

PAPER REF: 7336

DISEÑO DE PARCHES DE MATERIAL COMPUESTO MEDIANTE UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Matías Braun^{1,2(*)}, Edgardo I. Villa¹, Claudio G. Rocco¹

¹Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 47 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.

²Consejo Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET) CCT La Plata Calle 8 N° 1467, (B1904CMC), La Plata, Buenos Aires, Argentina.

(*)*Email*: matias.braun@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

Tradicionalmente, la rehabilitación de las estructuras metálicas afectadas por alguna patología que pone en riesgo su vida en servicio se realiza empleando distintas técnicas de reparación, como soldadura, atornillado de parches o refuerzos de placas de acero. No obstante, en los últimos años se ha extendido el uso de parches adheridos de materiales compuestos, para llevar a cabo reparaciones en componentes dañados. Típicamente, la metodología empleada para el diseño de estos parches de material compuesto se basa en procesos iterativos, donde se adoptan arbitrariamente parches con distinta geometría y se verifica la estabilidad de la fisura en cada caso. Sin embargo, este proceso de diseño no garantiza que la forma del parche sea la óptima, sino que permite establecer comparativamente la eficiencia de una configuración determinada en relación con otra. En el presente trabajo se ha propuesto un algoritmo de optimización topológica aplicado a materiales ortótropos. Con el objetivo de evaluar la capacidad del modelo se ha analizado el caso práctico de un componente mecánico, fisurado y reparado con parches de material compuesto, solicitado a distintos tipos de cargas. Los resultados obtenidos se han comparado con estudios paramétricos llevados a cabo por otros autores. Este análisis comparativo ha permitido evidenciar el potencial del algoritmo desarrollado para ser aplicado al diseño eficiente de parches de material compuesto.

Palabras-clave: Materiales compuestos, optimización topológica, método de elementos finitos.

INTRODUCCIÓN

El uso de materiales compuestos para llevar a cabo reparaciones adheridas a componentes estructurales presenta numerosas ventajas, que incluyen: baja densidad, mejora del comportamiento a fatiga, reducción de costes y una excelente capacidad de conformación [1-4]. Además, este tipo de reparaciones proporcionan una transferencia de carga más eficiente y uniforme en comparación con las reparaciones mecánicas, que producen un incremento de la concentración de esfuerzos.

Debido al aumento de potencia de cálculo, el método de elementos finitos ha contribuido considerablemente al conocimiento del comportamiento mecánico de defectos reparados mediante parches y ha sido utilizado por muchos autores. Dando lugar a procesos de diseño de estos parches de material compuesto, basados en métodos iterativos donde se adoptan arbitrariamente parches con distinta geometría y se verifica el estado tensional de los distintos elementos estructurales, en cada caso. Sin embargo, este proceso de diseño no garantiza que la

forma del parche sea la óptima, sino que permite establecer comparativamente la eficiencia de una configuración determinada en relación a otra [5-9].

Con el objetivo de obtener diseños más eficientes, en este trabajo se ha propuesto un algoritmo de optimización topológica que ha sido desarrollado en el lenguaje de programación de MatLab, empleando el código comercial de elementos finitos Abaqus/Standard [10] para el cálculo del estado tensional de los componentes mecánicos. Con el fin de evaluar la capacidad del modelo, se ha estudiado el caso de un panel fisurado de aluminio, sometido a sollicitaciones de tracción y reparado con parches de material compuesto. Los resultados han sido comparados con datos de la literatura, donde se ha podido observar que el algoritmo implementado permite obtener geometrías de parches eficientes.

DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

El algoritmo de optimización topológica propuesto consiste básicamente en detectar y eliminar los elementos menos solicitados, de la malla de EF con la que es discretizado el parche. En la Figura 1 se presenta un diagrama de flujo donde se describe el proceso de optimización topológica.

Se parte de una geometría inicial de parche que es definida arbitrariamente, luego se calculan las tensiones mediante el código comercial de EF Abaqus/Standard [10], y a partir de un algoritmo desarrollado en MatLab se determinan los elementos menos solicitados. Una vez eliminados estos elementos, se vuelven a calcular las sollicitaciones para la nueva configuración.

La cantidad de elementos eliminados en cada iteración es fijada al inicio del análisis. Este parámetro es definido de modo tal el número de elementos eliminados en cada iteración no sea demasiado elevado, con el objetivo de evitar que ocurra una variación excesiva de la distribución de tensiones de una iteración a otra. También es necesario garantizar que el número de elementos a eliminar no sea extremadamente pequeño, ya que esto conduciría a un importante número de iteraciones, lo que se vería traducido en un elevado coste computacional.

Los resultados presentados en este trabajo han sido obtenidos con un porcentaje de eliminación de elementos del 1 %, en cada iteración.

Típicamente, en los modelos de optimización topológica se emplea como parámetro de sollicitación del elemento la tensión de Von Mises. Debido a que este criterio no es aplicable a materiales ortótropos se propone determinar la sollicitación de los elementos que componen el parche mediante el criterio de rotura de Tsai-Hill.

En la ecuación (1) se muestra el criterio Tsai-Hill en su versión simplificada para dos dimensiones, en el que se considera que un punto determinado de la lámina ha fallado cuando l_f alcanza el valor de la unidad.

$$L_f = \left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_{11} \sigma_{22}}{Y^2} + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \quad (1)$$

donde X es la resistencia en la dirección de las fibras, Y la resistencia en la dirección perpendicular, S la resistencia a cortadura, σ_{11} la tensión en la dirección de las fibras, σ_{22} la tensión en la dirección perpendicular, y σ_{12} es la tensión de cortadura.

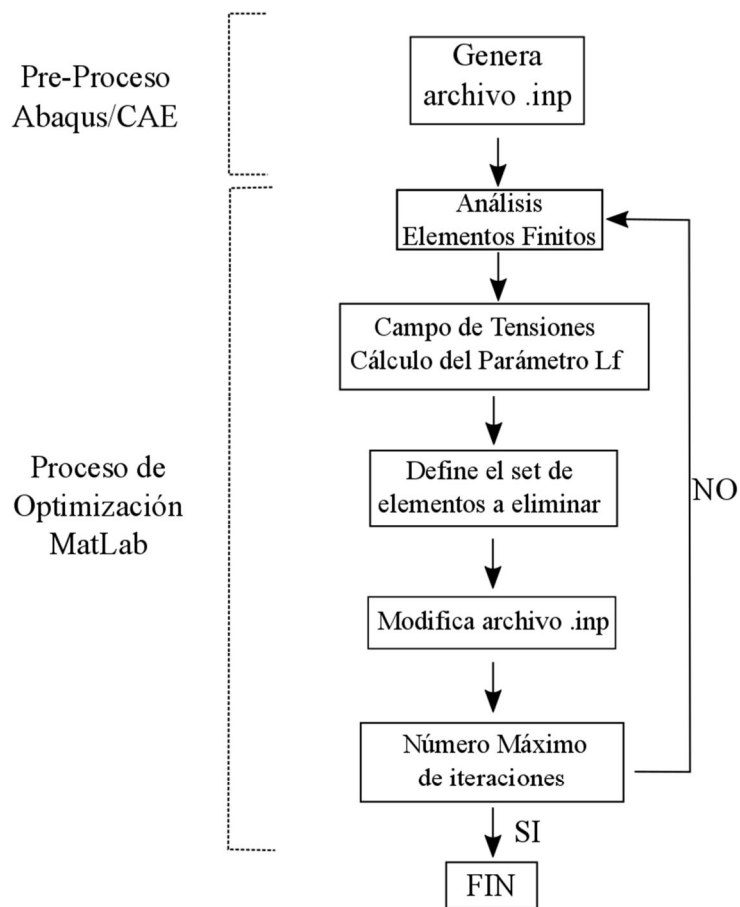


Fig. 1 - Diagrama de flujo del algoritmo de optimización topológica.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ANALIZADO

El algoritmo de optimización topológica desarrollado en este trabajo se aplica al diseño de parches de material compuesto para la reparación de estructura. En este problema intervienen tres partes: la estructura a reparar, el material compuesto de refuerzo, y por último el adhesivo, que permite materializar la adherencia entre el parche y la estructura a reparar (ver Figura 2).

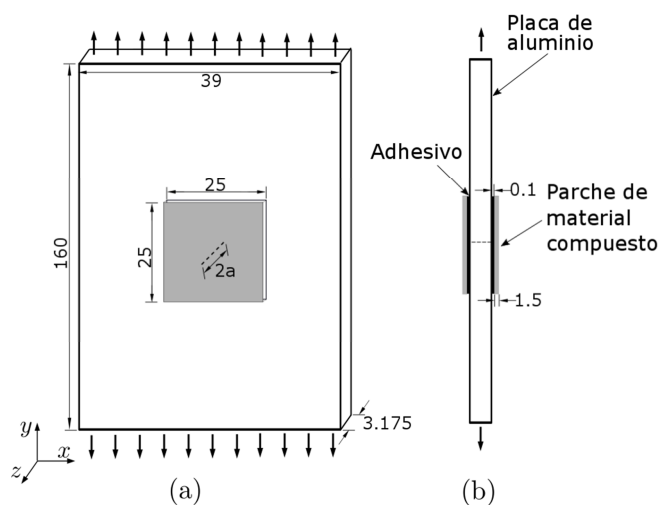


Fig. 2 - Vista frontal (a) y de perfil (b) de la geometría y condiciones de contorno del problema analizado.

El problema de optimización consiste en dimensionar la forma de dicho parche, garantizando la estabilidad de la fisura del elemento estructural. Para ello se considera que la geometría de la placa, y sus solicitaciones se encuentran fijas a lo largo del análisis, mientras que las superficies del adhesivo y del parche se reducen, manteniendo sus espesores constantes.

En la Figura 1 se describe el caso estudiado, que consiste en un panel fisurado de aluminio tipo 2014 T6 sometida a una tensión de tracción de 121.11 MPa. Se trata de una placa rectangular de 160x39 mm², y 3.175 mm de espesor que contiene una fisura inclinada y centrada, de 10 mm de longitud.

Los parches son de láminas unidireccionales de carbono/epoxi, de 0.375 mm de espesor. La dirección de las fibras coincide con la dirección de aplicación de las cargas. La adherencia entre la placa y el material compuesto se ha materializado mediante un adhesivo AV138/HV998.

Las propiedades empleadas para modelar el aluminio, el adhesivo y el parche han sido extraídas de la literatura. En la Tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas adoptadas para estos materiales, donde E es el módulo de Young, G el módulo de cortadura, y ν el coeficiente de Poisson.

Tabla 1 - Propiedades mecánicas de los materiales considerados [9].

Propiedades	Materiales		
	Aluminio	Refuerzo Carbono/Epoxi	Adhesivo
E/E_{11} [GPa]	73.1	135	4.59
E_{22} [GPa]	-	9	-
E_{33} [GPa]	-	9	-
ν/ν_{12}	0.30	0.30	0.47
ν_{13}	-	0.02	-
ν_{23}	-	0.02	-
G_{12} [GPa]	-	8	-
G_{13} [GPa]	-	5	-
G_{23} [GPa]	-	5	-

Todas las partes del modelo son discretizadas con elementos tridimensionales continuos de integración reducida de 8 nodos (C3D8R) [10]. Empleándose 123054, 26569 y 26569 elementos para discretizar la lámina, el adhesivo y el parche, respectivamente.

Con el objetivo de reducir el costo computacional, se ha modelado la mitad del espesor de la placa, introduciendo la condición de simetría correspondiente en el plano interior de la misma.

Para modelar la interacción entre el material compuesto, el adhesivo y la placa de aluminio se emplean contactos tipo *tie*, considerando una adherencia perfecta de los materiales.

Se ha asumido que el frente de fisura es perpendicular al plano del panel, por lo tanto el Modo III del FIT se desprecia. El FIT es deducido a partir de la Integral J utilizando la siguiente expresión:

$$J = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} \quad (2)$$

donde E' es el módulo de elasticidad efectivo, que en condiciones de tensiones planas es igual al módulo de Young. La Integral J ha sido calculada considerando 8 contornos de integración

para cada punto del extremo de fisura. El plano de cada contorno se ha definido en la dirección normal al frente de fisura.

RESULTADOS

Con el objetivo de estimar la eficiencia de la forma del parche sobre paneles fisurados sometidos a modos mixtos, además del FIT en modo I y II, se suele emplear el parámetro R el cual es definido de acuerdo a la siguiente expresión [9]:

$$R = \sqrt{\left(\frac{K_I - K_I^R}{K_I}\right)^2 + \left(\frac{K_{II} - K_{II}^R}{K_{II}}\right)^2} \quad (3)$$

donde K_I y K_{II} representan los valores del FIT de la placa sin reparar en modo I y II, respectivamente. Mientras que K_I^R y K_{II}^R representan el FIT en modo I y II de la placa reparada. Este parámetro R combina la reducción del FIT en modo I y II, lo que permite comparar la eficiencia de la forma del parche. Valores altos de R indican una mejor performance, con respecto a la reducción del FIT. En la comparación de resultados del FIT y R , se han considerado únicamente los valores correspondientes al plano medio de la placa.

En la Figura 3 se pueden ver las geometrías de los parches obtenidas con el algoritmo propuesto, para tamaños de 616, 706 y 804 mm². En esta figura se han señalado en rojo los elementos eliminados, representando en verde la geometría final del parche.

Como puede verse, para tamaño grandes de parche la geometría adopta una forma octagonal, lo que coincide con los resultados presentados por otros autores [9], con la diferencia de que se obtiene otra proporción de lados, y por ello una solución más eficiente. Mientras que para tamaños más pequeños la forma más eficiente pasa a ser un hexágono, geometría no analizada en otros trabajos.

Es importante destacar que la forma más eficiente de parche cambia en función de las dimensiones del mismo, lo que tiene concordancia con los resultados presentados por otros autores. También es importante señalar que las geometrías obtenidas no presentan huecos en su interior, ni formas irregulares, que podrían dar lugar a soluciones inválidas a fines prácticos.

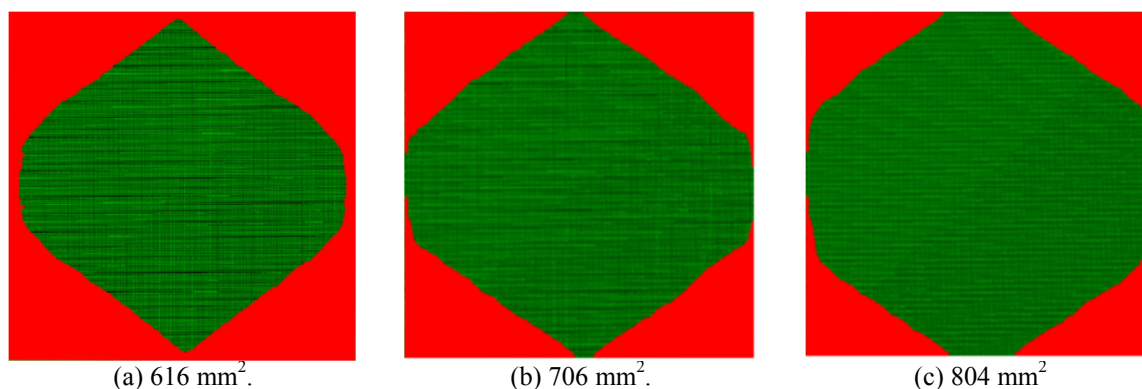


Fig. 3 -. Topologías de parches obtenidas con el algoritmo de optimización.

En la Figura 4 se muestran los valores del parámetro R en función del área del parche. Los resultados han sido comparados con datos presentados por Ramji *et al.* [9], para distintas geometrías de parches. En esta figura puede observarse que los resultados del algoritmo propuesto presentan la solución más eficiente, si tenemos en cuenta que para todos los tamaños de parche analizados se tiene un valor mayor del parámetro R .

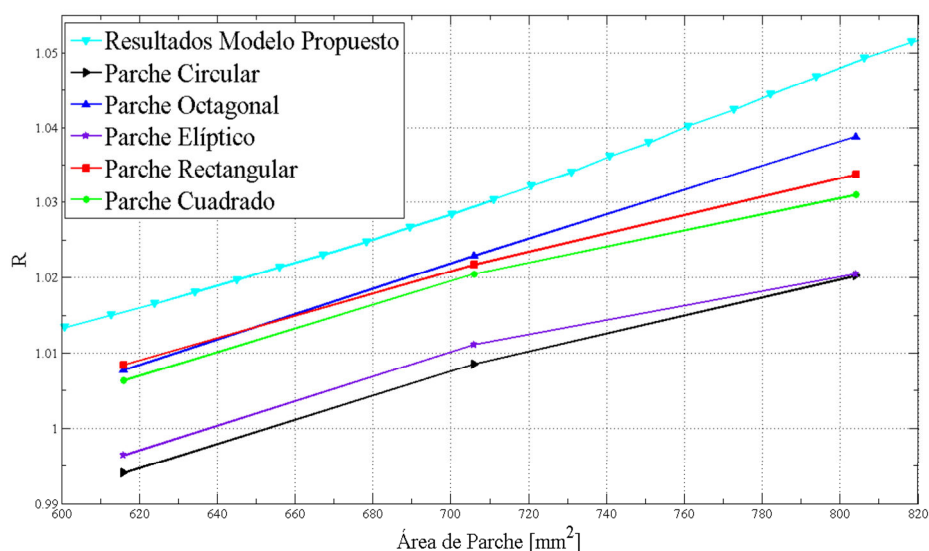


Fig. 4 - Variación del parámetro R en función del tamaño del parche.

Con el objetivo de estudiar la dependencia del modelo con la geometría inicial de parche, se ha analizado una geometría inicial de parche tipo circular y otra con forma de romboidal. En la Figura 5 se muestran las formas obtenidas para cada geometría inicial de parche. Como puede verse, el modelo presenta una dependencia con la geometría inicial, sin embargo, la topología del parche es siempre de tipo hexagonal.

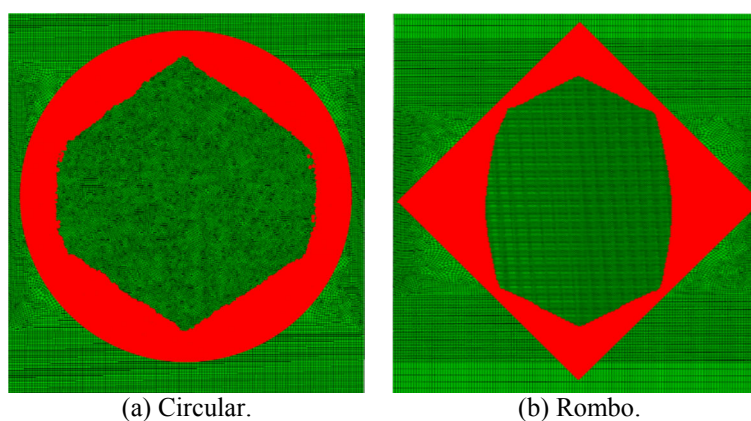


Fig. 5 -. Topologías de parches obtenidas con el algoritmo de optimización para distintas geometrías iniciales de parche.

En la Figura 6 se presenta el parámetro R obtenido en función del tamaño del parche, para cada geometría inicial de parche. Los resultados muestran que una geometría inicial de tipo cuadrado es más eficiente que una circular, y esta última es mejor que una tipo romboidal.

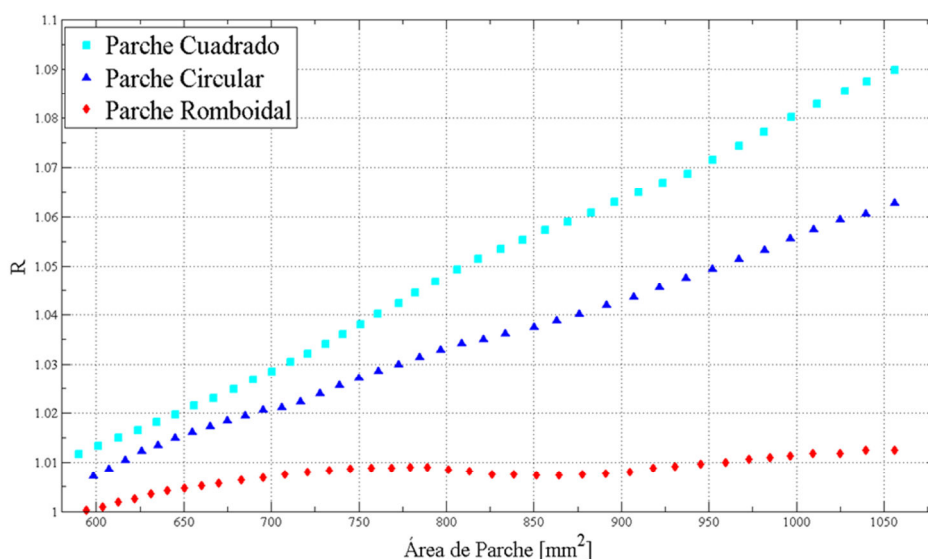


Fig. 6 -. Eficiencia de las distintas geometrías iniciales de parche.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto un algoritmo de optimización topológica aplicado a materiales ortótropos, en particular para el diseño de parches de material compuesto.

Con el objetivo de validar el modelo propuesto se ha analizado el problema de una placa de aluminio sometida a tracción, con una fisura inclinada, reparada con parches de material compuesto. Los resultados han sido comparados con datos de la literatura, donde se ha podido observar que el algoritmo desarrollado permite obtener diseños de parches más eficientes.

Es importante destacar que las formas de parches obtenidas no presentan hueco, ni contornos irregulares, que podrían dar lugar a soluciones inválidas a fines prácticos. Los resultados dejan en evidencia el potencial de la herramienta numérica desarrollada, para el diseño de parches de material compuesto.

REFERENCIAS

- [1]-I. Iváñez, M. Braun. Numerical analysis of surface cracks repaired with single and double patches of composites. *Journal of Composite Materials*, 0021998317722044, 2017.
- [2]-V.M. Karbhari, F. Seible. Fiber reinforced composites - advanced materials for the renewal of civil infrastructure. *Applied Composite Materials*; 7:95-124, 2000.
- [3]-A. Baker, R. Jones. Bonded repair of aircraft structures, Martinus Nijhoff Publishers, 1989.
- [4]-A. Baker, R.J. Chester. Recent advances in bonded composite repair technology for metallic aircraft components. *Proc Int Conf Adv Comp Mat*; 45-49, 1993.

[5]-C.N. Duong, C.H. Wang. Composite Repair: Theory and Design. Elsevier Science Ltd, Oxford 2007.

[6]-B.A. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier. Computation of the stress intensity factor for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode. Composites and Structures; 56:401-406, 2002.

[7]-F. Benyahiaa, A. Albedaha, B.A. Bachir Bouiadjra. Elliptical and Circular Bonded Composite Repair under Mechanical and Thermal Loading in Aircraft Structures. Materials Research; 17: 1219-1225, 2014.

[8]-D. Ouinas, B.B. Bouiadjra, B. Serier, M. Said Bekkouche. Comparison of the effectiveness of boron/epoxy and graphite/epoxy patches for repaired cracks emanating from a semicircular notch edge. Composites and Structures; 80:514-522, 2007.

[9]-M. Ramji, R. Srilakshmi, M. Bhanu Prakash. Towards optimization of patch shape on the performance of bonded composite repair using FEM. Composites Part B; 45: 710-720, 2013.

[10]-ABAQUS, User's Manual Version 6.13, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc, 2014.