

DISEÑO DE PARCHES DE MATERIAL COMPUESTO UTILIZANDO UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA

Marcos Amado^a, Edgardo I. Villa^a, Claudio G. Rocco^a y Matías Braun^b

marcos.amado@ing.unlp.edu.ar

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

^b INTEMA (Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales.), CONICET,
Avda. Colón 10850, 7600 Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha invertido en la República Argentina esfuerzo y dinero en la restauración y puesta en valor de los puentes metálicos que forman parte de la red ferroviaria nacional. En estas estructuras el deterioro puede ser causado por: corrosión; daños por impacto; formación de grietas por fatiga debido al aumento de la densidad del tráfico, pero, principalmente, a la falta de mantenimiento adecuado [1].

La rehabilitación de las estructuras metálicas afectadas por este tipo de daños se realiza empleando técnicas de reparación, como soldadura, atornillado de parches o refuerzos de placas de acero [2]. En las últimas décadas se ha extendido el uso de materiales compuestos para realizar reparaciones, adhiriéndolos al componente estructural dañado. Esto se debe a que este tipo de materiales presentan múltiples ventajas, que incluyen: baja densidad, mejor comportamiento a fatiga, menores tiempos y preparación de las superficies dañadas, y una excelente capacidad para amoldarse a las superficies curvas e irregulares típicamente presentes en las estructuras [3-5]. Además, este tipo de reparaciones reducen la concentración de tensiones [6,7].

El proceso de diseño de parches de material compuesto, en placas fisuradas, se realiza mediante procesos iterativos donde se adoptan inicialmente parches con distinta geometría y se verifica la estabilidad de la fisura en cada caso. Asimismo, existen estudios en los que se han analizado los parches más eficientes en casos sencillos, donde las placas a reparar son de espesor delgado y las fisuras son rectas. 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 [10].

En este trabajo se ha propuesto un algoritmo de optimización topológica aplicado a materiales ortótropos, implementado en el lenguaje de programación MatLab y el código comercial de Elementos Finitos (EF) Abaqus/Standard [11]. Para evaluar la capacidad del modelo se ha estudiado el caso de una placa de aluminio con una fisura inclinada, reparada con parches de material compuesto, colocados en ambas caras de la placa. Para evaluar la eficiencia de los parches, se ha calculado el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) en modo I y II.

Los resultados obtenidos se han comparado con el estudio llevado a cabo por Ramji. [12]. Este análisis comparativo ha permitido evidenciar el potencial del algoritmo de optimización topológica desarrollado para ser aplicado al diseño eficiente de parches.

2. DESARROLLO

2.1. Generalidades

El algoritmo de optimización topológica desarrollado en este trabajo se aplica al diseño de parches de material compuesto para la reparación de estructuras. En este problema intervienen tres partes: la estructura a reparar, el adhesivo y el material compuesto, (ver Fig. 1).

El problema de optimización consiste en dimensionar la geometría del parche, garantizando la estabilidad de la fisura. Para ello se considera que la geometría de la placa, y sus solicitaciones se encuentran fijas a lo largo del análisis.

El modelo propuesto es válido para materiales que presentan comportamiento elástico y lineal, parche de material compuesto unidireccional, y de espesor delgado.

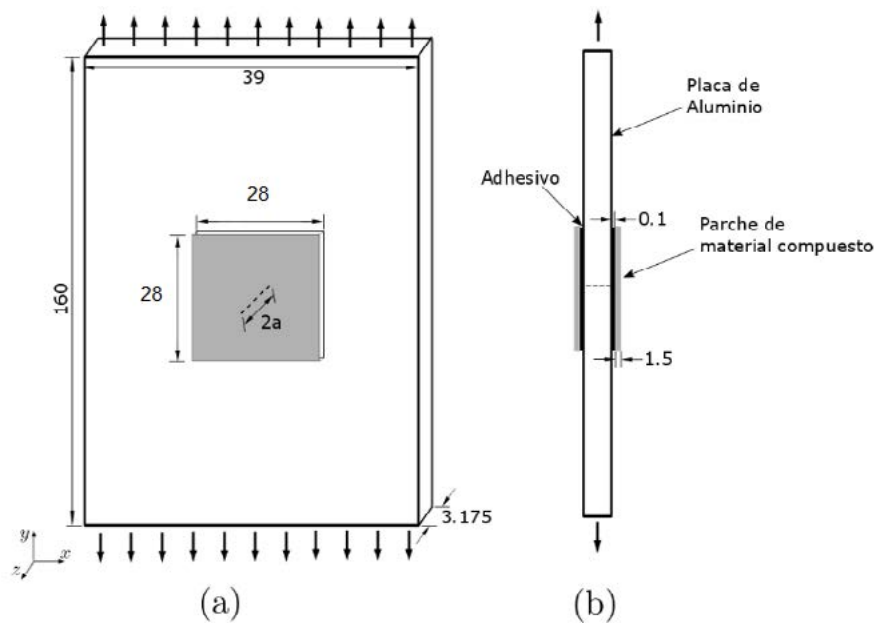


Figura 1. Geometría del modelo: (a) vista en perspectiva, (b) vista lateral. Todas las dimensiones en milímetros.

2.2. Descripción de Algoritmo de Optimización Topológica

El algoritmo de optimización detecta y elimina los elementos que tienen la menor solicitación, de la malla de EF con la que es discretizando el parche.

Se parte de una geometría inicial de parche definida de forma arbitraria, se calculan las tensiones mediante el código comercial de EF Abaqus/Standard, y con el uso del algoritmo desarrollado en MatLab se determinan los elementos menos solicitados. Estos elementos se eliminan, y se vuelven a calcular las solicitaciones para esta nueva configuración.

El porcentaje de elementos eliminados por iteración se fija al inicio del bucle iterativo, para no eliminar demasiados elementos en cada iteración, y de esta forma evitar que exista una variación significativa de la distribución de tensiones entre una iteración y otra, por otro lado es necesario que el número de elementos eliminados por iteración no sea pequeño, ya que esto implicaría un importante número de iteraciones, lo que conlleva a un excesivo costo computacional, además que los tiempos se verían incrementados en exceso.

Para eliminar los elementos del compuesto se propuso la utilización del criterio de rotura de Tsai-Hill (1), dado que es un criterio aplicado a materiales ortótropos.

En la Ec. (1) se muestra el criterio Tsai-Hill para dos dimensiones, en el que se considera que un punto 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 al corte, σ_{11} la tensión en la dirección de las fibras, σ_{22} la tensión en la dirección perpendicular, σ_{12} y es la tensión de corte.

2.3. Condiciones de Contorno y Propiedades de los Materiales

En esta sección se describe la geometría, las condiciones de contorno y las propiedades de los materiales del problema. En la Fig. 1 se describe el modelo propuesto para el desarrollo de este trabajo, que consiste en un panel fisurado de aluminio tipo 2014 T6 sometido a una tensión de tracción de 121 MPa. Es un panel rectangular de 160x39 mm², y 3.175 mm de espesor que contiene una fisura $2a$, inclinada 45° y centrada, de 10 mm de longitud.

El parche está compuesto de láminas unidireccionales de carbono/epoxi. La dirección de las fibras coincide con la dirección de aplicación de las cargas. La adherencia entre la placa y el material compuesto se realiza mediante el adhesivo AV138/HV998.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales considerados [13].

Materiales			
Propiedades	Aluminio	Compuesto	Adhesivo
E/E_{11} (GPa)	73.1	135	4.59
E_{22} (GPa)	-	9	-
E_{33} (GPa)	-	9	-
ν/ν_{12}	-	0.3	0.47
ν_{13}	-	0.02	-
ν_{23}	-	0.02	-
G_{12} (GPa)	-	8	-
G_{13} (GPa)	-	5	-
G_{23} (GPa)	-	5	-

2.4. Descripción del modelo de EF

El compuesto y el adhesivo, han sido discretizados con elementos tridimensionales continuos de integración reducida de 8 nodos (C3D8R) [11]. Empleándose 3136 elementos para cada

componente. Se modeló la mitad del panel, introduciendo la condición de simetría en el plano medio del panel.

Las interfaces entre los distintos materiales se modelaron con contactos tipo tie [11], que permiten considerar una adherencia perfecta de los materiales [8, 9, 12].

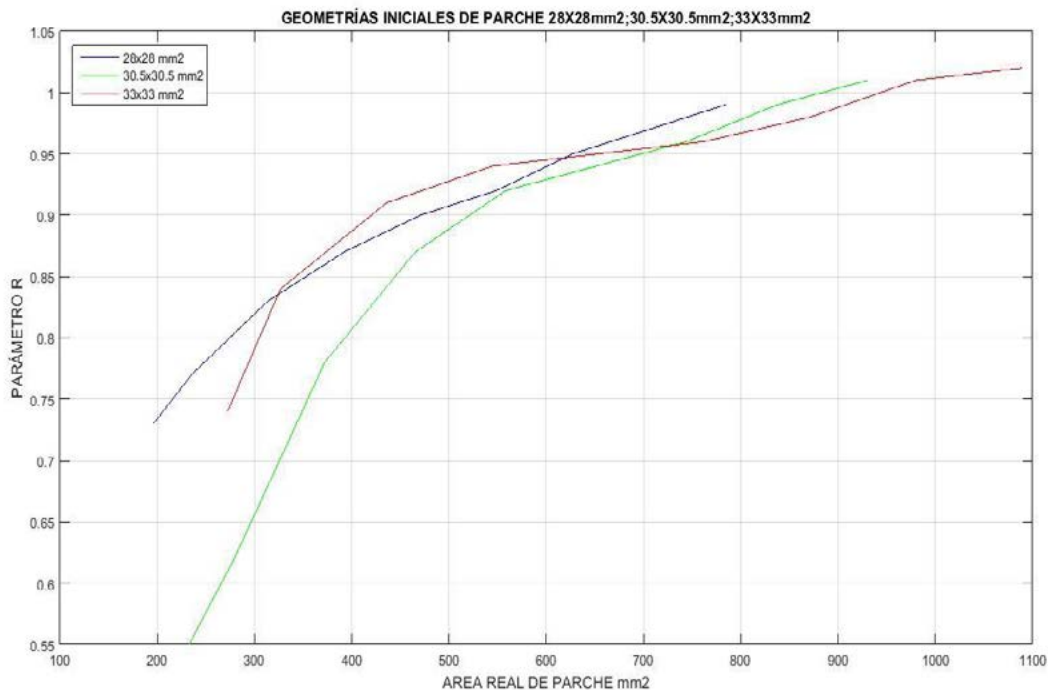
Para el cálculo de los factores de intensidad de tensiones K_I y K_{II} se utilizaron 8 contornos de integración.

4. RESULTADOS

Para estimar la eficiencia del parche sobre el panel sometido a modos mixtos, se emplea la siguiente expresión [12]:

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

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. El 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 los valores correspondientes al plano medio de la placa.



En la Fig. 2. Parámetro R en función del área inicial del parche.

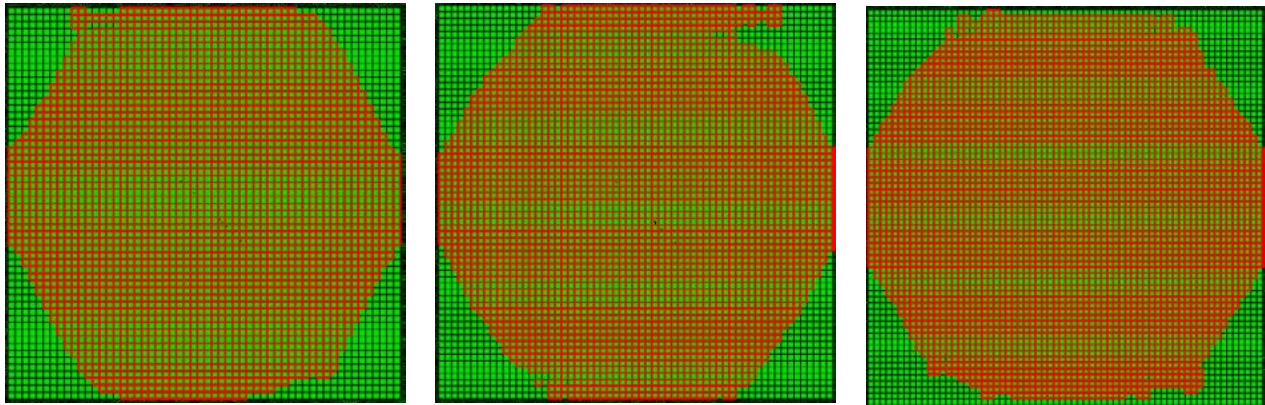
784 mm²930.25 mm²1089 mm²

Fig. 3. Geometrías de los parches, obtenidas con el algoritmo propuesto.

En la Fig. 3 se pueden ver las geometrías de los parches obtenidas con el algoritmo propuesto, para geometrías cuadradas y tamaños iniciales de parche de 784mm², 930.25mm², 1089 mm². En esta figura se han señalado en verde los elementos eliminados, representando en rojo la geometría final del parche.

Como puede verse, para los tamaños propuestos de parche la geometría adopta una forma octagonal, lo que coincide con los resultados presentados por Ramji et al. [12].

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un algoritmo de optimización topológica aplicado al diseño de parche de material compuesto, basado en el criterio de Tsai-Hill.

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 a 45°, reparada con parches de geometría de material compuesto

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

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Kamruzzaman, M.Z. Jumaat, N.H.R. Sulong, A.B.M.S. Islam. A review on strengthening steel beams using FRP under fatigue. *Sci. World J*; 1–21, 2014.
- [2] M. Gholami, A.R.M. Sam, J.M. Yatim, M.M. Tahir. A review of steel/CFRP strengthening systems focusing environmental performance. *Constr. Build. Mater*; 47:301–310, 2013.
- [3] V.M. Karbhari, F. Seible. Fiber reinforced composites – advanced materials for the renewal of civil infrastructure. *Appl. Compos. Mater*; 7:95–124, 2000.
- [4] A. Baker, R. Jones. Bonded repair of aircraft structures, Martinus Nijhoff Publishers, 1989.
- [5] 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.
- [6] C.N. Duong, C.H. Wang. *Composite Repair: Theory and Design*. Elsevier Science Ltd, Oxford 2007.
- [7] S. Pantelakis, K.I. Tserpes. Adhesive bonding of composite aircraft structures: Challenges and recent developments. *Sci China-Phys Mech Astron*; 57: 2011, 2014.
- [8] 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. *Compos Struct*; 56:401-406, 2002.
- [9] F. Benyahiaa, A. Albedaha, B.A. Bachir Bouiadjra. Elliptical and Circular Bonded Composite Repair under Mechanical and Thermal Loading in Aircraft Structures. *Mat Res*; 17: 1219-1225, 2014.
- [10] 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. *Compos Struct*; 80:514-522, 2007.
- [11] ABAQUS, User's Manual Version 6.13, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc, 2014.
- [12] M. Ramji, R. Srilakshmi, M. Bhanu Prakash. Towards optimization of patch shape on the performance of bonded composite repair using FEM. *Compos. Part B*; 45: 710-720, 2013.