

COMPARACIÓN DE PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y COMPUTACIONALES PARA LA EVALUACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

Jaime Andrés Vélez Zea ¹, Manuel Ignacio Zapata Londoño ², Juan Santiago Villegas López ^{3*}, Leidy Selene Alzate Acosta ⁴, Katherine Pérez Zapata ⁵, Franklin Jaramillo ⁶

1,2,4,5,6: Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales – CIDEMAT, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia.

3: Futech Group S.A.S., Medellín, Colombia.

* E-mail: javelezea@uis.edu.co

RESUMEN

Dentro de las aplicaciones de los materiales compuestos de matriz polimérica, se ha encontrado que estos ofrecen propiedades deseables para la industria estructural, naval, aeronáutica, automovilística y eléctrica. El estudio de estos materiales ha traído consigo, además de un avance progresivo en el área de la caracterización física y mecánica de los compuesto a partir de formulaciones analíticas, una cada vez más necesaria expansión de la aplicación del Método de Elementos Finitos (MEF) con los mismos fines, el cual ha demostrado su utilidad en predecir el comportamiento del material basado en datos obtenidos analítica o experimentalmente con el fin de predecir el comportamiento mecánico del material en casos en los que la complejidad geométrica o del estado de cargas dificulten o hagan la experimentación excesivamente costosa. En el presente estudio se busca establecer una metodología para la generación de modelos MEF con valor predictivo partir de un número reducido de pruebas experimentales y establecer la idoneidad de esta metodología para su uso en la empresa.

Con este fin, se parte de la fabricación de una serie de laminados producidos en una empresa local en los cuales se varía la orientación de las fibras de vidrio mediante la técnica *hand lay up*, siendo estos caracterizados física y mecánicamente a través de ensayos de tracción, ignición y análisis de defectos. Posteriormente se elaboraron modelos MEF en ANSYS ®. En los cuales se llevaron a cabo simulaciones de tracción y se compararon los resultados experimentales con los simulados estableciendo el patrón de comportamiento mecánico de los laminados bajo diferentes configuraciones de tipo y orientación de fibra, así como de número de capas.

Los resultados de las pruebas de tracción experimentales y simulados para laminados tipo Mat (fibra con orientación aleatoria) concuerdan con margen de error inferior al 6%, mientras que para las fibras tejidas a 90° el error alcanza el 34,2%, lo que puede deberse a variaciones en el proceso de fabricación.

Palabras clave: Modelación computacional, materiales compuestos, matriz polimérica, refuerzo cerámico.

COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL PROCEDURES FOR THE EVALUATION OF POLYMER MATRIX COMPOSITES

ABSTRACT

It has been found that composite materials offer desirable mechanical properties for the naval, structural, aerospace, automotive (among others) industries. The study of those materials has advanced significantly the fields of the physical and mechanical characterization using analytic formulations, and also in the field of the computational simulations particularly in the use of the Finite Elements Method (FEM). This method has been found useful in the prediction of the mechanical properties of the composites in cases in which the geometries or the load state is too complex for the use of analytical formulations or too expensive for its experimental evaluation.

In this study the goal is to establish a methodology for the definition of FEM models with predictive capabilities based in a limited series of inexpensive experimental tests and establish the accuracy of those models.

A series of laminates are produced by the specifications of a local firm in which the fiber orientation varies using the hand lay-up technique and those are characterized using traction, ignition and defects experimental methods. FEM models of the traction test for each laminated were defined using ANSYS ® and the results obtained were compared with the experimental results establishing a mechanical response pattern under different configurations of fiber orientation, type and layer numbers.

The results of the comparison between experimental and FEM approximations for the Mat (random oriented) laminates agree with an error lower than 6% while the error for the woven fabric in a 90° orientation reach the 34.2% which can be attributed to variations in the manufacturing process.

Keywords: Computational modeling, composite materials, polymeric matrix, ceramic reinforcement.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos de matriz de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) son usados generalmente en aplicaciones que requieren una alta relación entre rigidez y resistencia por unidad de peso, características que se desprenden de la propiedades específicas de las dos fases que conforman este tipo de compuesto, siendo estas la fibra de vidrio que actúa como refuerzo y la resina de poliéster como aglutinante que es la encargada de crear y mantener la geometría final del producto [1]. El resultado de esta asociación produce un material en el cual las propiedades mecánicas resultantes superan las individuales de sus componentes [2,3]. En general las mejores propiedades pueden alcanzarse cuando la fibra se encuentra sometida a esfuerzos próximos a su máximo, siendo este esfuerzo transmitido por la matriz de resina polimérica [4].

Dado el número creciente de combinaciones de tipos de fibra y resina, así como la variabilidad en cuanto a los arreglos geométricos de la fibra dentro de la matriz, es posible desarrollar compuestos PRFV con propiedades mecánicas balanceadas específicas que satisfagan aplicaciones en áreas tan dispares como la producción de componentes electrónicos, la medicina o las industrias aeronáutica, naval y automotriz [5]. Además de sus propiedades mecánicas, baja densidad y estabilidad química (especialmente en ambientes corrosivos) hace que en casos particulares sea deseable reemplazar el material metálico tradicionalmente usado por compuestos PRFV que

ofrecen una mejor resistencia a los elementos a la vez que su bajo peso los hace fáciles de transportar y manipular.

Si bien los procesos de fabricación de componentes en PRFV son variados, uno de los más comunes consiste en el moldeo abierto como la técnica de laminado manual (manual lay-up), siendo sin duda la más antigua de todas las técnicas conocidas en la fabricación de piezas con materiales compuestos [1], y es usado particularmente en pequeñas y medianas empresas dado que por su naturaleza no requiere una gran inversión en equipos o procesos tecnológicamente complejos.

Este método consiste en la aplicación manual de capas de fibra impregnadas con resina y compactadas por rodillo o brocha de tal forma que adopten la geometría de una preforma o molde y, a pesar de su bajo costo, conlleva también una gran variabilidad en cuanto al resultado final muy dependiente de la pericia de los operarios encargados de producir componentes con composición y estructuras uniformes.

Al margen del proceso empleado, uno de los mayores retos en la industria en el uso de los materiales compuestos de PRFV, consiste precisamente en la amplia variabilidad de sus propiedades mecánicas dado que estas se ven afectadas no solo por los materiales usados, sino también por el tipo de proceso de fabricación empleado, la disposición de las fibras en relación al estado de carga, los espesores y el tipo de matriz polimérica, la pericia manual del operario en el caso de moldeo abierto y el contenido de defectos resultante, etc.

Esta variabilidad hace que el proceso de diseño u optimización de componentes basados en el PRFV requiera un proceso de verificación experimental para cada una de las configuraciones del material, lo que eleva los costos de desarrollo y disminuye por tanto la capacidad de pequeñas y medianas empresas del ramo de responder a las necesidades del mercado de manera oportuna. Para subsanar esta desventaja, se ha producido un gran desarrollo en el área de la predicción de las propiedades elásticas de este tipo de compuestos en las últimas décadas relacionadas a aspectos como la disposición de las fibras o las propiedades de la fibra y la matriz [6], los cuales afectan las propiedades resultantes del compuesto de manera compleja, difícil de estimar a priori.

Los métodos empleados para el análisis predictivo de compuestos pueden ser clasificados generalmente como analíticos o computacionales.

Métodos analíticos como reglas de mezcla, de variación de frontera o teoría de homogeneidad [7] son aproximaciones que producen estimados de las propiedades de los compuestos, pero solo son aplicables a geometrías sencillas y no pueden extrapolarse para arreglos complejos de fibra, por lo que se requieren aproximaciones computacionales como el MEF que ofrece mayor flexibilidad en cuanto a las condiciones geométricas y estructurales del problema.

Otra clasificación de las metodologías predictivas para PRFV pueden subdividirse de acuerdo con la escala en la cual se realice el análisis [8]:

- **Micromecánica:** En la cual se estudia la orientación y las propiedades mecánicas de las fibras.
- **Mesomecánica:** Consiste en la aplicación del concepto de la homogeneidad de los componentes y evalúa las propiedades de una celda de tejido.
- **Macromecánica:** Predice las propiedades de las fibras bajo deformaciones complejas asumiendo que el tejido es un medio continuo.

Tanto los métodos analíticos como los computacionales han sido ampliamente explorados en la literatura, véase los trabajos de McCartney [9] o de Rohwer [10] en procedimientos analíticos y la review de Kreja sobre modelos computacionales [11].

Un inconveniente de esta aproximación consiste en el alto costo de los paquetes especializados de simulación comerciales que, unido al costo adicional de los módulos y licencias especiales requeridas para el procesamiento de materiales compuestos puede ser prohibitivo para la implementación de nuevos procedimientos de diseño, sobre todo en empresas de manufactura pequeñas donde el uso de técnicas analíticas es común a pesar de requerir cálculos no siempre viables con el fin de predecir el comportamiento mecánico de estructuras con geometrías no estándar.

Con el fin de establecer una alternativa de bajo costo para incorporar en sus procesos de diseño las propiedades mecánicas emergentes de los laminados de PRFV; en este estudio se propone la comparación de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente, analíticamente (micromecánica) y las obtenidas mediante simulación de configuraciones típicas de laminados (macromecánica) con el fin de definir si el uso de la aproximación analítica en conjunción con modelos MEF simples ofrecen aproximaciones útiles en cuanto a sus capacidades predictivas.

Para este estudio se establecieron de forma experimental y analítica las propiedades mecánicas de 8 tipos de combinaciones de materiales compuestos, típicas en la industria local de fabricación de estructuras compuestas, se definió un modelo de material en ANSYS® para cada uno de ellos y se comparó los resultados obtenidos por las simulaciones con los resultados experimentales con el fin de establecer la posibilidad de usar una modelo de material basado en la micromecánica que pueda ser usado en simulaciones MEF simples que no requieran el uso de paquetes computacionales especializados.

Los resultados obtenidos demuestran que, si bien en algunos arreglos de PRFV los resultados experimentales y simulados son generalmente consistentes, es necesario mejorar los procesos de fabricación manual con el fin de que el comportamiento mecánico de los laminados producidos pueda ser previsto por el modelo MEF.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Como refuerzos se usan fibra de vidrio tipo E en forma de Mat 450 denominado M4, y Woven Roving tipo 800 denominado R8. La matriz empleada fue una resina de poliéster insaturado preacelerada con octoato de cobalto e iniciada con peróxido de metiletilcetona (MEKP). Las propiedades de las fibras de vidrio y de la resina empleadas en este artículo se listan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de materiales base empleadas en los cálculos y en la simulación.

Propiedad	Fibra de vidrio [12]	Resina [13]
E (MPa)	7,24E+04	3,3E+3
Poisson	0,2	0,3
Densidad (g/mm ³)	2,6E-3	1,22E-3

2.2. Definición de laminados

Se fabricaron laminados de PRFV mediante la técnica de moldeo abierto en placas planas, utilizando diferentes arreglos de resina y fibra comúnmente usados en una empresa local. Los arreglos analizados se muestran en la Tabla 2, ahí se muestra que para los laminados 1 y 2 se tienen dos y tres capas respectivamente, mientras que para el resto de los laminados el primer número del código corresponde al número de capas, seguido de la orientación de las fibras de *Woven Roving* en grados. Las orientaciones contempladas son a 45° y 90° (Figura 1).

Tabla 2. Configuraciones de laminados.

Laminado	Configuración
1	M4 + M4
2	M4 + M4 + M4
3-90	M4 + R8(90°) + M4
3-45	M4 + R8(45°) + M4
4-90	M4 + R8(90°) + M4 + M4
4-45	M4 + R8(45°) + M4 + M4
5-90	M4 + R8(90°) + M4 + R8(90°) + M4
5-45	M4 + R8(45°) + M4 + R8(45°) + M4
6-90	M4 + R8(90°) + M4 + R8(90°) + M4 + M4
6-45	M4 + R8(45°) + M4 + R8(45°) + M4 + M4

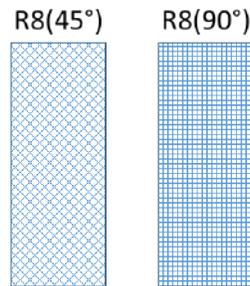


Figura 1. Configuraciones de Woven Roving (R8).

2.3. Pruebas experimentales

2.3.1 Tracción

Se realizaron los ensayos de tracción a cada uno de los laminados de acuerdo con la norma ASTM D3039M-17 [14], usando una máquina universal de ensayos (INSTRON 3382), un extensómetro calibrado y 3 probetas estándar. Se tomaron probetas de medida nominal de largo 250 mm y ancho 25 mm y se fallaron a una velocidad de 2 mm/min.

2.3.2 Clasificación de defectos visuales

Bajo la norma ASTM D2563-08 [15] se clasifican los principales defectos que pueden producirse en el proceso de laminado, con el fin de determinar la calidad superficial del acabado de las probetas.

2.3.3 Pérdidas por ignición

Con el fin de establecer los porcentajes de fibra y resina se realizó una prueba de pérdida por ignición según la norma ASTM D2584-11 [16] usando un horno Carbolite CWF 1200 a 565 °C con un tiempo de sostenimiento de 3 horas. El porcentaje en peso de resina se calculó usando la ecuación (1):

$$\%W_{res} = \frac{masa_{inicial} - masa_{final}}{masa_{inicial}} * 100 \quad (1)$$

2.4 Procedimiento analítico para la obtención de propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los diferentes laminados estudiados se derivan de las propiedades de dos tipos de lámina, siendo estos M4 y R8, el primero compuesto de fibra con disposición aleatoria en una matriz de resina y el segundo conformado por fibra tejida en matriz polimérica. Para este estudio se trata la lámina M4 como isotrópica y la R8 como ortotrópica. Además, se asume un estado plano de esfuerzos puesto que el espesor de los laminados es mucho menor a la magnitud de las otras dos direcciones principales.

2.4.1 Cálculo de propiedades de R8

Partiendo de los supuestos arriba descritos, se establece, a través de una aproximación desde la micromecánica, la relación esfuerzo-deformación en la ecuación (2) donde solo las variables E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} , y ν_{21} son constantes independientes.

$$\{\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \gamma_{12}\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \{\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_{12}\} \quad (2)$$

Si se asume también que no hay vacíos en el laminado, es decir, existe una adherencia perfecta entre la matriz y la fibra, la determinación de E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} , y ν_{21} puede calcularse a partir de las fracciones de volumen y las propiedades de cada componente con las ecuaciones (3-6):

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \quad (3)$$

$$E_{22} = \frac{E_f E_m}{V_f E_m + V_m E_f} \quad (4)$$

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (5)$$

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (6)$$

2.4.2 Cálculo de propiedades de M4

Dado que las fibras en M4 están distribuidas aleatoriamente, con una longitud aproximada de 25mm y un diámetro de 25 μm , se usa la aproximación de Halpin-Tsai [17] para determinar sus propiedades a partir de las ecuaciones (7-9):

$$E_{ran} = \frac{3}{8}E_{11} + \frac{5}{8}E_{22} \quad (7)$$

$$G_{ran} = \frac{1}{8}E_{11} + \frac{1}{4}E_{22} \quad (8)$$

$$\nu_{ran} = \frac{E_{ran}}{2G_{ran}} - 1 \quad (9)$$

Esta aproximación es suficiente si solo se requieren las propiedades de los laminados en los ejes principales, dado que la orientación de la fibra en los laminados con R8 influye en las propiedades emergentes de estos bajo el ensayo de tracción y estas son calculadas por el proceso de simulación.

2.5 Simulaciones

La modelación de laminados en ANSYS® requiere la definición de las propiedades de cada una de las láminas (M4 y R8) de material que conforman los diferentes laminados.

Esta aproximación hace necesarias las siguientes simplificaciones:

- La orientación de la fibra solo aplica a las capas R8, dado que las M4 son aleatorias, por lo tanto, se consideran como isotrópicas.
- Solo se contemplan orientaciones de fibra de 45° y 90°.
- Dado el tipo de simulación, el comportamiento mecánico del material solo tiene capacidades predictivas en la región elástica de la curva esfuerzo-deformación, quedando los fenómenos plásticos fuera del foco de este estudio.

2.5.1 Preprocesamiento

La modelación de los materiales se llevó a cabo en el módulo Composite Pre de ANSYS®, en el cual se establecen las propiedades de las capas M4 y R8 tal como se obtuvieron previamente por el procedimiento analítico. Para cada laminado se establecen el número, tipo de capas y orientación de las fibras, así como las dimensiones promedio de las probetas usadas en los ensayos experimentales de tracción. El espesor de cada lámina se supone como el espesor total del laminado dividido por el número de láminas.

Para el ensayo de tracción se modela una probeta rectangular con geometría acorde a la norma ASTM D3039M-17. Las condiciones de frontera se definen como una condición de anclaje en la zona correspondiente a la mordaza inferior, mientras que se aplica una fuerza en la zona correspondiente a la mordaza superior con un valor igual a la máxima carga promedio de los ensayos experimentales realizados para cada laminado. El mallado es estructurado con elementos tipo SHELL181 con 270 nodos y 220 elementos.

La geometría, malla y condiciones de frontera pueden verse en la Figura 2:



Figura 2. Esquema de la simulación de una probeta de tracción, condiciones de frontera y enmallado.

La simulación, para esta primera aproximación es de carácter estática y lineal, por lo tanto, no contempla fenómenos de plasticidad o inerciales.

2.5.2 Postprocesamiento

Las variables comparadas fueron las deformaciones y los esfuerzos máximos principales dado que estos son los descriptores principales del comportamiento mecánico del material.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Propiedades láminas

Las propiedades de las láminas M4 y R8 calculadas usando las ecuaciones de micromecánica descritas en la metodología, se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. *Propiedades mecánicas de las láminas.*

Propiedad.	M4	R8
Fracción de fibra (%)	28	30
Ex (MPa)	9,734E+04	23,91E+04
Ey (MPa)	9,734E+04	23,91E+04
Ez (MPa)	3,3E+04	3,3E+04
Gxy (MPa)	3,52E+04	1,780E+03
Gyz (MPa)	3,52E+04	8,65E+03
Gxz (MPa)	3,52E+04	1,780E+03
NUxy	3,51E-01	27E-02
NUxz	3,51E-01	5E-03
NUyz	3,51E-01	27E-02
Densidad (g/cm ³)	1,85	2,03

3.2 Clasificación de defectos visuales

Los defectos presentados con mayor frecuencia son delaminaciones superficiales, ampollas, puntos secos, falta de relleno y segregación de bordes, en la Tabla 4 se puede apreciarse la existencia (S) o la ausencia (N) de los defectos visuales presentes en cada uno de los laminados. En general los laminados presentaron pocos defectos visuales

Tabla 4. *Clasificación de defectos visuales.*

Lámina	Ampollas superficiales	Puntos secos	Delaminación superficial	Defecto maquinado	Estrías	Segregación en bordes	Falta de relleno
1	N	N	N	N	N	N	N
2	N	N	N	N	N	N	N
3-90	N	N	S	N	N	S	N
3-45	S	N	N	N	S	N	N
4-90	S	S	N	S	N	S	N
4-45	S	N	N	N	N	S	N
5-90	N	S	S	N	N	N	S
5-45	N	N	N	S	N	S	N
6-90	N	N	N	N	N	N	N
6-45	N	S	S	N	N	S	N

De este resultado se destaca que no se presenta una tendencia aparente a la aparición de defectos relacionada con el incremento del número de capas utilizadas dado que el laminado que muestra mayores defectos es el laminado 4-90, seguido por el laminado 6-45, mientras que el laminado 6-90 no muestra defectos.

3.3. Perdidas por ignición

Los pesos de cada lámina, y los porcentajes en peso de sus componentes pueden verse en la Tabla 5, mientras que los porcentajes en volumen pueden verse en la Tabla 6. Los porcentajes de peso de fibra oscilaron entre 46,7 y 58,10.

Tabla 5. Peso antes y después del compuesto, la resina y la fibra luego de la prueba de ignición.

Lámina	Masa comp (g)	Masa fibra (g)	Masa res. (g)	Resina (% Peso)	Fibra (%Peso)
1	0,59	0,27	0,31	53,30	46,70
2	0,66	0,33	0,33	50,48	49,52
3-90	1,75	0,91	0,84	47,92	52,08
3-45	0,82	0,44	0,38	46,18	53,82
4-90	1,16	0,56	0,60	52,08	47,92
4-45	1,20	0,62	0,58	48,47	51,53
5-90	1,51	0,79	0,72	47,94	52,06
5-45	1,24	0,71	0,53	42,53	57,47
6-90	4,81	2,52	2,30	47,76	52,24
6-45	1,61	0,93	0,67	41,90	58,10

Tabla 6. Porcentaje de volumen de fibra y resina.

Lámina	%Volumen fibra	%Volumen resina
1	29,41	70,59
2	31,82	68,18
3-90	34,07	65,93
3-45	35,66	64,34
4-90	30,45	69,55
4-45	33,59	66,41
5-90	34,06	65,94
5-45	39,12	60,88
6-90	34,22	65,78
6-45	39,74	60,26

Se observó un mayor uso de resina en los laminados con más de 4 capas posiblemente debido a que el Mat consume más resina para su completa mojabilidad. Un mayor porcentaje de fibra aumenta la resistencia a la tracción, principalmente en la dirección de las fibras [3,18,19].

Además, se evidencia una diferencia en porcentaje de fibra entre los mismos laminados dependiendo de su orientación, siendo esta diferencia de menos del 1% en los laminados de tres capas hasta aproximadamente 3% (4 láminas), y 5% (5 y 6 láminas).

3.4. Tracción experimental vs tracción simulada

Para cada laminado se llevó a cabo una simulación de la cual se extrajo el valor de los esfuerzos y deformaciones máximos a partir de los cuales se calculó el módulo de Young aparente. La comparación de los resultados obtenidos puede verse en la Tabla 7 y la Figura 3.

Tabla 7. Resultados ensayos de tracción experimentales y simulados.

Lámina	Nº Muestras	E exp. (Gpa)	Desv. Est	E sim. (Gpa)	%Error
1	4	9,2	0,3	9,7	6,0
2	4	9,6	0,8	9,7	0,7
3-90	4	12,9	0,6	9,8	24,1
3-45	3	10,9	1,9	9,0	17,7
4-90	3	12,3	0,3	9,8	20,2
4-45	4	9,5	1,1	9,5	0,2
5-90	4	14,9	1,2	9,8	34,2
5-45	4	9,9	1,7	8,8	11,6
6-90	4	14,6	0,6	9,8	32,8
6-45	3	10,8	0,4	9,3	14,1

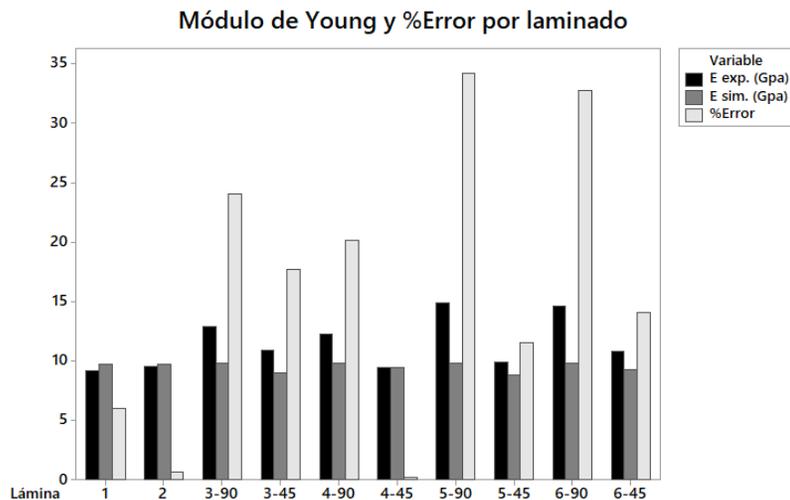


Figura 3. Comparación de módulos de Young y Porcentaje de error para cada tipo de laminado.

Para los laminados consistentes en láminas de M4 (1 y 2), los resultados de las pruebas de tracción, experimentales y simuladas concuerdan con margen de error inferior al 6%, siendo el módulo de Young superior en la simulación al experimental. Este resultado concuerda con lo esperado usando la aproximación de Halpin-Tsai para el cálculo de propiedades de materiales compuestos con fibras en orientación aleatoria. Adicionalmente estos laminados no presentan defectos visuales aparentes, por lo que su comportamiento mecánico se aproxima al ideal.

Las variaciones entre los módulos de Young obtenidos en las simulaciones del mismo laminado pueden deberse a la relación existente entre el porcentaje de volumen de fibra asumido en la formulación y las propiedades mecánicas del material simulado. En este estudio se asumió para el material simulado un porcentaje de volumen de fibra del 30% para todos los laminados, siendo este el valor usual para este tipo de aplicaciones, mientras que, como puede apreciarse en los resultados de pérdidas por ignición, para todos los laminados evaluados se obtuvieron porcentajes de volumen de fibra entre 29,41% y 39,74%.

Además, es de particular interés que estas variaciones en porcentaje de resina se dan entre los mismos laminados a 90° y 45°, donde en condiciones ideales se esperaría un contenido de fibra similar

Los defectos superficiales no parecen tener una influencia marcada en la tendencia al error entre los resultados experimentales y los simulados, como puede apreciarse para el laminado 6-90, no se apreciaron defectos superficiales, sin embargo, presenta un porcentaje de error del 32,8%, mientras que el laminado 6-45 que muestra defectos de delaminación, puntos secos y segregación, el error es del 14,1%.

Como es de esperarse, los resultados obtenidos en las simulaciones no muestran gran variabilidad, mientras de forma no intuitiva, los resultados experimentales varían de forma independiente al número de capas y se ven afectados en gran medida por la orientación de las fibras.

4. CONCLUSIONES

En general, se esperaría un aumento del error entre los resultados experimentales y los simulados a medida que aumenta el número de capas en el laminado dado que durante el proceso de fabricación un número mayor de capas introduce más variables y por tanto, posibilidades de error, esto no se aprecia claramente en los resultados, lo que solo puede atribuirse a variaciones en el proceso de fabricación.

Entre los laminados a 90° y 45° parece haber diferencias marcadas tanto en su fabricación (defectos) como en su composición (porcentaje de fibra), lo que podría atribuirse a diferencias metodológicas en su procesamiento que deben ser estudiadas por la empresa con el fin de mejorar las posibilidades predictivas del modelo MEF.

La definición de propiedades mecánicas de los laminados compuestos en el estudio a través de métodos analíticos para su incorporación en procesos de diseño corresponde de forma aproximada a los resultados de los ensayos experimentales, sin embargo, debe prestarse especial atención a las premisas que se asumen en su cálculo, dada la variabilidad presentada en el proceso de fabricación, particularmente en cuanto a la pericia del operario encargado de esta y que, como se ha expuesto, puede llevar a diferencias significativas entre las propiedades mecánicas esperadas y las obtenidas en el compuesto final.

El uso del MEF como herramienta de diseño de estructuras de matriz polimérica, siendo una herramienta de gran utilidad, comparte las mismas debilidades de los procesos analíticos para establecer las propiedades de los materiales compuestos debido a que la validez de los resultados obtenidos se deriva directamente de la exactitud de parámetros de entrada, no solo los geométricos o de condiciones de frontera, sino de la capacidad del fabricante de mantener la variabilidad de sus procesos bajo un estricto control de calidad que garantice que las propiedades de los materiales reales se ajuste de forma precisa a las propiedades definidas en la simulación.

El modelado MEF de laminados PRFV propuesto puede servir no solo como herramienta predictiva del comportamiento mecánico de los laminados en la empresa a partir de un número reducido de pruebas experimentales de bajo costo, sino como referencia en procesos de control de calidad del proceso dado que la comparación de los resultados obtenidos con el modelo y los resultados experimentales permiten establecer metas claras de desempeño para el material.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada en conjunto por la Convocatoria de Investigación Aplicada de la Universidad de Antioquia del programa de Gestión Tecnológica y la empresa privada FUTECH GROUP SAS.

Los autores agradecen a la empresa FUTECH GROUP SAS adicionalmente por el suministro de los materiales, instalaciones y demás recursos necesarios para el desarrollo de las pruebas para los ensayos.

6. REFERENCIAS

- [1] A. Besednjak, *Materiales Compuestos*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2009.
- [2] S. Mazumdar, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, 1 edition. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2001.
- [3] F. Aramide, P. Atanda, and O. Olorunniwo, “Mechanical properties of a polyester fibre glass composite,” *International Journal of Composite Materials*, vol. 2, no. 6, pp. 147–151, 2012.
- [4] M. Petru and O. Novák, “FEM Analysis of Mechanical and Structural Properties of Long Fiber-Reinforced Composites,” *Finite Element Method - Simulation, Numerical Analysis and Solution Techniques*, Dec. 2017.
- [5] T. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, “Glass fiber-reinforced polymer composites – a review,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 13, pp. 1258–1275, Jul. 2014.
- [6] N. K. Naik and V. K. Ganesh, “Prediction of on-axes elastic properties of plain weave fabric composites,” *Composites Science and Technology*, vol. 45, no. 2, pp. 135–152, Jan. 1992.
- [7] S. Oller and E. Oñate, “Advanced Models for Finite Element Analysis of Composite Materials,” in *Wiley Encyclopedia of Composites*, American Cancer Society, 2012, pp. 1–13.
- [8] A. Dixit and H. S. Mali, “Modeling techniques for predicting the mechanical properties of woven-fabric textile composites: a Review,” *Mech Compos Mater*, vol. 49, no. 1, pp. 1–20, Mar. 2013.
- [9] L. N. McCartney, “Analytical Methods of Predicting Performance of Composite Materials,” in *Failure and Damage Analysis of Advanced Materials*, H. Altenbach and T. Sadowski, Eds. Vienna: Springer, 2015, pp. 191–254.
- [10] K. Rohwer, S. Friedrichs, and C. Wehmeyer, “Analyzing Laminated Structures from Fibre-Reinforced Composite Material,” *Technische Mechanik. Wissenschaftliche Zeitschrift für Grundlagen und Anwendungen der Technischen Mechanik*, vol. 25, no. 1, pp. 59–79, 2005.

- [11] I. Kreja, “A literature review on computational models for laminated composite and sandwich panels,” *Open Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 59–80, 2011.
- [12] “Properties: E-Glass Fibre,” *AZoM.com*. [Online]. Available: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=764>. [Accessed: 06-Nov-2019].
- [13] “Cristalan 1847.” [Online]. Available: <http://www.andercol.com.co/inicio-construccion-e-infraestructura/energia/cristalan-1847>. [Accessed: 06-Nov-2019].
- [14] D30 Committee, “Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” ASTM International.
- [15] D20 Committee, “Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts,” ASTM International.
- [16] D20 Committee, “Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins,” ASTM International.
- [17] J. C. H. Affdl and J. L. Kardos, “The Halpin-Tsai equations: A review,” *Polymer Engineering & Science*, vol. 16, no. 5, pp. 344–352, 1976.
- [18] “Carbon Composites - 2nd Edition.” [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/books/carbon-composites/chung/978-0-12-804459-9>. [Accessed: 06-Nov-2019].
- [19] S. Zhang, C. Caprani, and A. Heidarpour, “Influence of fibre orientation on pultruded GFRP material properties,” *Composite Structures*, vol. 204, pp. 368–377, Nov. 2018.