

METAMODELO BASADO EN HEURÍSTICAS PARA ELECCIÓN DE COMPONENTES EN LAMINADOS COMPUESTOS

Fornari, Javier¹; Pelaez Sanchez, José Ignacio²; Begliardo, Hugo³

¹Licenciado en Sistemas y Computación
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela
javier.fornari@frra.utn.edu.ar

¹Doctor en Informática
Universidad de Málaga, Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación
jipelaez@uma.es

¹Ingeniero Civil
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela
hugo.begliardo@frra.utn.edu.ar

RESUMEN

En la actualidad, el desarrollo de nuestra sociedad sigue marcado por la necesidad de estructuras más resistentes, rígidas y que tengan un coste de fabricación mínimo. Son fundamentalmente los polímeros laminados o materiales compuestos los que están dando respuesta a estas necesidades, de tal forma que muchos de los materiales tradicionales tales como el acero, la madera o el aluminio han sido sustituidos por estos últimos. El diseño de materiales compuestos es difícil ya que no solamente implica diseñar la geometría del elemento, si no que también hay que diseñar la configuración del propio material, recayendo todo el esfuerzo de diseño sobre el experto que debe seleccionar la combinación más adecuada en base a su conocimiento y experiencia. La utilización de técnicas de inteligencia artificial como son las metaheurísticas se han mostrado muy adecuadas en problemas de diverso tipo. En este trabajo se presenta una metaheurística que permite diseñar polímeros laminados en función de diferentes variables, facilitando un conjunto limitado de soluciones las cuales son obtenidas en función de los criterios de diseño de los expertos.

ABSTRACT

Currently, the development of our society is still marked by the need for stronger, rigid and with a minimum manufacturing cost structures. The polymer laminates or composite materials are responding to these needs, so that many of the traditional materials such as steel, wood or aluminum have been replaced by the latter. The design of composite materials is difficult because not only involves designing the geometry of the element, but also need to design the configuration of the material itself, and all the design effort is assigned to the expert that must select the most appropriate combination based on his knowledge and experience. The use of artificial intelligence techniques such as the metaheuristics has been very appropriate in problems of various kinds. In this paper, a metaheuristic is presented that allows you to design polymers using terms of different variables and providing a limited set of solutions which are obtained as a function of the experts design criteria.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos o polímeros laminados, son una combinación de dos o más materiales que juntos forman un nuevo material cuyo comportamiento mecánico y propiedades están diseñados para ser superiores a aquellos materiales que lo constituyen cuando actúan independientemente. Un material compuesto ^[2], que también puede ser llamado composite, dispone de un material denominado de refuerzo y de un material denominado aglomerante o matriz ^[4]. Existe gran cantidad de combinaciones posibles y, por lo tanto, muchos tipos de compuestos, los cuales se pueden distinguir en base a dos funciones: (1) en función de su tipología: fibras cortas o largas, continuas o discontinuas, orientadas o con disposición aleatoria, una sola capa o laminados multicapa, etc.; (2) en función del tipo de sustancias de sus componentes.

En las últimas décadas, la industria de la construcción e ingeniería ha empezado a conocer las bondades y ventajas de estos nuevos materiales estructurales llamados materiales compuestos o polímeros laminados. Inicialmente fueron aplicados exclusivamente en industrias como la aeronáutica o la aeroespacial, pero el avance tecnológico y la disminución de costes de producción, así como sus excelentes prestaciones han permitido que cada vez más se vaya generalizando su utilización en otros sectores de producción como la industria automovilística, la industria naval, la fabricación de conducciones y contenedores de fluidos, la industria deportiva, la rehabilitación de edificios, etc.

Unos composites que han destacado en aplicaciones industriales debido a sus elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia son los formados por una matriz de polímero reforzado con fibras. Un ejemplo de este tipo son los composites de matriz termoestable: resina de epoxy, poliéster, etc., reforzada con fibras de cerámica orientadas: vidrio, carbono, etc., en concreto estos elementos proporcionan unos tipos de materiales que dan muy buena relación entre facilidad de producción/coste/propiedades mecánicas específicas.

Son muchas las ventajas que presentan este tipo de materiales, pero sin embargo, son muchas las dificultades que entraña su elaboración, debido a que el diseño de un nuevo material compuesto implica diseñar la geometría del elemento; diseñar la configuración del propio material, de forma que se aprovechen mejor las cualidades de sus materiales constituyentes; así como determinar la degradación que sufren sus propiedades a lo largo del tiempo por la aplicación de tensiones cíclicas, lo que puede conducir al fallo del elemento estructural en cuestión.

Para llevar a cabo el diseño, se recurre al uso de fibras incluidas en la matriz formando láminas, diseñando las propiedades del material a través de la elección del número y orientación de las mismas con la finalidad de obtener la rigidez y resistencia deseadas en la aplicación ^[6]. Además, hay que comprobar el grado de compatibilidad del refuerzo con el método de producción y la geometría del elemento, y seleccionar el proceso de fabricación, a fin de garantizar una buena calidad final del elemento ^[10].

El proceso comienza con la definición del problema y especificaciones que deberá cumplir el elemento a diseñar. A partir de esta información se genera una serie de soluciones mediante un proceso de síntesis, por lo general, apoyado básicamente por la experiencia y conocimientos del diseñador. Las posibles soluciones viables se analizan posteriormente para comprobar su efectividad. Todo este proceso no es lineal, más bien se trata de una tarea iterativa que permite ir mejorando la solución

propuesta hasta llegar al diseño final. Tradicionalmente esta labor de diseño, tanto la síntesis como el análisis, se ha llevado cabo con métodos basados en conocimiento empírico, ya que el número de combinaciones posibles de composites es ilimitado, y la caracterización mediante experimentación se hace muy costosa [11].

Desde los años 90 distintos sistemas [3] han sido diseñados para solucionar este tipo de problemas. Para ello se han utilizado desde técnicas tradicionales como elementos finitos [9], pasando por métodos de tareas genéricas y razonamiento basados en casos [8], llegando a técnicas de inteligencia artificial como son las metaheurísticas. En este trabajo, se presenta y se aplica un algoritmo metaheurístico para el problema del diseño de materiales compuestos.

El trabajo ha sido organizado como sigue: en la segunda sección se presentan los diferentes criterios de ruptura que serán utilizados para el diseño de los polímeros; en la tercera sección se presenta la codificación del cromosoma o de la solución junto con la función de adaptación; en la cuarta sección se propone el algoritmo AVNS para el diseño de materiales; en la quinta se aplica a diferentes problemas reales; en la sexta sección, se comparan diferentes técnicas; y finalmente, se muestran las conclusiones.

2. Criterios de Ruptura

Los criterios de ruptura [12] son utilizados para determinar el estado límite de tensión a partir del cual el compuesto sufre daño o ruptura. Se puede considerar que un criterio de ruptura permite estimar cuando un material rompe dado un cierto estado de tensiones: $\sigma_k^1, \sigma_k^2, \tau_k^{12}$. No hay ningún criterio que se pueda usar eficientemente para todos los polímeros, en todas sus aplicaciones o para cualquier estado de carga, ya que todos tienen alguna carencia que hace imposible generalizarlos.

En este trabajo se ha incluido los principales criterios de ruptura: (1) Criterio de Tsai-Wu; (2) Criterio de Máxima Deformación; (3) Criterio de Máxima Tensión; (4) Criterio de Puck. En todos ellos se calculará un valor P_k para la lámina k , y solo si este valor es mayor que uno, se considerará que la lámina rompe. Para este cálculo se necesitará de unos datos preliminares dependientes de los constituyentes del compuesto:

- X = Resistencia Última a la Tracción en el Sentido de las Fibras.
- X_p = Resistencia Última a la Compresión en el Sentido de las Fibras.
- Y = Resistencia Última a la Tracción en el Sentido Perpendicular a las Fibras.
- Y_p = Resistencia Última a la Compresión en el Sentido Perpendicular de las Fibras.
- S = Resistencia Última al Esfuerzo Cortante.
- V_{12} = Coeficiente de Poisson.
- E_1 = Módulo de Elasticidad Longitudinal en el Sentido de las Fibras.
- E_2 = Módulo de Elasticidad Longitudinal en el Sentido Perpendicular a las Fibras.
- G_{12} = Módulo de Elasticidad Transversal.

2.1. Criterio de Tsai-Wu

Pertenece al conjunto de criterios de ruptura polinomiales siendo el de Tsai-Wu el

más general. Se caracterizan por no distinguir el tipo de ruptura ni cual es la fase dominante en la fractura. En consecuencia no pueden tener en cuenta fenómenos que pueden pasar en la interface entre la matriz y la fibra. Los criterios polinomiales son fáciles de usar y la determinación de los parámetros es relativamente sencilla, obteniéndose de ellos unos resultados bastante aceptables. La forma de calcularlo es la siguiente:

$$P_k = \left[\left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X_p} \right) \sigma_k^1 + \left(\frac{1}{Y} - \frac{1}{Y_p} \right) \sigma_k^2 + \frac{1}{XX_p} (\sigma_k^1)^2 + \frac{1}{YY_p} (\sigma_k^2)^2 - \sqrt{\frac{1}{XX_p YY_p} \sigma_k^1 \sigma_k^2 + \frac{1}{S^2} (\tau_k^{12})^2} \right] \quad (1)$$

Estos tipos de criterios tienen ciertas carencias: una de ellas es que son capaces de predecir cómo será la falla de la lámina pero no identifican qué componente ha fallado o cómo se ha producido la rotura. Para solucionar esto se han desarrollado diversos criterios asociados a los distintos modos de falla. En ellos se trata separadamente la falla de la fibra y de la matriz y se tiene en cuenta como sucede. Los criterios de este tipo más sencillos son el de máxima tensión y el de máxima deformación. [7]

2.2. Criterio de Máxima Deformación

El criterio de Máxima deformación considera que el material rompe cuando supera una cierta deformación límite en una zona determinada. No se considera la interacción entre las deformaciones combinadas sobre la lámina analizada. El criterio de ruptura por deformación se puede considerar en tres condiciones de falla correspondientes con la deformación máxima en la dirección de la fibra, en la dirección transversal o de la matriz y para deformación al corte. Para su cálculo es necesario calcular una matriz de deformaciones principales $\{\eta\}$ del siguiente modo:

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_{12} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \frac{(\sigma_k^1 - \sigma_k^2 \cdot \nu_{12})}{E_1} \\ \frac{(\sigma_k^2 - \sigma_k^1 \cdot \nu_{12})}{E_2} \\ \frac{\tau_k^{12}}{G_{12}} \end{bmatrix}_k \quad (2)$$

Entonces las condiciones de falla para cada caso serán:

En la dirección de la fibra: $P_k^0 = \frac{\eta_1 \cdot E_1}{X}$ y si es de contracción: $P_k^0 = \frac{|\eta_1| \cdot E_1}{X_p}$.

En la dirección de la matriz: $P_k^1 = \frac{\eta_2 \cdot E_2}{Y}$ y si es de contracción: $P_k^1 = \frac{|\eta_2| \cdot E_2}{Y_p}$.

En la dirección del corte máximo: $P_k^2 = \frac{|\eta_{12}| \cdot G_{12}}{S}$.

Y finalmente: $P_k = \max\{P_k^0, P_k^1, P_k^2\}$.

2.3. Criterio de Máxima Tensión

Considera que el material falla cuando supera una cierta tensión límite en una zona determinada. Este método tiene el inconveniente que al manejar las tensiones en forma separada no permite observar la interacción entre las tensiones en distintas direcciones. Es el criterio más sencillo y al suponer que no existe interacción entre los diferentes mecanismos de fractura tiende a sobreestimar la carga de rotura. En este criterio también se consideran tres condiciones de falla, es decir:

$$\text{En la dirección de la fibra: } P_k^0 = \frac{\sigma_k^1}{X} \text{ y si es de contracción: } P_k^0 = \frac{|\sigma_k^1|}{X_p} .$$

$$\text{En la dirección de la matriz: } P_k^1 = \frac{\sigma_k^2}{Y} \text{ y si es de contracción: } P_k^1 = \frac{|\sigma_k^2|}{Y_p} .$$

$$\text{En la dirección del corte máximo: } P_k^2 = \frac{|\tau_k^{12}|}{S} .$$

$$\text{Y finalmente: } P_k = \max \{P_k^0, P_k^1, P_k^2\} .$$

Estos dos últimos criterios tienen en cuenta el tipo de rotura y en ellos se trata separadamente la falla de la fibra y de la matriz. Son los criterios de falla más empleados por los diseñadores de elementos de composite siendo el más utilizado el criterio de falla de máxima deformación con un 30%, seguido del de máxima tensión con un 22%. El inconveniente que presentan estos métodos es que no permiten una relación entre la tensión normal y cortante. [7]

2.4. Criterio de Puck

Puck propuso dos criterios de ruptura, uno para el fallo de fibra y otro para el fallo de la interfibra, este último dividido en otros tres modos que ayudan a analizar más fielmente lo que ocurre en la realidad.

$$\text{Criterio de Fallo de fibra: } P_k^0 = \frac{\sigma_k^1}{X} \text{ y si es de contracción: } P_k^0 = -\frac{\sigma_k^1}{X_p} .$$

Criterio de Fallo de interfibra. Para calcularlo es necesario definir tres medidas auxiliares:

$$\sigma_{23}^a = \frac{S}{0.4} \cdot \left(\sqrt{1 + 0.4 \cdot \frac{Y_p}{S}} - 1 \right) \quad \sigma_{12}^c = S \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot p_{23}^-} \quad p_{23}^- = 0.3 \cdot \frac{\sigma_{23}^a}{S}$$

$$\text{a. Si } \sigma_k^2 \geq 0 \text{ entonces } P_k^1 = \sqrt{\left(\frac{\tau_k^{12}}{S} \right)^2 + \left(1 - 0.3 \cdot \frac{Y}{S} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_k^2}{Y} \right)^2} + 0.3 \cdot \frac{\sigma_k^2}{S}$$

$$\text{b. Si } \sigma_k^2 < 0 \text{ y } 0 \leq \left| \frac{\sigma_k^2}{\tau_k^{12}} \right| \leq \frac{\sigma_{23}^a}{|\sigma_{12}^c|} \text{ entonces } P_k^1 = \frac{1}{S} \cdot \left(\sqrt{\left(\tau_k^{12} \right)^2 + 0.04 \cdot \left(\sigma_k^2 \right)^2} + 0.2 \cdot \sigma_k^2 \right)$$

$$c. \text{ Si } \sigma_k^2 < 0 \text{ y } 0 \leq \left| \frac{\tau_k^{12}}{\sigma_k^2} \right| \leq \frac{\sigma_{12}^c}{|\sigma_{23}^a|} \text{ entonces } P_k^1 = \frac{Y_p}{-\sigma_2} \cdot \left(\left(\frac{\tau_k^{12}}{2 \cdot (1 + p_{23}^- \cdot S)} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_k^2}{Y_p} \right)^2 \right)$$

y finalmente: $P_k = \max\{P_k^0, P_k^1\}$.

3. Codificación y Evaluación de la Solución

Para poder solucionar el problema es preciso disponer de una representación del problema que permita simbolizar toda la información necesaria para el diseño del composite. En la figura 1 se muestra la representación o dominio de la solución propuesta en este trabajo.

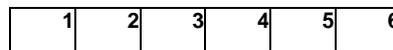


Figura 1. Dominio de una Solución para el Problema del Diseño de Composites.

Los cinco primeros alelos contienen la información de los constituyentes del polímero: (1) Arquitectura de refuerzo; (2) Tipo de matriz; (3) material matriz; (4) material de refuerzo o fibra; (5) volumen de refuerzo; (6) geometría del laminado que irá de -90 a 90 grados para cada capa de lámina.

Además de la solución, es necesario disponer de una función que permita evaluar las soluciones que se obtienen, para determinar aquella que mejor se adapta. En este trabajo se ha definido la siguiente función de evaluación o fitness que califica a los individuos premiando aquellos que mejor aprovechen el diseño del material, es decir, que las tensiones sean soportadas por las fibras (P_{1k}) en lugar del resto del material (P_{2k}, P_{12k}); además de minimizar el número de capas, las capas contiguas que sean iguales, y el número de capas rotas. Así el fitness quedaría como se muestra a continuación:

$$F = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\left| \frac{\sigma_k^1}{X} \right| \wedge (P_k < 1) \right)}{n^N \cdot (1 + n_c)^C \cdot \left(\sum_{k=1}^n (P_k \wedge (P \geq 1)) + 1 \right)^R \cdot \left(\sum_{k=1}^n \left(\left| \frac{\sigma_k^2}{Y} \right| \wedge (P_k < 1) \right) + 1 \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^n \left(\left| \frac{\sigma_k^{12}}{S} \right| \wedge (P_k < 1) \right) + 1 \right)} \quad (3)$$

4. Metaheurística Propuesta

Con el objetivo de explorar el espacio de soluciones, proponemos el uso de una metaheurística evolutiva ^{[1] [5]} para resolver problemas de optimización que se basa en dos ideas: el cambio sistemático de entornos, entendiéndose como entornos a las distintas disposiciones del espacio de soluciones, es decir, lugares dónde los individuos tienen mayor o menor número de capas, volumen de refuerzo, etc.; cambio de operadores, que permite seleccionar el tipo de operador según la conveniencia de mejora en cada momento. En síntesis, se trata de buscar en el mayor número de posibles entornos del espacio de soluciones, para mejorar un individuo.

Este modelo es intrínsecamente paralelo, solo opera con un individuo, por lo que no usa operador de cruce. Es por ello que la mutación es la responsable de que se produzca esta mayor exploración de los entornos y para propiciarlo se han creado distintos operadores de mutación agrupados en operadores generales y específicos.

Los operadores específicos tratan de mejorar las soluciones según criterios de diseño. Estos operadores podrían ser activados de manera secuencial cuando los operadores generales no producen ninguna mejora, o de manera programada cuando un operador general estima que las soluciones tienen que cambiar el entorno de búsqueda.

Operadores Generales

- a. *Mutación General*: Muta una parte aleatoria del cromosoma.
- b. *Mutación Ángulos*: Para cada capa, se busca un ángulo que haga mejorar al individuo.
- c. *Mutar capas rotas*: Para una capa que rompe, se busca un ángulo para el que no lo haga. Si no lo consigue, puede ser que el número de capas sea insuficiente para soportar las tensiones y sea necesario crear capas nuevas. En este caso se llama a la mejora local con el operador *Añadir Capas*.

Operadores Específicos

- a. *Añadir capas*: Va creando capas con un ángulo aleatorio hasta que deje de mejorar el individuo según el fitness. Este tipo de mutación será interesante cuando las tensiones son grandes.
- b. *Quitar capas*: Elimina capas, de igual forma al anterior. Interesante en situaciones en las cuales el material puede soportar perfectamente las tensiones.
- c. *Intercambiar capas*: Cambia el orden de las capas. Este operador tiene sentido cuando las tensiones son provocadas por momentos, dónde el orden del laminado cobra importancia.
- d. *Matriz y fibra*, prueba con todas las posibles combinaciones de materiales.
- e. *Volumen de refuerzo*, prueba con otro volumen de refuerzo.

Algoritmo

Inicialización.

Seleccionar el conjunto de estructuras de entorno N_k ,

$k = 1; \dots; k_{max}$ que se usarán en la búsqueda y encontrar una solución inicial x .

Elegir, también, el criterio de parada a emplear.

Repetir los siguientes pasos hasta verificarse el criterio de parada:

Repetir hasta que no se pueda Mejorar:

Mejora General:

Aplicar operadores generales.

Si es necesario aplicar un operador específico entonces:

Aplicar operador específico.

Fin-Repite

Repetir hasta que no se puede Mejorar:

Mejora Local:

Aplicar operadores Específicos.

Fin-Repite;

Fin-Repite.

Además de estos operadores el algoritmo permite incorporar otras técnicas como por ejemplo ramificación y poda o backtracking. En el problema que estamos resolviendo en esta trabajo, se ha implementado la técnica de Backtracking para resolver el problema de la orientación de las capas. De manera, que una vez que el composite ha sido obtenido se aplica esta técnica para determinar la orientación óptima de las capas.

5. Ejemplo de Aplicación

En esta sección se aplica la metaheurística evolutiva para el diseño de un anillo de pequeño espesor sometido a presión interior. Se ha seleccionado este problema porque nos permite comparar la solución obtenida con la técnica con la solución óptima que puede ser obtenida de manera analítica.

Sea un anillo de espesor e y pequeño con relación a su radio interior r_i sometido a una presión p (figura 2).

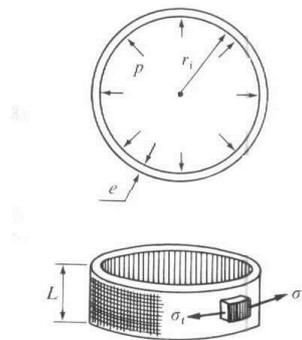


Figura 2. Anillo de pequeño espesor sometido a presión.

Los esfuerzos en el anillo vendrán dados por la expresión: $N_x = p \cdot r_i$.

Para el caso en el que $p_i = 2 \text{ MPa} = 2 \text{ MN/m}^2$; $r_i = 100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$;

$$N_x = p \cdot r_i = 2 \cdot 1 = 2 \text{ MN/m} \quad (4)$$

Los resultados obtenidos con el algoritmo son:

Criterio de Máxima deformación

Criterio de Máxima Tensión

Algoritmo	Algoritmo
Arquitectura de refuerzo: 1	Arquitectura de refuerzo: 1
TipoMatriz: Termoestables	TipoMatriz: Termoestables
Matriz: Epoxy	Matriz: Epoxy
Fibra: Boro	Fibra: Boro
Volumen de refuerzo: 0.437531	Volumen de refuerzo: 0.346191
Capas:	Capas:
0 (0.9997)	0 (0.999644)
0 (0.9997)	0 (0.999644)
0 (0.9997)	0 (0.999644)
0 (0.9997)	0 (0.999644)
0 (0.9997)	0 (0.999644)
El valor del cromosoma 100 es: 0.156203	El valor del cromosoma 100 es: 0.0799715
$N_x=2e+06$, $N_y=0$, $T_{xy}=0$	$N_x=2e+06$, $N_y=0$, $T_{xy}=0$
$M_x=0$, $M_y=0$, $M_{xy}=0$	$M_x=0$, $M_y=0$, $M_{xy}=0$
Espesor= 1.6 mm	Espesor= 2.0 mm

Tabla 1 – Criterios de Rotura utilizados

Criterio de Puck

Criterio de Tsai-Wu

Algoritmo AVNS	Algoritmo AVNS
Arquitectura de refuerzo: 1	Arquitectura de refuerzo: 1
TipoMatriz: Termoestables	TipoMatriz: Termoestables
Matriz: Epoxy	Matriz: Epoxy
Fibra: Boro	Fibra: Kevlar29
Volumen de refuerzo: 0.346069	Volumen de refuerzo: 0.303375
Capas:	Capas:
0 (0.999978)	0 (0.998879)
0 (0.999978)	0 (0.998879)
0 (0.999978)	0 (0.998879)
0 (0.999978)	0 (0.998879)
0 (0.999978)	0 (0.998879)
0 (0.999978)	0 (0.998879)
El valor del cromosoma 100 es: 0.0799982	El valor del cromosoma 100 es: 0.0462586
$N_x=2e+06$, $N_y=0$, $T_{xy}=0$	$N_x=2e+06$, $N_y=0$, $T_{xy}=0$
$M_x=0$, $M_y=0$, $M_{xy}=0$	$M_x=0$, $M_y=0$, $M_{xy}=0$
Espesor= 2.0 mm	Espesor= 2.16 mm

Tabla 2 – Criterios de Rotura utilizados

6. Conclusiones

En este trabajo hemos presentado la metaheurística evolutiva para el diseño de polímeros laminados. En esta aplicación se dispone de un interfaz que permite al usuario adaptar el sistema a sus necesidades, facilitándole soluciones con la configuración y diseño del material compuesto propuesto. Además, da la posibilidad de que el usuario aporte su experiencia y conocimiento para retocar o modelar soluciones obtenidas por el sistema de búsqueda.

La metaheurística evolutiva permite al usuario elegir distintos parámetros y variables del algoritmo. La función de evaluación o fitness propuesto en este trabajo para cuantificar las soluciones tiene como objetivo minimizar: (1) las láminas rotas, (2) el número de capas y (3) las capas contiguas; y, además, (4) compensar adecuadamente las tensiones sobre los materiales constituyentes. Con los resultados obtenidos se confirma que se obtienen soluciones adecuadas y cercanas al óptimo.

Estos resultados nos permiten abrir una línea de investigación donde este sistema sea aplicado en problemas de mayor complejidad, donde se pueda diseñar distintas partes de piezas más complejas y a futuro se complete la etapa de experimentación real, la cual, es necesaria para percatarse de la resistencia real a tensiones de los materiales compuestos y comprobando que el estudio realizado del sistema es correcto.

7. Referencias

- [1] Armando Blanco, David A. Pelta, Jose L. Verdegay . 2003. *FANS : una heurística basada en conjuntos difusos para Problemas de Optimización*. Revista Iberoamericana para la Inteligencia Artificial N° 19, Pág. 103-121.
- [2] Barbero, Ever J. 1999. *Introduction to composite materials design*. Philadelphia; London: Taylor Francis.
- [3] Car, E., Oller, S. y Oñate, E. 2000. *Tratamiento numérico de los materiales compuestos*. Vol. 57. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- [4] Duratti, L., Salvo, L., Landru, D., Bréchet, Y. 2002. *Selecting the components of polymeric composites*. *Advanced Engineering Materials* 2002, 4, N° 6, p367-371.
- [5] E. Falkenauer. 1998. *Genetic Algorithms and Grouping Problems*. John Wiley and Sons.
- [6] Gürdal, Zafer. 1999. *Design and optimization of laminated composite materials*. New York; Wiley.
- [7] Kuno K. U. Stellbrink. 1996. *Micromechanics of Composites: Composite Properties of Fiber and Matrix Constituents*. Hanser Gardner Publications.
- [8] Lenz, T. J. 1997. *Designing composite material systems using generic tasks and case-based reasoning*. Ph. D. Dissertation. Michigan State University.
- [9] Matthews, F. L., Davies, G. A. O., Hitchings, D., Soutis, D. 1999. *Finite element modelling of composite materials and structures*. Imperial College, University of London, UK. :Woodhead.

[10] Mayugo, J. A. 2003. Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.

[11] París, F., Cañas, J., Martín, J.C. 2002. Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos. Universidad de Sevilla.

[12] Reifsnider, K. L. y Case, S. W. 2002. Damage tolerance and durability of material systems. New York; Wiley.