



DISEÑO ÓPTIMO DE ESTRUCTURAS POROSAS PARA FABRICACIÓN ADITIVA CON EL MÉTODO “SEQUENTIAL ELEMENT REJECTION AND ADMISSION” (SERA)

ALAIN GARAIGORDOBIL, RUBÉN ANSOLA, JAVIER CANALES

Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
Departamento de Ingeniería Mecánica
Ingeniero Torres Quevedo Plaza, 1, 48013 Bilbao, Bizkaia

(Recibido 15 de septiembre de 2020, para publicación 7 de enero de 2021)

Resumen – Las estructuras porosas poseen una relación “propiedades mecánicas/peso” muy elevada y una gran robustez respecto a variaciones en la orientación de las cargas, lo que las convierte en una muy interesante alternativa a sus contrapartes homogéneas. Un claro ejemplo de este tipo de sistemas se puede encontrar en el interior de las estructuras óseas, las cuales poseen un núcleo que presenta una topología muy intrincada y que se podría asemejar a un conjunto de subestructuras interconectadas. La complejidad de ese conjunto de subestructuras ha hecho que hasta hace relativamente poco su fabricación fuera prácticamente inabordable, eliminando así la posibilidad de hacer uso de ellas en aplicaciones reales. No obstante, desde la aparición de las tecnologías de fabricación aditiva, esta limitación ha sido superada abriendo un nuevo campo de investigación como es el diseño óptimo mediante métodos de optimización de topología de estructuras porosas. Este trabajo presenta un método de optimización de topología basado en el método *Sequential Element Rejection and Admission* que genera configuraciones interconectadas que dan lugar a una estructura porosa dentro de un dominio de diseño dado. El método realiza una subdivisión del dominio de diseño original en un número finito de subdominios, generando así una serie de problemas reducidos en los que se realiza una distribución de material óptima verificando restricciones locales de volumen. Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del procedimiento propuesto para generar estructuras porosas muy detalladas que se asemejan a las estructuras porosas que se pueden encontrar en la naturaleza.

Palabras clave – Optimización de topología, *infill*, estructuras porosas, métodos discretos, fabricación aditiva.

1. INTRODUCCIÓN

Las novedosas tecnologías de fabricación aditiva permiten construir componentes con geometrías de complejidad muy elevada, lo que las ha convertido en un importante aliado de los procesos de diseño óptimo mediante métodos de optimización de topología. La elevada complejidad geométrica que estos procesos de fabricación ponen a disposición del diseñador, permite, a su vez, hacer posible la fabricación de las generalmente complejas configuraciones obtenidas mediante la optimización de topología. Así mismo, la fabricación aditiva permite abordar la fabricación de complejos interiores de los componentes a los que comúnmente se los conoce como *infill*. De esta manera, la combinación de estas capacidades ha supuesto un importante avance en el diseño de estructuras ligeras o *lightweight structures*, donde es muy común desarrollar estructuras ligeras mediante la inserción de subestructuras en celosía en el interior de cáscaras externas formando un conjunto integrado. Esta práctica permite generar diseños porosos, reducir el volumen de material necesario y mejorar el rendimiento de las estructuras. En comparación con sus contrapartes sólidas, las estructuras porosas pueden presentar relaciones resistencia/peso más elevadas [1], así como una mayor estabilidad frente al fenómeno de pandeo [2].

La estructura interior de un elemento poroso se forma, generalmente, con celdas repetitivas previamente seleccionadas por el usuario dando lugar a geometrías regulares y anisotrópicas [3]. La predisposición de una topología para la celda repetitiva no es óptima desde el punto de vista del diseño, y es por eso que el rediseño y optimización del *infill* se presenta como un importante campo de investigación, siendo uno de sus objetivos el desarrollo de procedimientos integrados de optimización de topología de estructuras

porosas [4]. La mayoría de los recientes avances en este campo se desarrollan para métodos de optimización de topología basados en densidades (p.e. SIMP), entre los que podemos encontrar métodos con restricciones locales de volumen [5] y métodos de optimización conjunta *shell-infill* [6]. Alternativamente, también se han desarrollado métodos para la optimización de *coated structures* donde se incorpora una estrategia de filtrado de dos pasos que permite obtener un *infill* homogéneo en el interior de cáscaras exteriores [7].

Este trabajo propone un nuevo método de optimización de estructuras porosas basado en el método *Sequential Element Rejection and Admission* (SERA). El método SERA es un método discreto y bidireccional desarrollado por [8], donde el proceso de optimización trabaja con dos criterios diferenciados para la admisión y eliminación de elementos del dominio de diseño. Para obtener una información más detallada acerca del mismo, el lector es referido a [9] y [10]. El objetivo de este trabajo es desarrollar un método discreto para el diseño de estructuras porosas que se asemejen a las estructuras trabeculares sin necesidad de recurrir a procedimientos complejos de filtrado y proyección.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema que se presenta en este trabajo se enuncia como un problema de máxima rigidez, donde el objetivo es encontrar la distribución de material que minimice la energía elástica de deformación que almacena la estructura (o su equivalente complianza) bajo un caso de carga, condiciones de soporte y conjunto de restricciones dadas. La formulación se basa en la discretización por elementos finitos de un dominio Ω .

$$\text{Minimizar} \quad c(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} \quad (1)$$

$$\text{Sujeto a:} \quad \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (2)$$

$$g_s(\boldsymbol{\rho}) \leq V^{Lim} / s = 1, \dots, S \quad (3)$$

$$\rho_e = \rho_{min} \text{ or } 1 \quad (4)$$

donde $c(\boldsymbol{\rho})$ es la complianza de la estructura, $\boldsymbol{\rho}$ es el vector de variables de diseño, \mathbf{U} y \mathbf{K} son el vector de desplazamientos y la matriz global de rigidez, respectivamente; y \mathbf{F} el vector de las cargas aplicadas. El problema está sujeto a un conjunto de restricciones locales donde $g_s(\boldsymbol{\rho})$ denota la restricción número s y el subíndice S representa el número total de restricciones. El valor de cada una de las restricciones locales debe permanecer por debajo de un valor límite denominado V^{Lim} . El parámetro ρ_{min} es el valor mínimo de la densidad elemental, el cual en este trabajo es 10^{-9} . Al tratarse de un método discreto, la densidad elemental (ρ_e) únicamente puede tener dos valores, ρ_{min} o 1, representado un elemento vacío (o elemento virtual) y un elemento sólido (o elemento real), respectivamente.

Nótese que controlar valores locales puede dar lugar a un gran número de restricciones, no obstante, dado que la actualización de las variables de diseño se lleva a cabo mediante un método evolutivo en lugar de por una aproximación de programación matemática, la integración de estas restricciones en la formulación del problema es muy directa, por lo que no es necesario buscar una función que reduzca las restricciones locales a una única restricción global.

A diferencia de las topologías convencionales, las estructuras trabeculares están compuestas por subestructuras entrelazadas e interconectadas (Fig. 1). En este trabajo la formación de semejantes subestructuras está controlada por el conjunto de restricciones locales (3) el cual restringe el valor del volumen en el interior de pequeños subdominios en sustitución de la restricción global de volumen convencional. De esta manera, el volumen se cuantifica de forma local como el ratio entre la cantidad de material sólido y el volumen máximo dentro de los subdominios, (5).

$$g_s(\boldsymbol{\rho}) = \frac{V_s(\boldsymbol{\rho})}{V_{Tot}} = \frac{\sum_{m=1}^M (\rho_m \cdot v_m)}{V_{Tot}} \quad (5)$$

donde $V_s(\boldsymbol{\rho})$ es el volumen de subdominio número s que contiene M elementos finitos, ρ_m y v_m son la densidad y el volumen del elemento número m dentro del subdominio s , respectivamente, y V_{Tot} el máximo volumen del subdominio número s .

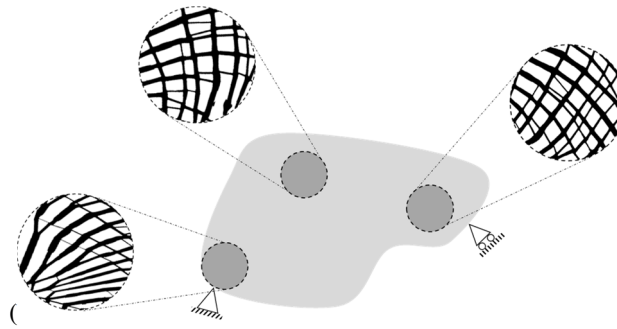


Fig. 1. Ejemplo de una estructura trabecular.

El conjunto de restricciones de volumen locales previene la formación de grandes áreas sólidas y grandes huecos vacíos ya que cada subdominio debe mantener un mínimo volumen de material. Esto permite guiar el problema hacia una distribución de material más dispersa evitando la excesiva acumulación de material, asemejándose a las estructuras óseas que podemos encontrar en la naturaleza.

Durante el proceso de optimización el dominio de diseño se divide en un número finito de subdominios rectangulares no superpuestos (Ω_s) de tamaños $R_1^s \times R_2^s$, dos parámetros que también permiten determinar la relación de aspecto de los subdominios (ver Fig. 2). La relación de aspecto será generalmente de valor unidad, pero, tal y como se verá más adelante, diferentes valores del mismo pueden prevenir la formación de distribuciones de material altamente anisotrópicas y evitar así la aparición de regiones débilmente conectadas.

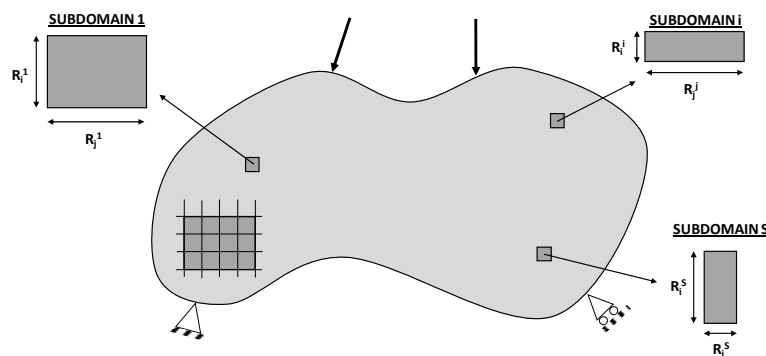


Fig. 2. División del dominio de diseño en subdominios.

3. PROCESO DE ADMISIÓN Y ELIMINACIÓN DE ELEMENTOS PARA ESTRUCTURAS POROSAS

Este trabajo adapta el proceso del método SERA propuesto en [9] a la optimización de estructuras porosas o trabeculares. La novedad del método consiste en dividir el dominio de diseño en pequeños subdominios de diferentes tamaños y relaciones de aspecto, dentro de los cuales se lleva a cabo el proceso de distribución de material.

3.1. Determinación del número de elementos a introducir y a eliminar

El proceso de optimización comienza con el cálculo de la variación de la fracción de volumen y el número de elementos que serán introducidos y eliminados del dominio de diseño. Estas operaciones dependen de tres parámetros: el *Progression Rate* (PR), el *Smoothing Ratio* (SR), y el *Material redistribution fraction*

(β). Los valores típicos de estos parámetros varían entre: $PR \in [0.01-0.09]$, $SR \in [1.1-1.9]$ and $\beta \in [0.001-0.009]$.

El PR determina la fracción de volumen que debe alcanzarse en la presente iteración $V(i)$, (6). Pasar de $V(i-1)$ a $V(i)$ supone un cambio en la fracción volumétrica $\Delta V(i)$ dado por (7), variación que se divide en dos valores, una cantidad de material que será añadido, $\Delta V_{Add}(i)$, y una cantidad de material que será eliminado del dominio de diseño, $\Delta V_{Rem}(i)$. El valor de estas dos últimas cantidades de material depende del parámetro SR , tal y como se puede observar en (8)-(9). Una vez el volumen objetivo es alcanzado, el parámetro β determina la relativamente baja cantidad de material que será redistribuida hasta que el problema converge, (10).

$$V(i) = \max \left((V(i-1) \cdot (1 - PR)), V^{Lim} \right) \quad (6)$$

$$\Delta V(i) = |V(i) - V(i-1)| \quad (7)$$

$$\Delta V_{Add}(i) = \Delta V(i) \cdot (SR - 1) \quad (8)$$

$$\Delta V_{Rem}(i) = \Delta V(i) \cdot SR \quad (9)$$

$$\Delta V_{Add}(i) = \Delta V_{Rem}(i) = \beta \cdot V^{Lim} \quad (10)$$

Una vez se han determinado las cantidades globales de material que deben introducirse y eliminarse, es posible determinar el número de elementos que deberán cambiar su estado material dentro de cada uno de los subdominios, $\Delta E_{Rem}(i)$ y $\Delta E_{Add}(i)$, mediante (11)-(12).

$$\Delta E_{Rem}(i) = \Delta V_{Rem}(i) \cdot R_1^s \cdot R_2^s \quad (11)$$

$$\Delta E_{Add}(i) = \Delta V_{Add}(i) \cdot R_1^s \cdot R_2^s \quad (12)$$

3.2. Análisis de sensibilidad

En este apartado se introduce el cálculo de las sensibilidades de los elementos finitos que forman el dominio de diseño. Debe tenerse en cuenta que el proceso de optimización ha de garantizar la conectividad de las diferentes subestructuras, y es por eso que el proceso de cálculo de las sensibilidades, así como su posterior filtrado (ver sección 3.4), se realiza de forma global, teniendo en cuenta la influencia de cada elemento en el conjunto total del dominio. Esta forma de proceder favorece la interconexión suave entre las subestructuras formadas en los subdominios colindantes.

El proceso de cálculo de las sensibilidades no se incluye en este trabajo, pero el lector es referido a [9,10]. De esta manera, las sensibilidades vendrán dadas por las siguientes expresiones:

$$\alpha_{e_R} = \mathbf{U}_e^T \cdot \mathbf{k}_e \cdot \mathbf{U}_e \quad (13)$$

$$\alpha_{e_V} = -\mathbf{U}_e^T \cdot \mathbf{k}_e \cdot \mathbf{U}_e \quad (14)$$

donde \mathbf{U}_e es el vector de desplazamientos del elemento e debido a la aplicación de las cargas, y \mathbf{k}_e representa la matriz de rigidez elemental. Este valor de la sensibilidad determina qué elementos serán introducidos o eliminados para que la función objetivo sea minimizada.

3.3. Proceso de introducción y eliminación de material

Una vez se han calculado los valores de las sensibilidades de los elementos, comienza el proceso de introducción y eliminación de material. En este paso, la matriz de sensibilidad se divide en submatrices, donde cada una de ellas se corresponde como uno de los subdominios. Continuando con el proceso establecido por el método SERA, pero ahora adaptado al diseño óptimo de estructuras porosas, cada una de las submatrices de sensibilidad se separa en dos listas, una para los elementos reales (α_{e_R}) y otra para los elementos virtuales (α_{e_V}), las cuales se ordenan en orden creciente (ver Fig. 3).

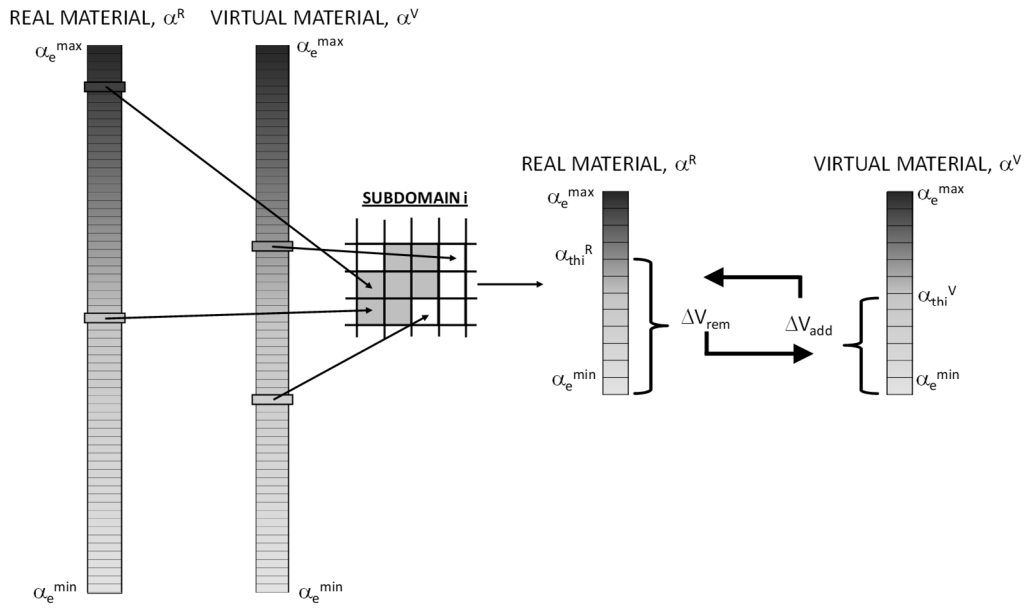


Fig. 3. Listas de sensibilidades locales.

Habiendo definido el problema de optimización como el problema de disminuir el valor de la función objetivo, los elementos que cambiarán su estado material serán aquellos situados en la parte baja de ambas listas. El valor de corte de las sensibilidades para las cuales los elementos pasan de una lista a la otra se determina mediante dos valores umbral, uno para la lista de elementos reales (α_{ThR}^S) y otro para la lista de elementos virtuales (α_{ThV}^S). Tal y como es posible observar en las ecuaciones (15)-(16), los valores umbral se corresponden con los valores de sensibilidad de los elementos situados en las posiciones ΔE_{Rem} y ΔE_{Add} desde la base de las listas.

$$\alpha_{ThR}^S = \alpha_{eR}(R_1^S \cdot R_2^S - \Delta E_{Rem}) \tag{15}$$

$$\alpha_{ThV}^S = \alpha_{eV}(R_1^S \cdot R_2^S - \Delta E_{Add}) \tag{16}$$

3.4. Filtro de sensibilidades

En este trabajo se recurre al filtro de sensibilidades propuesto por [11], el cual modifica el valor de la sensibilidad de los elementos basándose en la ponderación de los valores contenidos dentro de un recinto definido por un radio r_{min} .

$$\tilde{\alpha}_e = \frac{\sum_{j=1}^N w_j \cdot \rho_j \cdot \alpha_j}{\rho_e \cdot \sum_{j=1}^N w_j} \tag{17}$$

$$w_j = \max(0, r_{min} - dist(e, j)); \{j \in O / dist(e, j) \leq r_{min}\}; e = 1, \dots, N \tag{18}$$

En las ecuaciones anteriores $\tilde{\alpha}_e$ es el valor filtrado de la sensibilidad del elemento e , N es el número de elementos en el dominio, y ρ_j y α_j son la densidad y la sensibilidad del elemento j . De acuerdo con (18), el factor peso w_j para el elemento j decrece de forma lineal a medida que el elemento j se aleja del elemento e , donde $dist(e, j)$ es la distancia entre los centros de ambos elementos. Para aquellos elementos fuera del radio de filtrado, el factor peso es igual a cero.

3.5. Criterio de convergencia

El criterio de convergencia se define como el cambio de la función objetivo en las últimas 10 iteraciones, ecuación (19). Este número de iteraciones ha demostrado ser adecuado para el estudio de la convergencia.

$$\varepsilon_i = \frac{|\sum_{i-9}^{i-5} c_i - \sum_{i-4}^i c_i|}{\sum_{i-4}^i c_i} < \varepsilon_{Lim} \quad (19)$$

Siendo i la iteración actual, c_i es el valor de la función objetivo, ε_i es el valor de convergencia en la iteración i , y ε_{Lim} es el valor límite que controla la convergencia del proceso de optimización.

4. EJEMPLOS

En esta sección se va a introducir un ejemplo demostrativo de las capacidades del método propuesto para el diseño óptimo de estructuras porosas.

4.1. Viga cantiléver

El ejemplo que se propone contempla una viga cantiléver cuyo extremo izquierdo está empotrado y que soporta una carga vertical en el centro del extremo derecho, tal y como se expone en la Fig. 4a. El dominio de diseño se discretiza con 1200x600 elementos finitos cuadrados y de lado unidad, la fracción volumétrica objetivo es 0.4 y el radio de filtrado tiene un valor de $r_{min}=2$. Los parámetros del SERA se definen como $SR=1.9$, $PR=0.01$ y $\beta=0.001$. Para el diseño poroso se utilizarán subdominios de tamaño $R_1 \times R_2 = 20 \times 20$ elementos.

La topología optimizada convencional se muestra en la Fig. 4(b) y demuestra cómo sin restricciones locales el diseño optimizado resulta en una topología con grandes miembros sólidos y favorece la nucleación de grandes agujeros. Sin embargo, al integrar el conjunto de restricciones locales previamente analizado, el problema converge en una topología más intrincada y dispersa, formando subestructuras entrelazadas e interconectadas, Fig. 4(c).

Las diferencias entre ambas topologías son evidentes. En este último caso, existe una mínima cantidad de material que debe permanecer en cada subdominio, material que es orientado según las tensiones principales, lo que en ocasiones puede resultar en regiones altamente anisotrópicas o uniaxiales debido a la presencia de una tensión principal dominante. Este hecho puede ser observado en algunas regiones en las partes superior e inferior del resultado de la Fig. 4(c).

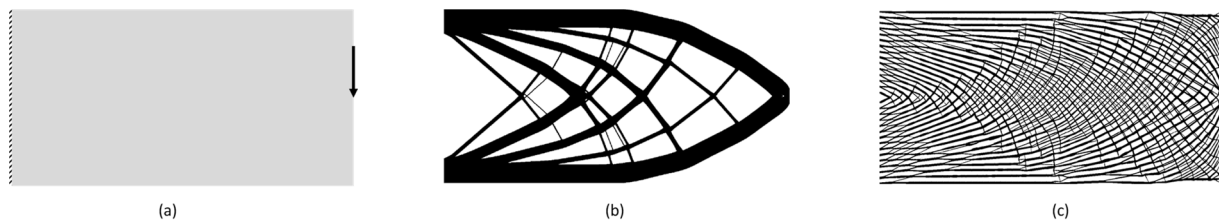


Fig. 4. (a) Dominio de diseño de la viga cantiléver. (b) Topología optimizada convencional de la viga cantiléver. Función a minimizar $c=146.027$. (c) Diseño poroso. Función a minimizar $c=229.288$.

La restricción de mantener una cierta cantidad de volumen en cada subdominio no favorece la rigidez de la estructura, pero sí favorece un mejor comportamiento frente a variaciones del sistema de cargas y promueve un mejor comportamiento *fail-safe*.

A fin de profundizar en el comportamiento del método que se propone, en las siguientes líneas se estudiará el efecto de diferentes fracciones volumétricas y radios de filtrado. Para ello se propone el diseño de dominio anteriormente presentado, se mantienen los valores de los parámetros de SERA, y se plantea un tamaño de subdominios generalizado con $R_1 \times R_2 = 20 \times 20$. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5, donde cada línea representa un valor del radio de filtrado y cada columna representa un valor de la fracción de volumen. Como puede verse, las distribuciones de material obtenidas asemejan estructuras porosas para todas las combinaciones de la fracción de volumen y el radio de filtrado.

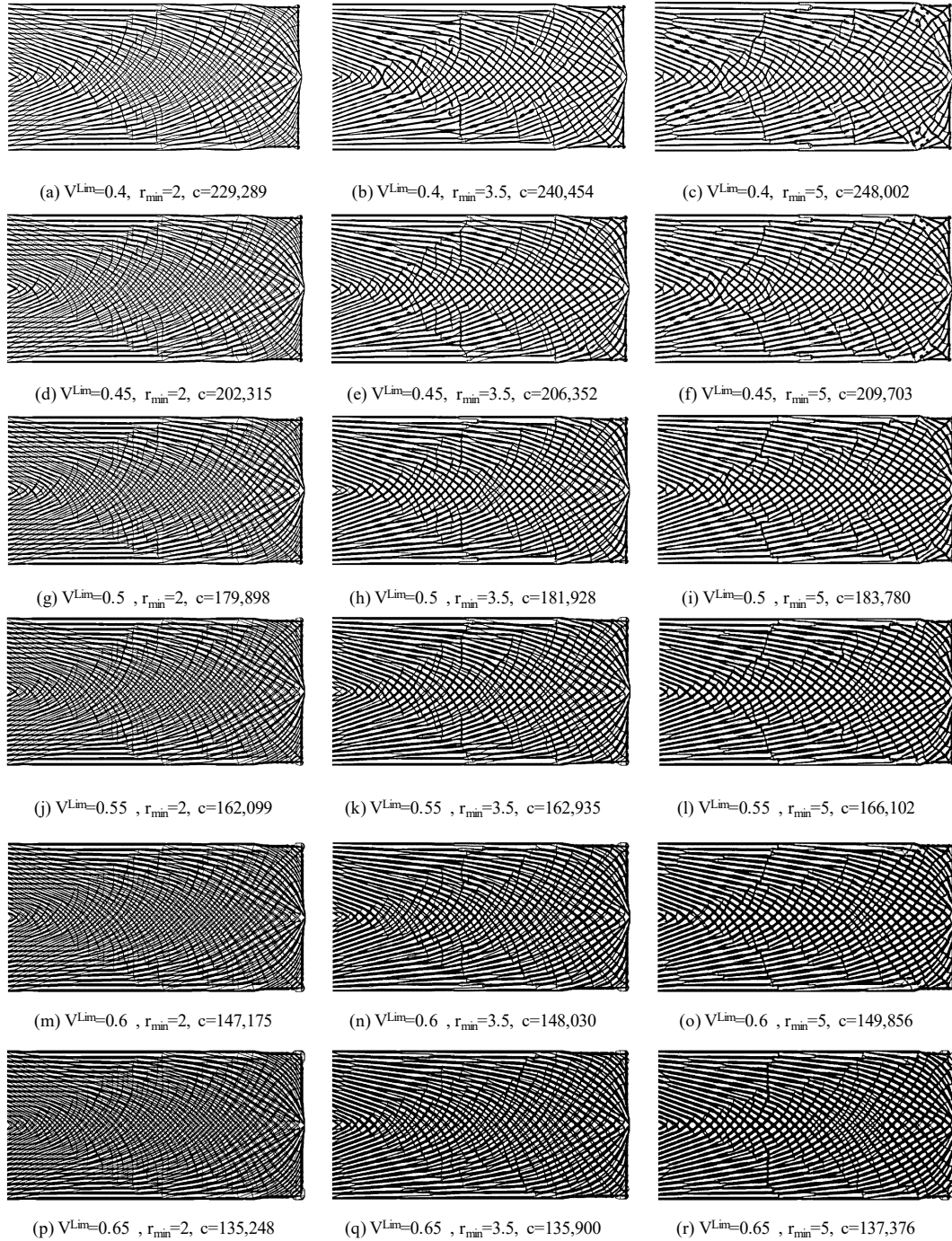


Fig. 5. Topologías porosas optimizadas de una viga cantiléver con diferentes radios de filtrado y fracciones volumétricas.

Cada uno de los resultados presentados en la Fig. 5 está acompañado con el valor correspondiente de la función objetivo, lo que demuestra la relación directa entre el radio de filtrado y la energía elástica que almacena la estructura. A medida que el filtro decrece, también lo hace la función objetivo (Fig. 6). También es posible apreciar que el efecto del radio de filtrado se ve contrarrestado por fracciones volumétricas elevadas, y a medida que esta fracción se aproxima a la unidad, las funciones objetivo convergen a un valor similar.

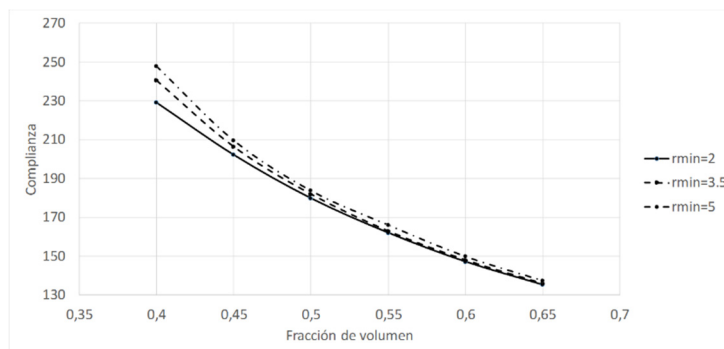


Fig. 6. Evolución de la complianza de la estructura en función del volumen y el radio de filtrado.

El radio de filtrado permite controlar el nivel de detalle y la porosidad de los diseños resultantes. Al observar dos resultados cualesquiera en la misma línea de la Fig. 6, es fácil apreciar que aquel con un menor radio de filtrado es el que también tiene una mayor densidad de poros. Por tanto, es posible concluir que aquel radio que comprende menor número de elementos favorece la formación de subestructuras más finas e incrementa la porosidad de la estructura. Finalmente, cabe destacar que todos los resultados demuestran tener una buena conectividad entre cualquiera de las subestructuras y aquellas que la rodean.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un método de optimización de topología para el diseño de estructuras porosas basado en el ya establecido método *Sequential Element Rejection and Admission*. Para adaptar el método al diseño de estructuras porosas se ha recurrido a un conjunto de restricciones de volumen locales que permiten mantener una mínima cantidad de volumen dentro de los subdominios a los que cada una de las restricciones corresponde. Para garantizar la conectividad entre las subestructuras, tanto el análisis de sensibilidades, como el filtrado de las mismas se lleva a cabo de forma global, teniendo en cuenta los aportes de cada uno de los elementos presentes en la estructura. La eficacia del procedimiento que se propone se ha demostrado mediante un ejemplo, donde, efectivamente, pueden observarse factores importantes como la conectividad de las subestructuras, una disposición del material más dispersa y orientada según las tensiones principales, y un elevado nivel de porosidad. De esta manera, se puede concluir que el desarrollo planteado en este trabajo es una herramienta robusta para el diseño de estructuras porosas y que, además, los resultados obtenidos asemejan distribuciones de material similares a las que pueden encontrarse en las estructuras trabeculares.

REFERENCIAS

- [1] L. Lu, B. Chen, A. Sharf, H. Zhao, Y. Wei, Q. Fan, X. Chen, Y. Savoye, C. Tu, D. Cohen-Or, "Build-to-last: Strength to weight 3D printed objects", *ACM Trans. Graph.*, 33, 1–10 (2014), doi:10.1145/2601097.2601168
- [2] A. Clausen, N. Aage, O. Sigmund, "Exploiting Additive Manufacturing Infill in Topology Optimization for Improved Buckling Load", *Engineering.*, 2, 250–257 (2016), doi:10.1016/J.ENG.2016.02.006
- [3] J. Wu, C.C.L. Wang, X. Zhang, R. Westermann, "Self-supporting rhombic infill structures for additive manufacturing", *Comput. Des.* 80, 32–42 (2016), doi:10.1016/j.cad.2016.07.006
- [4] J. Plocher, A. Panesar, "Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures", *Mater. & Des.*, 183, (2019), doi:10.1016/j.matdes.2019.108164
- [5] J. Wu, N. Aage, R. Westermann, O. Sigmund, "Infill Optimization for Additive Manufacturing—Approaching Bone-Like Porous Structures", *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, 24, 1127–1140 (2018), doi:10.1109/TVCG.2017.2655523

- [6] J. Wu, A. Clausen, O. Sigmund, "Minimum compliance topology optimization of shell–infill composites for additive manufacturing", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 326, 358–375 (2017), doi:10.1016/j.cma.2017.08.018
- [7] A. Clausen, N. Aage, O. Sigmund, "Topology optimization of coated structures and material interface problems", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 290, 524–541 (2015), doi:10.1016/j.cma.2015.02.011
- [8] G. Rozvany, O. Querin, "Theoretical Foundations of Sequential Element Rejections and Admissions (SERA) Methods and Their Computational Implementation in Topology Optimization", in: 9th AIAA/ISSMO *Symp. Multidiscip. Anal. Optim.*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia (2002), doi:10.2514/6.2002-5521
- [9] R. Ansola Loyola, O.M. Querin, A. Garaigordobil Jiménez, C. Alonso Gordo, "A sequential element rejection and admission (SERA) topology optimization code written in Matlab", *Struct. Multidiscip. Optim.*, 58 1297–1310 (2018), doi:10.1007/s00158-018-1939-x
- [10] O.M. Querin, M. Victoria, C. Alonso, R. Ansola, P. Martí, *Topology Design Methods for Structural Optimization*, Elsevier, London (2017)
- [11] O. Sigmund, J. Petersson, "Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima", *Struct. Optim.* 16, 68–75 (1998), doi:10.1007/BF01214002

OPTIMUM DESIGN OF POROUS STRUCTURES FOR ADDITIVE MANUFACTURING WITH THE SEQUENTIAL ELEMENT REJECTION AND ADMISSION (SERA) METHOD

Abstract – Porous structures show important mechanical properties to weight ratio and great robustness regarding variations in the load direction, and because of that, they are considered interesting alternatives to their homogeneous counterparts. One clear example of such structures is found in the interior of bone structures that possess an intricate nucleus similar to a set of interconnected substructures. Their geometrical complexity made porous designs unattainable by conventional manufacturing techniques, so they would hardly be part of any practical application. Nevertheless, the relatively recent appearance of Additive Manufacturing considerably reduced this bump and opened a new era of investigations where optimum porous structures are sought through topology optimization techniques. This work introduces a topology optimization method based on the Sequential Element Rejection and Admission (SERA) method that generates optimized porous structures by forming optimal interconnected substructures within a fixed design domain. The method performs a subdivision of the original domain into a finite number of subdomains generating a series of reduced problems where an optimal material redistribution process is performed complying with local volume fractions. The results demonstrate the effectiveness of the presented procedure to generate detailed porous structures that mimic those that can be found in nature.

Keywords – Topology Optimization, Infill, Porous Structures, Discrete Methods, Additive Manufacturing.