fig. 5), aunque algunas regiones de la estructura poseen escala de grises.

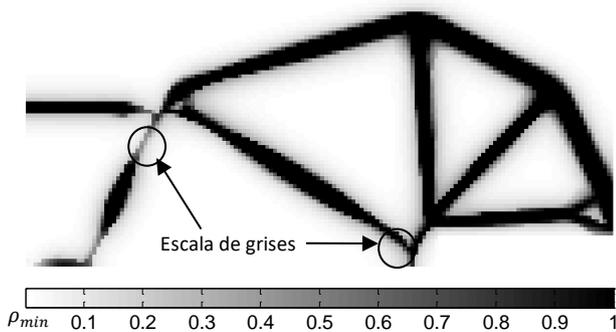


Fig. 5. Topología óptima obtenida por el MOT.

La Fig. 6 muestra la curva de convergencia de la función objetivo. Cuando el MOT empieza su proceso iterativo, el desplazamiento en el punto de salida  $u_{out}$  es prácticamente igual a cero. Como el objetivo es maximizar  $u_{out}$  en dirección  $-Y$  cuando una fuerza en dirección horizontal  $F_{in}$  (positiva del eje X) es aplicada (ver Fig. 2), el MOT lo hace en las siguientes iteraciones.

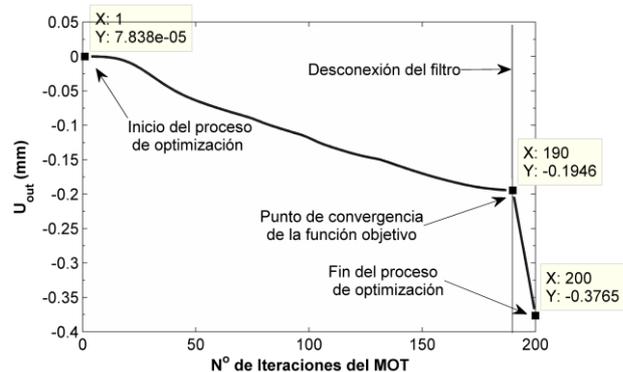


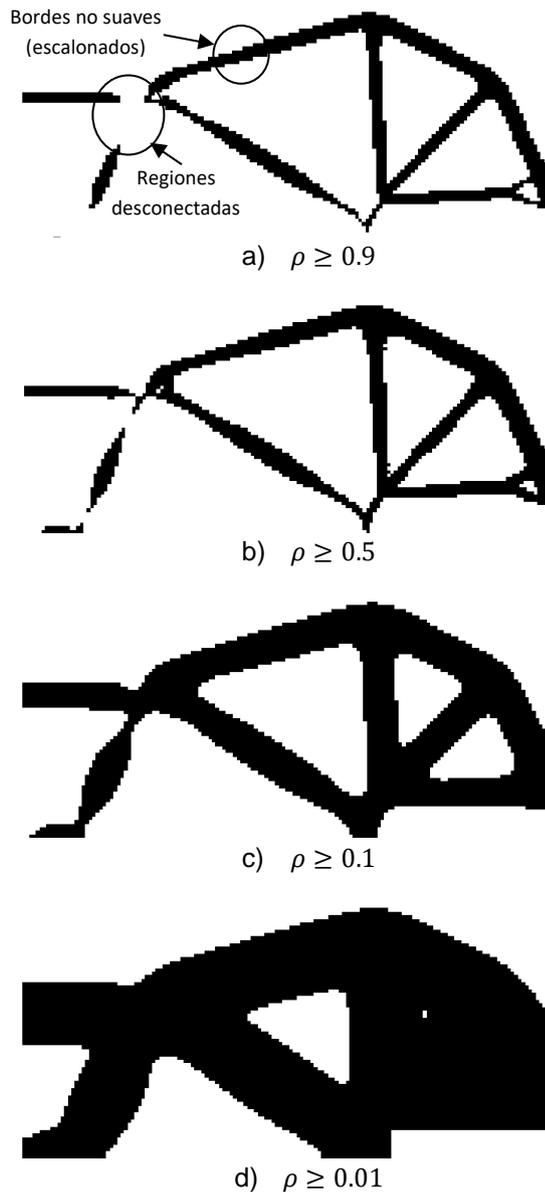
Fig. 6. Curva de convergencia de la función objetivo.

En la iteración 190 el MOT converge, ya que el valor de  $u_{out}$  no cambia significativamente en las tres últimas iteraciones. Cuando se alcanza la convergencia, el MOT realiza 10 iteraciones más, pero con el filtro desconectado con el fin de disminuir la escala de grises. Se observa una mejoría en la función objetivo cuando el filtro se desconecta, ya que las regiones grises disminuyen. Las zonas grises son consecuencia del SIMP y del filtro y es material compuesto (con módulos de Young desde  $7.17 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  para los EFs con  $\rho_e = \rho_{min}$  hasta  $7.17 \times 10^9 \text{ Pa}$  para los EFs con  $\rho_e = 1$ ) que aumenta la rigidez del MF. Por lo tanto, al eliminar estas zonas se espera que la topología tenga mayor flexibilidad.

**Tabla 2.** Estudio de variación de parámetros en el MOT para el diseño de un MF (diagrama morfológico).

Parámetro	Topología con parámetro valor 1	Topología con parámetro valor 2	Topología con parámetro valor 3
Radio de filtro $R_{max}$ (mm)	$R_{max} = 0, u_{out} = -0.9968$ 	$R_{max} = 0.5185, u_{out} = -0.3769$ 	$R_{max} = 0.9899, u_{out} = -0.2186$ 
Discretización n (número de EFs - nel -)	$25 \times 50(1250), u_{out} = -0.5079$ 	$50 \times 100(5000), u_{out} = -0.3201$ 	$75 \times 150(11250), u_{out} = -0.3769$ 
Fracción de volumen f (%)	$f = 10, u_{out} = -0.9051$ 	$f = 20, u_{out} = -0.3769$ 	$f = 60, u_{out} = -0.3754$ 
Rigidez de la pieza de trabajo $k_s$ (N/mm)	$k_s = 0, u_{out} = -747.48$ 	$k_s = 300, u_{out} = -0.3769$ 	$k_s = 5000, u_{out} = -0.1575$ 
Valor inicial de las variables de diseño $\rho_{ini}$	$\rho_{ini} = 1, u_{out} = -0.3035$ 	$\rho_{ini} = 0.2, u_{out} = -0.3769$ 	$\rho_{ini} = rand, u_{out} = -0.6253$ 
Número de iteraciones $k_{max}$	$k_{max} = 30, u_{out} = -0.0519$ 	$k_{max} = 200, u_{out} = -0.3769$ 	$k_{max} = 500, u_{out} = -1.2316$ 
Módulo de Young del material E (MPa)	$E = 1, u_{out} = -1.2307$ 	$E = 22, u_{out} = -1.2061$ 	$E = 71700, u_{out} = -0.3769$ 

Nota: los valores para  $u_{out}$  están en mm.



**Fig. 7.** Topologías con posprocesamiento básico considerando diferentes valores de *threshold*.

### 3.2 Diseño de detalle del MF tipo pinza

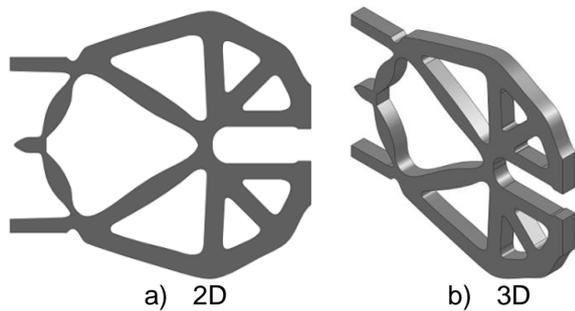
Un procedimiento simple para eliminar la escala de grises es hacer que los EFs cuyas pseudo-densidades estén por debajo de un valor definido por el diseñador (*threshold*) sean retirados del diseño, y los que estén por encima de ese valor se consideran iguales a uno (1), es decir, llenos del material base (ver paso 1 al 2 en la Fig. 4). Este posprocesamiento

es aplicado a la topología de la Fig. 5 y los resultados se muestran en la Fig. 7 donde se genera un diseño totalmente definido (blanco/negro). Se observa que la topología queda con miembros estructurales desconectados cuando *threshold* > 0.5. Por debajo de este valor los miembros se conectan, además, se disminuye la complejidad de la geometría ya que desaparecen algunos agujeros pequeños y los miembros de la estructura se engruesan, lo cual significa que la manufactura es menos compleja y, por lo tanto, menos costosa. Sin embargo, si se consideran los EFs con pseudo-densidades muy pequeñas, los agujeros obtenidos por el MOT tienden a desaparecer y la estructura se vuelve más rígida, disminuyendo el desempeño del MF.

Aunque con el posprocesamiento básico se logra obtener diseños completamente definidos, sus bordes no son suaves, lo cual representa un sobrecosto a la hora de manufacturarlos, además de que pueden ser concentradores de esfuerzos. Estos bordes en forma de escaleras (dientes de sierra) se eliminan mediante curvas suaves a trozos como los *splines*, a pesar de que existen técnicas más avanzadas como la optimización de forma, ésta incrementa la dificultad del diseño [30]. La suavización de los bordes se realizó con el software *Solidworks*® mediante curvas *splines* de forma manual (ver paso 2 al 3 en la Fig. 4). La Fig. 8a) muestra la topología completa y suavizada, proveniente de la Fig. 7c), puesto que es la mejor definida, sin problemas de miembros estructurales desconectados ni exceso de material. Debido a la naturaleza 3D de los objetos en la vida real, la topología 2D suavizada se le da un espesor de 3mm, obteniéndose la topología 3D como se indica en la Fig. 8b) (ver paso 3 al 4 en la Fig. 4). Se observa que con este posprocesamiento adicional sobre la topología (suavizado de bordes), la complejidad de su manufactura se ha reducido aún más. Es por ello que el MOT se considera una técnica para obtener ideas previas del diseño conceptual, ya que por lo regular sus resultados requieren de la intervención posterior del diseñador (diseño de detalle).

Con el objetivo de verificar el desempeño de las topologías modificadas por los posprocesamientos realizados, así como comparar y evaluar su desplazamiento en el punto deseado ( $u_{out}$ ), éstas son simuladas en el software comercial de elementos finitos ANSYS®, con las mismas suposiciones realizadas en MATLAB® (análisis estático lineal y esfuerzo plano). La Fig. 9 muestra

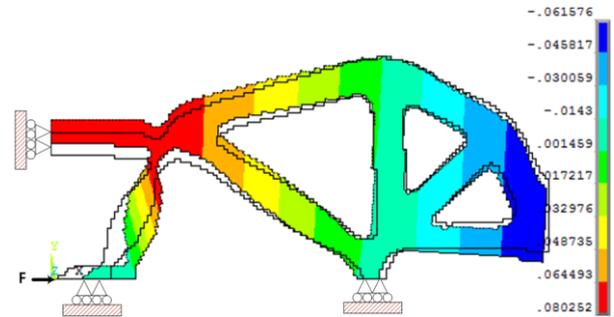
los desplazamientos nodales en dirección Y para los tres posprocesamientos realizados a la topología original. La Fig. 9a) muestra la simulación de la topología proveniente de la Fig. 7c) en donde se usó 11.250 EFs Q4 (PLANE42). La Fig. 9b) muestra la simulación de la topología 2D suavizada (Fig. 8a), en donde se usó una malla con 498.712 EFs PLANE42, la cual aseguró la convergencia del MEF. La Fig. 9c) muestra la simulación de la topología 3D suavizada (Fig. 8b) usando EFs prismáticos con tres GDL por nodo (SOLID45) con un total de 1.016.430 EFs, garantizando la convergencia del MEF. En las tres simulaciones se comprueba que el desplazamiento en el punto de interés (ver Fig. 2) es el máximo y en la dirección adecuada, lo cual verifica el resultado del MOT.



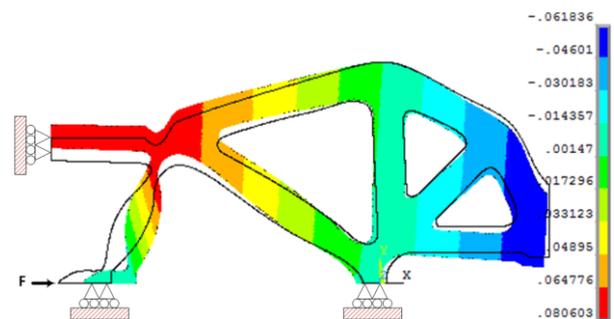
**Fig. 8.** Topología suavizada mediante curvas *splines* (geometría completa del MF tipo pinza).

La Tabla 3 muestra los valores numéricos de  $u_{out}$  obtenidos a partir de las simulaciones en ANSYS® y en donde se compara con el valor original obtenido por el MOT en MATLAB®. En dicha tabla se observa que la topología obtenida con el MOT en MATLAB® presenta un desplazamiento alto comprado con los demás (considerado el 100%), lo cual se debe a que en los posprocesamientos hubo un engrosamiento de los miembros estructurales, haciendo más rígido al MF. Cuantitativamente, al eliminar por completo la escala de grises de la topología original tomando todos los EFs cuyas pseudo-densidades estén por encima de 0.1 (ver Fig. 7c), el desplazamiento disminuye aprox. un 84%. Consecuentemente, en los diseños blancos/negros a pesar de tener cambios significativos como la forma de los contornos (suavizado de bordes) y/o de aumento de la dimensión (2D a 3D), estos factores no parecen alterar significativamente el desempeño del MF, lo que se ve reflejado en  $u_{out}$ . Por lo tanto, con el fin de evitar un deterioro en el desempeño de las estructuras diseñadas mediante el MOT al ser posprocesadas, es necesario usar técnicas que

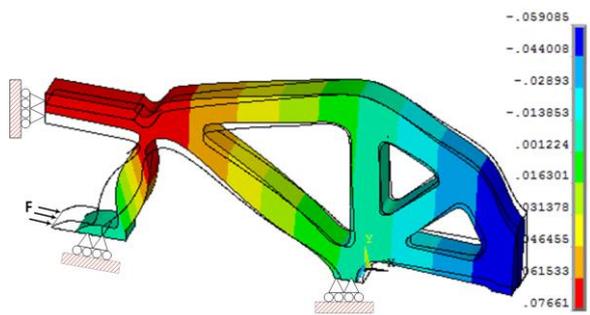
eliminen, o por lo menos, disminuyan los EFs con materiales intermedios (escala de grises) y así eliminar (disminuir) el posprocesamiento.



a) Simulación de la topología 2D con posprocesamiento básico (obtenida de la Fig. 7c).



b) Simulación de la topología 2D suavizada (obtenida de la Fig. 8a).



c) Simulación de la topología suavizada 3D (obtenida a partir de la Fig. 8b).

**Fig. 9.** Desplazamientos verticales (Y) en la parte simétrica de la pinza obtenidos con ANSYS®.

### 3.3 Manufactura del prototipo

En la Fig. 10 se muestra un prototipo funcional de la topología 3D (ver Fig. 9c)), el cual es manufacturado como se indicó en la sección 2.4. Un prototipo funcional es capaz de mostrar las características y patrones de comportamiento del producto final, aun cuando no dé valores exactos de su comportamiento. La Fig. 11 muestra una superposición de imágenes del prototipo sometido a una carga  $F$  y sin ella, donde se verifica el comportamiento adecuado del MF tipo pinza. Se observa que bajo la acción de la carga  $F$  la estructura del MF se deforma y se cierra la mordaza de la pinza, lo cual era lo esperado. Sin embargo, el desplazamiento es pequeño debido a varios factores. Uno de ellos se debe a que la impresión del prototipo con el ABS se hace por capas con finas líneas del polímero entrecruzadas, lo cual rigidiza la pieza. Otro factor que influye en el desempeño del prototipo son el tipo de condiciones de fronteras, ya que difieren un poco las usadas en el modelo (rodillos) y las del prototipo (empotramiento). Finalmente, debido al orden de los desplazamientos del MF, éstos se recomiendan para uso en la escala micro y nano.

**Tabla 3.** Desplazamientos en el punto de salida de interés  $u_{out}$ .

Método	Desplazamiento en $u_{out}$ (mm)	% relativo
MOT en MATLAB	-0,3765	100,0%
Posprocesamiento básico 2D (ANSYS)	-0,0616	16,4%
Topología 2D suavizada (ANSYS)	-0,0618	16,4%
Topología 3D suavizada (ANSYS)	-0,0591	15,7%

### 4. CONCLUSIONES

El diseño de un MF tipo pinza abordado mediante el modelo de diseño tradicional de Pahl y Beitz resulta adecuado, ya que disminuye el ensayo y error, sistematiza el proceso y conduce a diseños más fiables y en menor tiempo.

Con el fin de disminuir la heurística en el modelo de diseño considerado, se usa el MOT. El MOT es un método de optimización que permite el diseño conceptual de MFs de forma rápida y con resultados adecuados. Tan general es el método que con solo cambiar el dominio de diseño y condiciones de carga y frontera, se puede obtener diseños más complejos y novedosos desde el punto de vista de su geometría. Además, el MOT puede ser usado en diversidad de problemas y no solo en el de maximizar el desplazamiento, como se hizo en este trabajo.

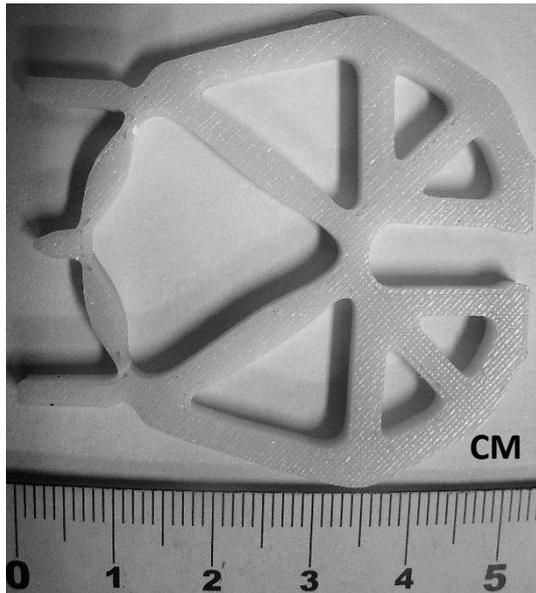
La etapa de diseño de detalle en el modelo de Pahl y Beitz se lleva a cabo con una serie de posprocesamientos aplicados a la topología y que disminuyen la complejidad de la misma haciéndola apta para su posterior manufactura por prototipado rápido.

Un prototipo funcional impreso en ABS con una impresora 3D se obtuvo, con el cual se verificó el adecuado funcionamiento del MF tipo pinza y concluyó el modelo de diseño abordado con una correcta solución al problema inicialmente planteado.

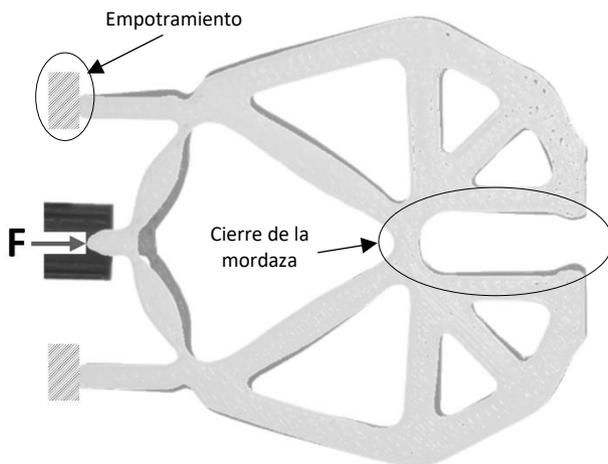
La integración de tecnologías de punta, como lo es el MOT y la manufactura aditiva dentro de un modelo de diseño tradicional, hacen que éste sea más eficiente, se generen diseños óptimos y se reduzca costos en el proceso de diseño, puesto que el tiempo de desarrollo del producto disminuye, se puede ahorrar material en la manufactura y la elaboración de planos en el diseño de detalle ya no es necesario.

### 5. AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece a la Universidad Nacional de Colombia por la financiación de su maestría durante el 2011 y 2012 con el programa "Beca Estudiantes Sobresalientes de Posgrado", con la cual se desarrolló parte de este trabajo. El segundo autor agradece a Colciencias el financiamiento parcial de su maestría con el Programa Jóvenes Investigadores 2011.



**Fig. 10.** Prototipo funcional en ABS del MF tipo pinza fabricado con manufactura aditiva (FDM).



**Fig. 11.** Prototipo funcional del MF tipo pinza. Gris claro: estructura sin carga. Gris oscuro: estructura cargada y deformada.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kota, S., Compliant systems using monolithic mechanisms, *Smart Mater. Bull.*, 3, 7–10, 2001.
- [2] Howell, L.L., Magleby, S. P. y Olsen, B. M., *Handbook of compliant mechanisms*, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2013.
- [3] Gad-el-Hak, M., *The MEMS handbook*, 2ª ed. Taylor & Francis, Boca Raton, FL., 2006.
- [4] Vogel, S., *Cats' paws and catapults: mechanical worlds of nature and people*. WW Norton & Co., New York, 1998.
- [5] Ramírez-Gil, F.J., *Diseño óptimo de micromecanismos tridimensionales con actuación electrotérmica utilizando optimización topológica y unidades de procesamiento gráfico (GPU)* [Tesis de maestría], Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [6] Sepúlveda-Orozco, E. *Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (energy harvesting) mediante optimización topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar*, [Tesis de maestría], Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [7] Lobontiu, N., *Compliant mechanisms: design of flexure hinges*, CRC Press, Boca Raton, 2003.
- [8] Smith, S.T., *Flexures: elements of elastic mechanisms*, Gordon & Breach, Amsterdam, 2000.
- [9] Bendsoe, M.P. y Sigmund, O., *Topology optimization: theory, methods, and applications*, Springer, 2ª Ed., Berlin, 2003.
- [10] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. y Grote, K.H., *Engineering design: a systematic approach*, Springer, London, 2007.
- [11] Ma, Z.D., Wang, H., Kikuchi, N., Pierre, C. y Raju, B. Experimental validation and prototyping of optimum designs obtained from topology optimization, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 31, (5), 333–343, 2006.

- [12] Cross, N., *Engineering design methods: strategies for product design*, Wiley, New York, 2000.
- [13] Narváez, C.A. y Garzón-Alvarado, D.A., Síntesis topológica de mecanismos flexibles para aplicaciones biomédicas, *Rev. Cuba. Investig. Bioméd.*, 29 (1), 1–16, 2010.
- [14] Napieralski, A., Napieralska, M., Szermer, M. y Maj, C., The evolution of MEMS and modelling methodologies, *Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, 31 (5), 1458–1469, 2012.
- [15] Deepak, S.R., Dinesh, M., Sahu, D.K. y Ananthasuresh, G.K., A comparative study of the formulations and benchmark problems for the topology optimization of compliant mechanisms, *J. Mech. Robot.*, 1(1), 1–8, 2008.
- [16] Howell, L. y Midha, A., Parametric deflection approximations for initially curved, large-deflection beams in compliant mechanisms, en *ASME Design Engineering Technical Conferences*, Irvine, California, USA, 1996.
- [17] Ananthasuresh, G.K., Kota, S. y Gianchandani, Y., A methodical approach to the synthesis of compliant micromechanisms. En: *V IEEE Solid-State Sensors and Actuators Workshop*, Hilton Head Island, SC, USA, 189–192, 1994.
- [18] Bendsoe, M. y Sigmund, O., Material interpolation schemes in topology optimization, *Arch. Appl. Mech.*, 69 (9), 635–654, 1999.
- [19] Cardoso, E.L. y Fonseca, J.S.O., Complexity control in the topology optimization of continuum structures, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 25 (3), 293–301, 2003.
- [20] Sigmund O. y Petersson, J., Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima, *Struct. Optim.*, 16 (1), 68–75, 1998.
- [21] Zhang, Y., Solving large-scale linear programs by interior-point methods under the Matlab environment, *Optim. Methods Softw.*, 10 (1), 1–31, 1998.
- [22] Haftka, R.T. y Gürdal, Z., *Elements of structural optimization*, Springer, 3ª ed., 1992.
- [23] Ramírez, F., Sepúlveda, E. y Montealegre, W., Diseño de mecanismos flexibles mediante el método de optimización topológica. En: *Métodos numéricos y sus aplicaciones en diferentes áreas*, Cali, Colombia, UAO, 545–552, Agosto, 2013.
- [24] Tovar, A., Optimización topológica con la técnica de los autómatas celulares híbridos, *Rev. Int. Metod. Numér. Para Cálculo Diseño En Ing.*, 21 (4), 365–383, 2005.
- [25] Sigmund, O., On the design of compliant mechanisms using topology optimization, *Mech. Struct. Mach.*, 25 (4), 493–524, 1997.
- [26] Vatanabe, S.L., Montealagre, W. y Silva, E.C.N., Modeling of functionally graded materials. En: *Comprehensive materials processing*, Elsevier, 261–282, 2014.
- [27] Gibson, I., Rosen, D. y Stucker, B., *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, Springer, New York, 2015.
- [28] Stratasys Ltd, *How FDM 3D Printing Works*. Disponible en: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>. [Consultado el 07-sep-2016].
- [29] Sigmund, O., A 99 line topology optimization code written in Matlab, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 21 (2), 120–127, 2001.
- [30] Méndez-Algarra, G.A. y Tovar, A., Integrating topology and shape optimization: a way to reduce weight in structural ship design, *Ship Sci. Technol.*, 3 (5), 83–92, 2009.