

Detección de la Deformación y Fallo de Composites usando MEF sobre una Placa Laminar Optimizada

Detection of Deformation and Failure of Composites using FEM on an Optimized Laminar Plate

Darwin Patiño Pérez¹, Celia Munive Mora², Tayrol Balarezo Zurita³, y Ruth Rodríguez Macías⁴

RESUMEN

En el presente estudio se expone la aplicación de los métodos de optimización usados en Ansys, así como el análisis numérico basado en el Método de Elementos Finitos (MEF), para la detección de la deformación y fallo así como el comportamiento elástico lineal de diferentes materiales compuestos usados sobre una placa laminar rectangular a optimizarse; cada composite tiene propiedades inherentes que las catalogan y diferencian entre ellos, así como sus coeficientes de elasticidad, rigidez y resistencia. En el estudio se crea un script (código en APDL) que se ejecuta en entorno gráfico para mostrar su desplazamiento, índice de deformación y el volumen el cual se intenta minimizar sin que se viole el criterio de fallo establecido por Tsai-Wu. Además, para efectos de optimización, el código APDL vía script se ejecuta en modo batch desde la línea de comandos para ahorrar tiempos de procesamiento. Este script se ha desarrollado para optimizar la placa rectangular y poder minimizar el volumen del material requerido sin que sobrepase el índice de fallo para poder determinar cuál es el tipo de material que mejor se ajusta al comportamiento elástico lineal.

Palabras clave: Elementos Finitos, Optimización, Composites, Comportamiento Elástico, Criterio de Fallo.

ABSTRACT

In the present study, the application of the optimization methods used in Ansys is exposed, as well as the numerical analysis based on the Finite Element Method (FEM), for the detection of deformation and failure as well as elastic behavior. linear of different composite materials used on a rectangular laminar plate to be optimized; Each composite has inherent properties that classify and differentiate between them, as well as their coefficients of elasticity, stiffness and resistance. In the study, a script is created (code in APDL) that is executed in a graphical environment to show its displacement, deformation index and the volume, which is tried to minimize without violating the failure criteria established by Tsai-Wu. In addition, for optimization modes, the APDL code via script is executed in batch from the command line to save processing times. This script has been developed to optimize the rectangular plate and to be able to minimize the volume of the required material without exceeding the failure rate in order to determine which is the type of material that best adjusts to the linear elastic behavior.

Keywords: Finite Elements, Optimization, Composites, Elastic Behavior, Failure Criteria.

Fecha de recepción: Julio 17, 2019.

Fecha de aceptación: Septiembre 25, 2019.

Introducción

El comportamiento elástico lineal (Zahr, 2010), que se puede dar sobre cualquier tipo de composite, está reflejado en las constantes ingenieriles del mismo (Miravete, Antonio; E. Larrodé, L. Castejón, R. Clemente, M.A. Jiménez, M. Lizaranzu, J. Cuartero, D. Revuelta, C. Millán, V. Gómez, J. Calvo, 2012); estos valores se han obtenido de pruebas y/o ensayos sobre el tipo de material. Para un laminado de composite, es necesario realizar pruebas en laboratorio para determinar la deformación y fallo que se pueda producir sobre este (García, 2007); estas pruebas consumen tiempo y recurso mecanismo que podría ser reemplazado con pruebas y/o ensayos virtuales en simuladores sobre una placa laminar cuando por el momento se desconoce la forma final del objeto sobre en cual se va usar el material. Usar una placa laminar para determinar

deformación y fallo, puede ayudar a obtener una serie de resultados útiles para evitar el desperdicio de un composite, en el diseño y construcción de un determinado objeto que es sometido a presión (Barbero, 2018).

Para todas estas pruebas se requiere del uso de los métodos de optimización, así como el empleo del criterio de fallo de Tsai-Wu para poder calcular el volumen mínimo del material compuesto que debería usarse en una placa sin que se rompa y se deforme cuando se la somete a presión. En el presente tratado se ha realizado la optimización de un elemento estructural para la fabricación de piezas de fibra de carbono como es la placa rectangular, por el método de los elementos finitos (Tsai, 2008).

¹ Ph.D, Universidad de Guayaquil, Ecuador. E-mail: darwin.patinop@ug.edu.ec

² BS, DeSales University, Pensilvania, EEUU. E-mail: cm3877@desales.edu

³ Ing, Universidad de Guayaquil, Ecuador. E-mail: tayrol.balarezoz@ug.edu.ec

⁴ Ing, Universidad de Guayaquil, Ecuador. E-mail: ruth.rodriguezm@ug.edu.ec

Como citar: Patiño Pérez, D., Munive Mora, C., Balarezo Zurita, T., & Rodríguez Macías, R. (2021). Detección de la Deformación y Fallo de Composites usando MEF sobre una Placa Laminar Optimizada. *Ecuadorian Science Journal*. 3(2), 39-46. DOI: <https://doi.org/10.46480/esj.3.2.26>

En el análisis y optimización se ha utilizado como herramienta el modelo de elementos finitos disponible en ANSYS, para lo cual se desarrolla el prototipo geométrico rectangular, del cual posteriormente se detalla sus propiedades y finalmente se aplican fuerzas simuladas a través de código (Script) escrito en ANSYS APDL.

El propósito global del proyecto es la determinación, desarrollo, y validación de modelos para el diseño óptimo de topología de elementos estructurales rectangulares. A lo largo del proyecto se varía la codificación de los modelos para alcanzar diferencias en los comportamientos de los mismos, y así realizar análisis comparativos de su eficiencia.

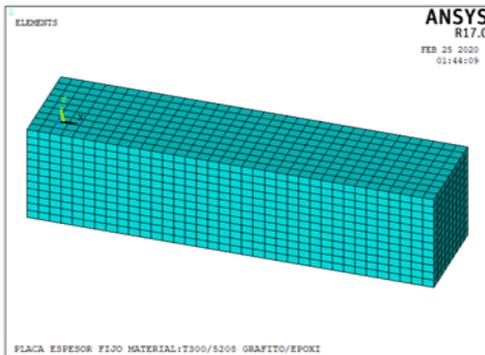


Figura 1. Placa de Composite.
Fuente: Propia

Proponer un método de optimización de secuencia de apilado en componentes laminados con criterios de rotura de la última lámina. Mediante el implantado de una macro con el lenguaje interno del programa ANSYS (Peter Scholten, 2011).

La importancia del tema radica en determinar a través de un modelado matemático usando MEF (Mirlienna, 2016), la deformación e índice de fallo en placas laminadas rectangulares expuestas a presión, para esto se requiere de una mecánica de simulación virtual que permita ensayar y extrapolar hacia otros métodos del mismo ANSYS sus propiedades, mientras se diferencia el comportamiento del material compuesto en un objeto pequeño manipulable y a la vez optimizable en su volumen.

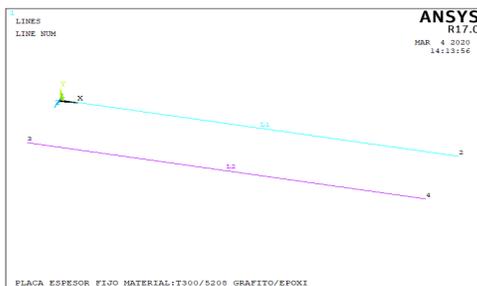


Figura 2. Creación de Líneas Bases.
Fuente: Propia

La resina epoxi reforzada con fibra de carbono, es un material tecnológicamente avanzado (Uribe, 2011) que actualmente es usado en multitud de aplicaciones en las que se requiere un material de excelentes prestaciones mecánicas, con la ventaja adicional que supone la disminución de peso proporcionada por estos materiales. Estas propiedades han hecho que los composites son uno de los materiales más utilizados en la actualidad que, progresivamente, está sustituyendo a materiales metálicos ampliamente

usados, como el acero, titanio o aluminio. Como contrapartida, fruto de la combinación de propiedades de sus dos constituyentes, fibra y matriz, los composites presentan como gran inconveniente un elevado grado de dificultad en las operaciones de mecanizado. Por ello, se hace necesario el desarrollo y optimización de técnicas avanzadas para su manejo.

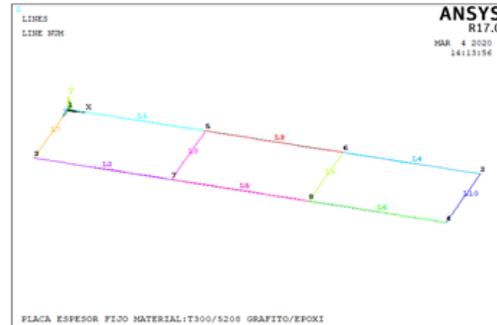


Figura 3. Estructura de la Placa.
Fuente: Propia

A medida que aumentan las necesidades del ser humano en contribuir con soluciones tecnológicas cada vez más exigentes, así mismo aparece la necesidad de disponer de nuevos materiales que ofrezcan mejores beneficios. Para esto se aplica el concepto de materiales compuestos que sean capaces de combinar las propiedades que tienen los diferentes tipos de materiales como es cerámicos, los plásticos y los metales a la vez. En los últimos años se ha incrementado el uso de estos nuevos materiales compuestos que sean aplicadas en automoción, industria aeronáutica, construcción civil, medicina (Consultants & Mundial, 2002).

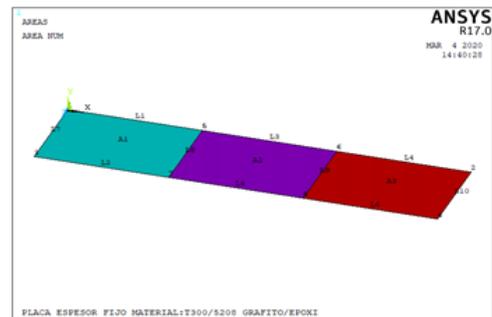


Figura 4. Creación de las Áreas de la Placa.
Fuente: Propia

Es de conocimiento general que prácticamente todos los materiales sufren degradación de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo debido a la aplicación de cargas (peso o presión). La mayoría de los elementos de materiales compuestos también son sensibles al desgaste por cargas cíclicas lo que puede conducir al fallo del elemento estructural en cuestión. Por lo tanto, es generalmente aceptado que los polímeros reforzados con fibras sufren fatiga.

Se desea obtener con el uso de los materiales compuestos implicados el resultado único de un material donde sus propiedades sean mejores que las propiedades que posean sus alternos, actuando por separado. Un ejemplo de implementación del material compuesto es en la industria del transporte donde son necesarios materiales que sean ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y al desgaste.

Materiales y Método

Uso del Laminado con Fibra de Carbono

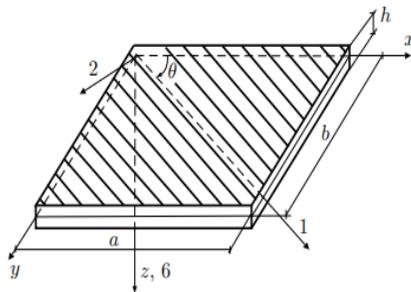


Figura 5. Esquema de una Placa de Laminado.

Fuente: Propia

Las fibras de carbono (Navarro, 2008) son fibras que presentan un contenido superior al 92% de carbono, y los compuestos a base de estas son considerados altamente anisotrópicos, siendo esta una de sus principales desventajas, ya que el estudio analítico y diseño de la estructura de estos materiales resulta complejo. Las láminas consisten en fibras de alta resistencia y alto módulo incorporadas en una matriz polimérica, metálica o cerámica. Las fibras normalmente utilizadas son de carbono, vidrio, boro, y carburo de silicio, mientras que entre las matrices más utilizadas se incluye el uso de resinas termoplásticas y termoestables, cerámica y metal.

Tabla 1: Parametrización del Material T300/5208

MP,EX,1,1.36e5	!E1	--EX	Módulo elástico, dirección del elemento x
MP,EY,1,9.8e3	!E2	--EY	Módulo elástico, dirección del elemento Y
MP,EZ,1,9.8e3	!E3=E2	--EZ	Módulo elástico, dirección del elemento z
MP,GXY,1,4.7e3	!G12	--GXY	Módulo de corte, plano x-y
MP,GYZ,1,4,261e3	!G23	--GYZ	Módulo de corte, plano y-z
MP,GXZ,1,4.7e3	!G13=G12	--GXZ	Módulo de corte, plano x-z
MP,PRXY,1,0.28	!V12	--PRXY	Proporción mayor de Poisson, plano x-y
MP,PRYZ,1,0.15	!V23	--PRYZ	Relación de Poisson mayor, plano y-z
MP,PRXZ,1,0.28	!V13=V12	--PRXZ	Proporción mayor de Poisson, plano x-z

Fuente: Propia

El ensamblaje de capas en el laminado puede proporcionar propiedades de la ingeniería que incluyen rigidez en el plano, a la flexión y resistencia (García, 2007). Para diseñar y analizar la estructura de un laminado es necesario tener conocimientos de las tensiones a las que será sometido el laminado. El hecho de usar materiales compuestos en procesos de laminado es altamente práctico, debido a que los materiales compuestos permiten el uso de estructuras de paredes finas (Reddy, 2004).

Uso del Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad (E), también llamado módulo de Young, es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente (en la zona de comportamiento elástico de dicho material) entre los incrementos de tensión aplicados ($d\sigma$) en el ensayo de tracción y los incrementos de deformación longitudinal unitaria ($d\epsilon$) producidos (Dávila et al., 2011).

$$E = d\sigma / d\epsilon \quad (2)$$

Equivala a la tangente en cada punto de la zona elástica en la gráfica tensión-deformación (σ - ϵ) obtenida del ensayo de tracción.

En muchos casos el módulo de elasticidad es constante durante la zona elástica del material, indicando un comportamiento lineal del mismo (Timoshenko, 1941).

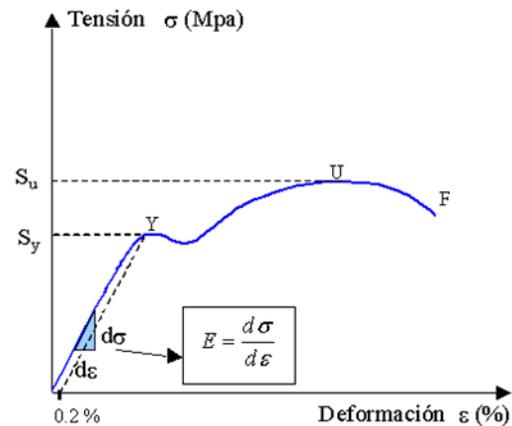


Figura 6. Módulo de Elasticidad

Fuente: Propia

Uso del Módulo de Rigidez

La deformación elástica de los sólidos es limitada (Consultants & Mundial, 2002). La deformación producida en un sólido al aplicarle un esfuerzo desaparece totalmente cuando este esfuerzo se elimina. La relación entre esfuerzo y deformación (lineal en algunos materiales, pero muy lejos de serlo en otros) puede relacionarse cualitativamente con la estructura y tipo de enlace atómico presentes. Esta relación de esfuerzo y deformación depende también de la temperatura, y en el caso de monocristales o materiales que han sido deformados previamente, en la dirección cristalográfica (Do et al., n.d.).

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad \begin{matrix} \text{(es el esfuerzo de corte)} \\ \text{(es la deformación a corte)} \end{matrix} \quad (3)$$

Tabla 1: Propiedades de los Composites

#	Material	Modulo de Young		Modulo de rigidez		Proporción de Poisson		densidad g/cm ³
		E1	E2=E3	G12=G13	G23	V12=V13	V23	
Grafito - Epoxi								
1	T300/5208 Gpa	136	9.8	4.7	4,261E+00	0,280	0,150	1,54
	T300/5208 Psi	1,9725E+07	1,4214E+06	6,8168E+05	6,1799E+05	0,280	0,150	1,54
	T300/5208 mPa	1,3600E+05	9,8000E+03	4,7000E+03	4,2609E+03	0,280	0,150	1,54
2	AS/3501 Gpa	1,3800E+02	8,9600E+00	7,1000E+00	2,8176E+00	0,300	0,590	1,6
	AS/3502 Psi	2,0015E+07	1,2995E+06	1,0298E+06	4,0866E+05	0,300	0,590	1,6
	AS/3503 mPa	1,3800E+05	8,9600E+03	7,1000E+03	2,8176E+03	0,300	0,590	1,6
3	AS4D/9310 Gpa	133,86	7,706	4,306	2,76	0,301	0,396	1,52
	AS4D/9310 Psi	1,9415E+07	1,1177E+06	6,2454E+05	4,0031E+05	0,301	0,396	1,52
	AS4D/9310 mPa	1,3386E+05	7,7060E+03	4,3060E+03	2,7600E+03	0,301	0,396	1,52

Fuente: Propia

Metodología de Análisis

Aplicación del Método de Elementos Finitos

Es una poderosa técnica computacional para soluciones aproximadas a una variedad de problemas de ingeniería del "mundo real" que tienen dominios complejos sometidos a condiciones generales de contorno (Ruiz, 2015).

La simulación numérica se realiza por medio del MEF ingresando una serie de valores que se usaran en el script del ADPL (ANSYS Parametric Design Language), para realizar un análisis elástico lineal. La figura geométrica será de valor específico para todos los casos de optimización, con las medidas de altura 5mm, de base 20mm y de espesor 5 mm. En el laminado se usa el material T300/5208 (Springer & Kollar, 2003) cuyas propiedades están en la Tabla 3, y estará formado por $n=12$ láminas y cada una tendrá un espesor, la orientación angular será $[45/-45/0/90/-45/45]$ y se apilarán simétricamente. Finalmente, el modelo será sometido a 300psi (20,68bar) de presión (Bahei-El-din, 1996).

Detección de Fallo mediante el Criterio de Tsai-Wu

El criterio de fallo de Tsai-Wu planteado en (Patiño Pérez, Corz Rodríguez, & Mora, 2020) proviene de las curvas de ajuste obtenidas de pruebas experimentales esquematizadas en la notación de índice de fallo, usado en diversos paquetes de elementos finitos.

$$I_F = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{resistencia}} ; \text{ se predice el fallo cuando } I_F \geq 1 \quad (4)$$

La resistencia es el inverso del índice de fallo

$$R = \frac{1}{I_F} = \frac{\text{resistencia}}{\text{esfuerzo}} ; \text{ se predice el fallo cuando } R \leq 1 \quad (5)$$

Este criterio determina el fallo que se produce en la primera capa de un laminado y es determinado:

$$I_F = \frac{1}{R} = \left[-\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 + \frac{1}{A}} \right]^{-1} \quad (6)$$

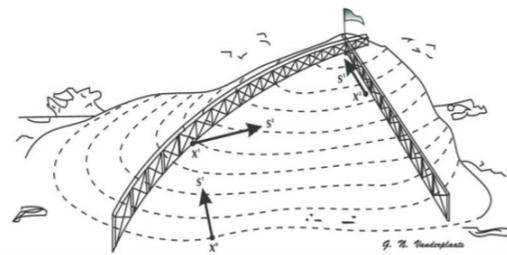
La descripción de las resistencias y coeficientes usados en las ecuaciones están dados en (Barbero, 2018).

Optimización en Ansys

ANSYS necesita saber qué variables son críticas para la optimización (Barbero & Shahbazi, 2017). Para definir variables, necesitamos saber qué variables tienen un efecto sobre la variable a minimizar (Camarena, Orozco, Orozco, & Cisneros, 2013). En este estudio el objetivo es minimizar el volumen de una placa laminar que está directamente relacionado con el peso de la lámina. ANSYS categoriza tres tipos de variables para la optimización del diseño:

Variables de Diseño (DV)

Son las variables independientes que afectan directamente al objetivo del diseño. En este estudio, el ancho y la altura de la placa son los DVs. Cambiar cualquiera de las variables tiene un efecto directo en la solución del problema.



The Search Process.

Figura 7. Proceso de Optimización
Fuente: Gary Vanderplaats

Variables de Estado (SV)

Son variables dependientes que cambian como resultado del cambio de DVs. Estas variables son necesarias para restringir el diseño. En este estudio, el SV es el esfuerzo máximo en la placa. Sin este SV, la optimización continuará hasta que tanto el ancho como el alto sean cero. Esto minimizaría el peso a cero, lo que no es un resultado útil.

Variable Objetivo (VO)

La variable objetivo es la única variable de la optimización que debe minimizarse. En nuestro problema, estaremos minimizando el volumen de la placa.

Es de mencionar, que ninguna de las variables definidas en ANSYS puede tener valores negativos. Una vez establecidas las variables de diseño, se necesita definir rangos y tolerancias para cada variable. Para el ancho y alto, se selecciona un rango adecuado para cada uno. Debido a que un pequeño cambio en el ancho o la altura tiene un efecto profundo en el volumen de la placa, se selecciona una tolerancia de 0.01 mm. Las tolerancias son necesarias porque le indican a ANSYS la mayor cantidad de cambio que puede experimentar una variable antes de la convergencia del problema.

El módulo de optimización (/OPT) es una parte esencial del programa ANSYS que puede ser empleada para determinar el diseño óptimo. La optimización (SCHOLTEN, 2012) se puede ejecutar en modo gráfico o por medio de línea de comandos sobre la consola CMD, propiedad de Windows (Microsoft), opción que conviene más por ahorrar tiempos de computación y así obtener los resultados más rápidamente.

El comando que se utiliza está descrito y ejemplificado a continuación:

```
ansys170 -b -p1 5 -p2 20 -p3 n -i rec_apdlOPT.txt -o rsalida.txt
```

Ansys170 es la aplicación que ejecuta el resto de la sentencia, -b implica modo batch, -i (input), describe el archivo o script que será ejecutado mientras que -o (output), designa el nombre del archivo de salida del proceso. Las variables p1, p2 y p3 recogen valores, los dos primeros para enviarlos a la función K(KEYPOINT) del APDL como parámetro para formar la figura geométrica en dos dimensiones (altura y base) y el tercer valor es la fuerza de presión para aplicarla a la placa.

Modelos de Optimizadores en Ansys Random (OPRAND)

$$x = x^* = \text{vector generado aleatoriamente} \quad (7)$$

Si se han definido variables de estado o función objetivo, se obtendrán los valores de g_i^* , h_i^* , w_i^* y f^* , caso contrario se ejecuta un lazo simple o iteración.

En este caso f^* , g_i^* , h_i^* y w_i^* (si están definidas) tomarán los valores correspondientes a x^* . La función objetivo y las variables de estado no necesitan estar definidas, pero puede ser útil definir las si se piensa realizar la optimización a continuación (ANSYS, Inc., "Release 11.0 Documentation for ANSYS," n.d.). Cada iteración de diseño aleatoria es equivalente a un lazo completo de análisis. Las iteraciones aleatorias continúan hasta que se satisfaga alguna de las condiciones siguientes:

$$n_r = N_r$$

$$n_f = N_f, \text{ Si } N_f \geq 1$$

Primer Orden (FIRST)

Otro método, que funciona mejor en problemas, que requieren un grado alto de precisión, es el método de primer orden (Espiga, Gracia, Doblare, & Industriales, 1989). Es un método basado en sensibilidades de diseño y utiliza información de las primeras derivadas, es decir, gradientes de las variables dependientes, respecto de las variables de diseño. Es la mejor opción si se requiere alta precisión y las variables dependientes varían mucho en un espacio grande de diseño. Sin embargo, esta precisión tiene asociado mucho más tiempo de cálculo.

La formulación del problema con restricciones expuestas se transforma en uno sin restricciones mediante funciones de penalización. Se calculan las derivadas para la función objetivo y las funciones de penalización de las variables de estado (ANSYS, Inc., "Release 11.0 Documentation for ANSYS," n.d.).

Con este método se realizan búsquedas de tipo "steepest descent" y de direcciones conjugadas durante cada iteración, hasta que se alcanza la convergencia. Cada iteración se compone de sub iteraciones que incluyen el cálculo de la dirección de la búsqueda y del gradiente (derivadas). Es decir, una iteración de optimización de diseño de primer orden realizará varios lazos del análisis. Comparado con el método de aproximación del subproblema, este método es más costoso computacionalmente y más exacto.

Aproximación por Subproblemas (SUBP)

Este método de optimización se puede describir como un método de orden cero avanzados (Proceso cuya velocidad es constante e independiente de la concentración), en el que se requieren sólo los valores de las variables dependientes (función objetivo y variables de estado) y no sus derivadas (se selecciona con el comando OPTYPE, SUBP).

Las variables dependientes son reemplazadas con aproximaciones por medio de mínimos cuadrados, y el problema restringido se convierte en un problema sin restricciones utilizando funciones de penalización (Camarena et al., 2013). La minimización se realiza en cada iteración con la función penalizada (llamada subproblema) hasta que se logra la convergencia o se llega al final del proceso.

Para este método cada iteración equivale a un lazo completo del análisis (ANSYS, Inc., "Release 11.0 Documentation for ANSYS," n.d.). Dado que el método depende de la aproximación de la función objetivo y de cada variable de estado, se necesita una cierta cantidad de datos en forma de conjuntos de diseño. Estos datos preliminares pueden ser engendrados directamente por el usuario utilizando cualquier otra herramienta o método de optimización. Si no los ha definido, el método engendrará los conjuntos de diseño al azar (Vigueras, 2013).

Resultados

La Tabla 4 contiene el resultado de la optimización del mejor de los 3 materiales de cada método de optimización aplicado, registra el índice de fallo MTSai (criterio de Tsai-Wu), ángulo de las láminas ang1, ang2, ang3, ang4, espesor, volumen optimizado TVol, la última columna refleja el valor MPA de la presión ejercida a la placa.

Tabla 4. Resultados de la Optimización, uso del material AS-3501

MÉTODO	SET	TVOL	MTSAI	ANG1	ANG2	ANG3	ANG4	TL	MPA
RAND	1	496,525	0,987944	97,1215	115,236	143,532	175,71	0,413771	50
SUBP	2	385,162	0,932833	111,295	152,64	0,778605	84,5332	0,320968	50
FIRST	3	188,333	0,993896	0,195827	6,14084	1,51175	82,8251	0,156944	50

Fuente: Propia

El coeficiente de fallo de Tsai-Wu, es quien condiciona el proceso de optimización y este termina cuando el índice se acerca a 1.

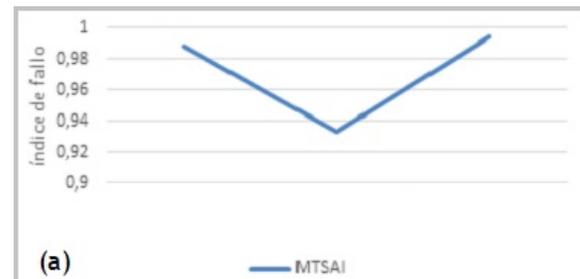


Figura 8. Tendencias Resultantes

Fuente: Propia

Las dos curvas reflejan un comportamiento similar y sus tendencias son decrecientes; esta reducción de volumen, peso y espesor en la placa una presión constante. Por otra parte, el índice de fallo condiciona la optimización como variable de estado, su curva muestra una tendencia creciente al aplicar el método RAND, mientras que en el método SUB decrece al mismo instante se aplica el método FIRST y su curva varía a creciente puesto este debe llegar a 1 para terminar el proceso.

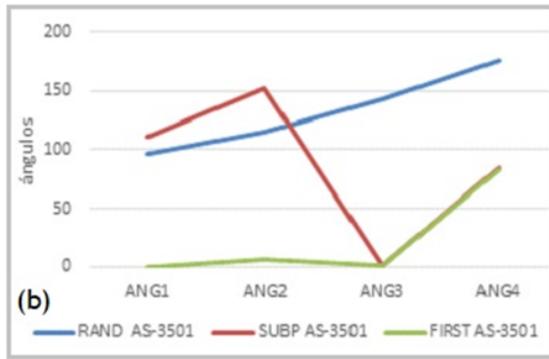


Figura 9. Tendencias Resultantes
Fuente: Propia

En (figura. 9) se muestran las curvas de las variables de diseño de los ángulos del material AS-3501 con el método RAND y el material AS-3501 tienen tendencias crecientes mientras que el método SUP del material AS-3501 tienen tendencias de crecientes.

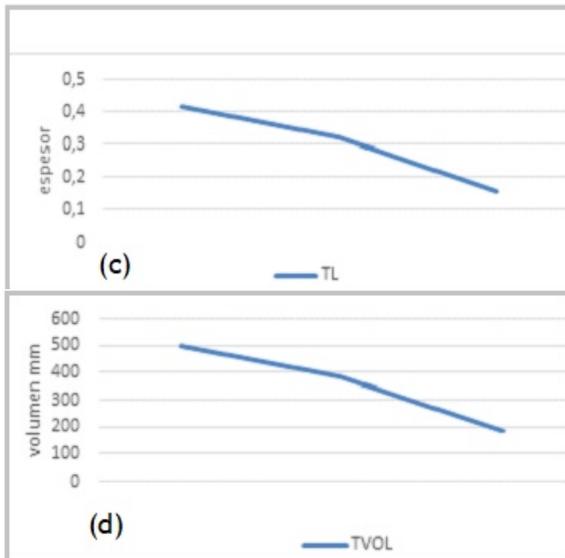


Figura 10. Tendencias del Espesor y el Volumen
Fuente: Propia

La (figura. 10) muestra que el volumen de la placa se minimiza al mismo tiempo que el espesor del laminado se reduce en los 3 métodos.

Tabla 5. Reducción del Volumen usando First

MATERIAL	TVOL	% REDUCCIÓN
T300-5208	486,966	2,6068
AS4D-9310	321,664	35,6672
AS-3501	188,333	62,3334

Fuente: Propia

En la tabla 5 se exponen la información sobre la reducción del volumen en cada uno de los materiales mediante la optimización FIRST, se elige y resalta en rojo al material AS-3501 como óptimo para la investigación inmersa, ya que se ha alcanzado a reducir el 62.33% frente a los otros materiales partiendo de un volumen de (500mm cúbicos).

Así mismo en la (figura 11) se observa la curva creciente que tiene el material T300-5208 ya que es el de más volumen antes de ser aplicada la reducción mientras que el material AS-3501 su curva es decreciente. Al aplicar el porcentaje de reducción se invierten los valores de los materiales y observamos que el material T300-5208 decrece en comparación al material AS-3501 el cual su curva crece significativamente siendo este material el más relevante de los 3 debido a la reducción del volumen que se genera en el proceso de optimización.

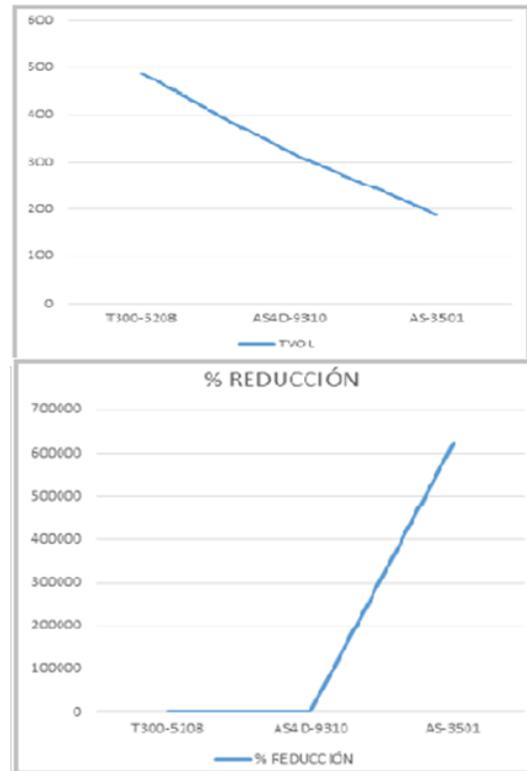


Figura 11. Tendencias en la Reducción del Volumen
Fuente: Propia

Observamos en la figura 12(a, b), 13(c,d) las gráficas de los índices de deformación (DMX) pre optimización, y en la figura 8 (d, e, f) post optimización encontrados para cada uno de los materiales utilizados con la fuerza experimental de 50 MPa (fuerza más relevante para este estudio)

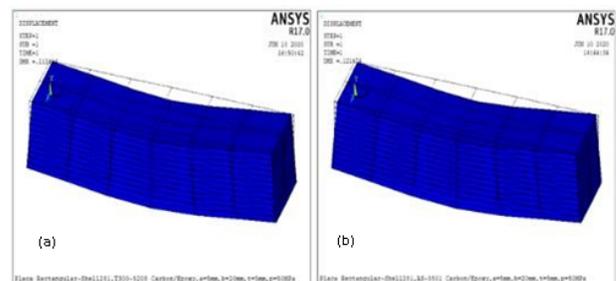


Figura 12. Resultados de Deformación
Fuente: Propia

En la figura (12a) se visualiza la deformación o desplazamiento, que se presenta en la placa de material AS-3501, tiene un índice de desplazamiento DMX de 0.12; sin embargo, en la figura (12b) se observa que deformación o desplazamiento DMX que se presenta en la placa con el material T300-5200 es menor, el índice de desplazamiento DM es de 0.11.

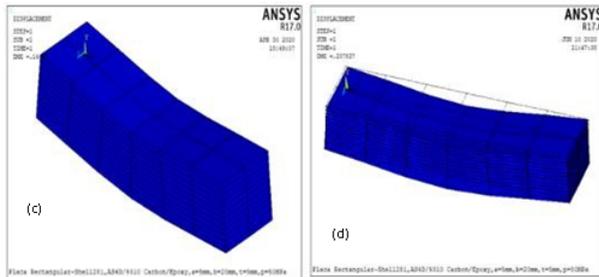


Figura 13. Resultados de Deformación
Fuente: Propia

En la figura (13c) el índice de desplazamiento o deformación DMX para el material óptimo elegido (AS4-9310) es de 0.14; el índice es más alto que los otros materiales.

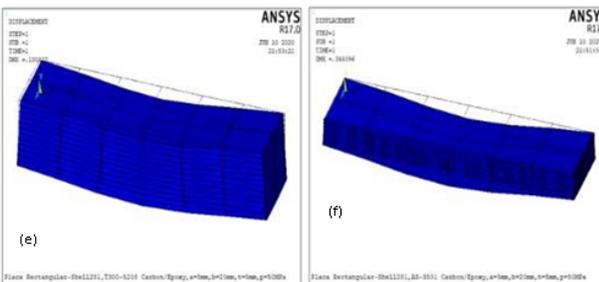


Figura 14. Resultados de Deformación
Fuente: Propia

En la tabla 6 se recogen los índices de deformación pre y post de optimización mediante el método optimo elegido (FIRST), en la cual se observa un nivel más alto de deformación para el material AS- 3501(0.344096), que es aceptable, puesto que el grosor que se ha podido obtener es muy reducido.

Tabla 6. Reducción

MATERIAL	DEFORMACION PRE-O	DEFORMACION POST-O
T300-5208	0.112494	0.130322
AS4D-9310	0.14405	0.237827
AS-3501	0.121674	0.344096

Fuente: Propia

Conclusiones

Se ha podido crear la estructura rectangular mediante el Mechanical APDL de ANSYS, a través de inserción de datos específicos en la codificación de los Scripts, datos como el sistema de unidades, el área, altura y espesor de cada lámina arrojando un prisma rectangular de medidas específicas, listo para ser sometido a fuerzas externas en el área central de sus dimensiones. Prisma dividido virtualmente en tres áreas para el caso.

Se ha calculado el índice de fallo o ruptura a través del criterio de fallos de Tsai Wu el cual se debe acercar a 1, en el caso de llegar se comprende inmediatamente que se ha producido una delaminación (ruptura).

Se han elaborado diagramas acerca de todos los procesos aplicados a la figura geométrica objeto del estudio, con sus respectivos gráficos estadísticos de tendencias.

Para el caso de las deformaciones, se ha procedido a complementar la investigación con seis tipos de índices de deformación (uno para cada material en dos situaciones), presentados gráficamente en este estudio los cuales fueron obtenidos en procesos previos y posteriores a las optimizaciones, el material elegido como el mejor en este tratado es el AS-3501 (Springer & Kollar, 2003), pero se determina que el comportamiento en el índice de deformación de este material se debe al decremento sustancial en el volumen del mismo.

Por lo tanto se concluye, que el material más idóneo para hacer uso en la fabricación de componentes rectangulares de fibra de carbono, por su resistencia a la aplicación de fuerzas externas y volumétricamente más óptimo (optimización más eficiente obtenida por el método First Order Optimization), es el material AS-3501, que se considera apto para la elaboración de productos en la industria, en este modelo se alcanzó una resistencia a los 50MPa reduciéndose su volumen en más de un 60%; la reducción de volumen actual más alta en comparación a los otros dos métodos de optimización.

Referencias Bibliográficas

ANSYS, Inc., "Release 11.0 Documentation for ANSYS." (n.d.).
 Barbero, E. J. (2018). Introduction to Composite Materials Design, Third Edition. In *Introduction to Composite Materials Design, Third Edition* (3ra ed.). <https://doi.org/10.1201/9781315296494>
 Barbero, E. J., & Shahbazi, M. (2017). Determination of material properties for ANSYS progressive damage analysis of laminated composites. *Composite Structures*, 176, 768–779. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.074>
 Camarena, V. A. A., Orozco, E. R. L., Orozco, S. E. L., & Cisneros, M. T. (2013). *Optimización de una placa de materiales compuestos empleando algoritmos genéticos y templado simulado*. 1070–1078.
 Consultants, N., & Mundial, S. G. (2002). Los materiales compuestos Dinamismo e innovación. *SESSI DiGiTip Ministere de l'Economie, Des Finances et de l'Industrie*, (recuadro 2).
 Dávila, J., Galeas, S., Guerrero, V., Pontón, P., Rosas, N., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). *Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales E Industriales*. Quito, Ecuador: Imprefep, 2011, pp. 390.
 Do, U., Do, E., Janeiro, R. I. O. D. E., Tecnologia, C. D. E., Faculdade, N., Laborat, D. E. E., ... Ciclo, D. O. (n.d.). *Ref Buis V Eusta.Pdf*.
 Espiga, F., Gracia, L., Doblare, M., & Industriales, I. (1989). Optimizacion de formas en elasticidad bidimensional en medios homogéneos mediante el metodo de los elementos de contorno. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 5, 453–471.
 García, S. (2007). ANÁLISIS DE LAMINADOS DE MATERIALES

COMPUESTOS CON PRECARGA EN SU PLANO Y SOMETIDOS A IMPACTO. (tesis doctoral). UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.

- Miravete, Antonio; E. Larrodé, L. Castejón, R. Clemente, M.A. Jiménez, M. Lizaranzu, J. Cuartero, D. Revuelta, C. Millán, V. Gómez, J. Calvo, N. T. y J. L. P. (2012). *Materiales Compuestos II*. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-II-Antonio-Miravete>
- Mirlisenna, G. (2016). Método de elementos finitos: ¿qué es?
- Navarro, C. (2008). Introducción a los Materiales Compuestos. Retrieved June 19, 2019, from UC3M website: <http://ocw.uc3m.es/cursos-archivados/elasticidad-y-resistencia-ii/material-de-clase>
- Patiño Pérez, D., Corz Rodríguez, A., & Mora, C. M. (2020). Diseño Óptimo de un Recipiente a Presión Toroidal de Espesor Variable para Almacenar Hidrógeno en Automóviles Optimal Design of a Toroidal Pressure Vessel of Variable Thickness for Storing Hydrogen in Cars. *ECUADORIAN SCIENCE JOURNAL*, 4(2), 94–100. <https://doi.org/10.46480/esj.4.2.107>
- Reddy, J. N. (2004). Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells Theory and Analysis. In *Library*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0095-9>
- SCHOLTEN, P. (2012, June 25). Desarrollo de un método de optimización de secuencia de apilado en componentes laminados con criterios de rotura de la última lámina. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/16249>
- Springer, G. S., & Kollar, L. P. (2003). Displacements, Strains, and Stresses. In *Mechanics of composite structures*. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(94\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0263-8223(94)90053-1)
- Timoshenko, S. (1941). Theory of Plates and Shells. In *Nature*. <https://doi.org/10.1038/148606a0>
- Tsai, S. W. (2008). Theory of Composites Design. *The Theory of Composites*, by Graeme W. Milton, Pp. 748. ISBN 0521781256. Cambridge, UK: Cambridge University Press, May 2002.
- Uribe, C. L. (2011). Fibra de Carbono ., *METAL Actual*, 10–15. Retrieved from www.metalactual.com
- Zahr, J. (2010). *Comportamiento Mecánico de Materiales Compuestos de Matriz Metálica y Refuerzo de Partículas. Un Enfoque Basado en Celdas Multipartícula*. Dr., Tesis, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés:Madrid.