



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Diseño de la secuencia de apilado de compuestos  
laminados híbridos para aplicaciones  
estructurales

presentada por

**Ing. German Alfonso Rosas**

como requisito para la obtención del  
grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería  
Mecánica**

Director de tesis

**Dr. Arturo Abúndez Pliego**

Codirector de tesis

**Dr. Enrique Alcudia Zacarías**

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero de 2021.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
Subdirección Académica

Cuernavaca, Mor.,

24/febrero/2021

No. de Oficio:

SAC/44/2021

Asunto:

Autorización de  
impresión de tesis

**GERMAN ALFONSO ROSAS  
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA MECÁNICA  
P R E S E N T E**

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado *“Diseño de la secuencia de apilado de compuestos laminados híbridos para aplicaciones estructurales”*, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

### ATENTAMENTE

*“Excelencia en Educación Tecnológica”  
“Educación Tecnológica al Servicio de México”*

**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



**CENTRO NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO  
SUBDIRECCIÓN  
ACADÉMICA**

C.c.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares  
Expediente

CMAZ/ CHG





Cuernavaca, Mor., **23/febrero/2021**

OFICIO No. DIM/065/2021  
Asunto: Aceptación de documento de tesis  
CENIDET-AC-004-M14-OFFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO  
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del Ing. German Alfonso Rosas con número de control M19CE001, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulad “Diseño de la secuencia de apilado de compuestos laminados híbridos para aplicaciones estructurales” y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dr. Arturo Abúndez Pliego  
Director de tesis

Dr. Enrique Alcudia Zacarías  
Co director de tesis

Dra. Claudia Cortés García  
Revisor 1

Dr. Andrés Blanco Ortega  
Revisor 2

Dr. Dariusz Sławomir Szwedowicz Wasik  
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.  
Expediente / Estudiante  
ABO/mrsr



En memoria de mi hermano:



Pedro Alexis Alfonso Rosas  
(1998-2020)

(1998-2020)  
Pedro Alexis Alfonso Rosas

## **Dedicatoria**

---

A mi madre Cristina, a mis hermanos: Eli, Noé, Itzel y Alexis, que han sido mi mayor motivación y apoyo en mi vida. Especialmente se la dedico a mi hermano Alexis “Becho” como de cariño le decía y que ahora se encuentra en el cielo. Esto es para ti hermano. Gracias por estar en mi vida.

También, a mi abuelo Hesiquio que está en el cielo y siempre creyó en mí.

A todas las personas que con sus consejos y ánimos me apoyaron para que lograra estudiar un posgrado y conseguir esta valiosa meta.

## Agradecimientos

---

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado a través de la beca No. CVU: 955774 y hacer posible que haya estudiado un posgrado.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por abrirme sus puertas y ayudar a mi formación académica.

Al Dr. Arturo Abúndez Pliego por su paciencia, ayuda en el proyecto de tesis y sobre todo por ayudarme en momentos donde se complicaban las cosas.

Al grupo de trabajo de fatiga y materiales compuestos, por sus recomendaciones y críticas para mejorar la tesis.

Al Dr. Claudia Cortés García, Dr. Dariusz Szwedowicz Wasik y Dr. Andrés Blanco Ortega por formar parte de mi comité revisor y que ayudaron en este trabajo mediante observaciones objetivas que aportaron en la mejora del proyecto de tesis.

A Isaac, Agustín, Ray, Ana y Jessica por brindarme su amistad, apoyarme en momentos complicados y hacer amena la estancia en Cuernavaca.

A todo el personal que labora en CENIDET por su atención y apoyo.

## Resumen

---

En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación del efecto, tanto de la secuencia de apilado del material como del porcentaje de hibridación, sobre las propiedades mecánicas de los materiales compuestos laminados. Se analizaron artículos especializados del estado del arte, en los cuales se identificaron las variables de diseño de laminados estructurales: secuencia de apilado, hibridación, fracción de volumen, propiedades de los materiales constituyentes y orientación de las fibras. A partir de este análisis, se identificó que la secuencia de apilado y el porcentaje de hibridación son las variables de mayor impacto sobre las propiedades mecánicas de los laminados híbridos. Con base en esta información, se desarrolló el diseño experimental para realizar un estudio paramétrico, el cual implicó: las variables de diseño, el tipo de ensayos (flexión y tensión) por medio de la máquina de ensayos universales Shimadzu AG-Xplus 100kN, el método de manufactura, selección de materiales que constituyen el material compuesto, selección de las secuencias de apilado del material y porcentajes de hibridación, diseño geométrico de las probetas y número de ensayos. Los resultados del análisis de los datos experimentales obtenidos mostraron que se puede obtener hasta 109% más capacidad de deformación en laminados con 40% de hibridación de carbono, comparado con el laminado de fibra carbono. Por otro lado, se demostró que se puede lograr un aumento del 11% en la resistencia del laminado usando sólo un 20% de hibridación de carbono, o hasta 31% de aumento en resistencia usando 60% de hibridación de carbono, con respecto al laminado de fibra de vidrio. Este último resultado tiene especial relevancia cuando se considera el costo del material, ya que la fibra de vidrio es en promedio 2.5 más barata que la fibra de carbono.

Adicionalmente, se desarrollaron modelos fenomenológicos para estimar la resistencia de laminados híbridos de fibras de baja y alta elongación, el cual se obtuvo a partir de un análisis de regresión múltiple de los datos experimentales, así como de asignar valores cuantitativos a las variables cualitativas de diseño del laminado. Los modelos son alternativas para estimar la resistencia a flexión a partir de la secuencia de apilado del material y del porcentaje de hibridación: en uno de ellos, los valores de la secuencia de apilado del material se asignaron a partir de ordenar los valores de mayor a menor de la resistencia de cada laminado híbrido, mientras que, en el otro, los valores se asignaron concorde con cada bloque de hibridación y dependen principalmente de la colocación de las capas de carbono en el laminado. Los

modelos mostraron buena precisión en la estimación de la resistencia para los laminados de estudio, al lograr una correlación de hasta  $R^2=0.93$ , mientras que la menor correlación fue de  $R^2=0.83$ .

## Abstract

---

In this work, the results of the assessment of the effect of both the stacking sequence and the hybridization ratio on the mechanical properties of composite laminates of glass/carbon are presented. A huge amount of information from the specialized literature was analyzed in order to identify the design variables of the structural composites laminates, and it was found that the stacking sequence and the hybridization ratio have the highest influence on the mechanical properties, rather than the volume fraction, constituent materials or fiber orientation. Based on this identification, an experimental procedure was designed in order to develop a parametric study, which involves: the material design variables, the test method (tensile/flexural) using the universal testing machine Shimadzu AG-Xplus 100kN, the manufacturing method, constituent materials, stacking sequence and hybridization ratio, geometrical design of the specimens and number of tests. The results showed that it is possible to increase up to 109% in the strain for laminates with 40% of carbon compared to the laminates of glass, while the strength can be increased 11% using 20% of carbon or can be increased up to 31% using 60% of carbon, respect to the glass laminate. The latter result has a remarkable relevance and implies a significant impact on the cost of the composite laminate when the cost of the reinforcements is considered, since the carbon fiber is, on average, 2.5 more expensive than the glass fiber.

Besides, two phenomenological models were developed aimed at the estimation of the hybrid laminate strength of low/high elongation which were obtained from the multiple regression analysis over the experimental data, as well as the assignment of quantitative values to the qualitative design variables of the laminate. The models are alternatives to the estimation of the strength, which consider both the stacking sequence and the hybridization ratio: in one of them, the values of the stacking sequences were assigned by ordering the values from highest to lowest of resistance of each hybrid laminate; while in the second one, the values were assigned by each hybridization block and mainly depend on the placement of the carbon layers in the hybrid laminate. The models showed good agreement with the experimental data of the laminate strength, since correlations of  $R^2=0.83$  and  $R^2=0.93$  was achieved.

# Contenido

---

Dedicatoria .....	i
Agradecimientos .....	ii
Resumen .....	iii
Abstract .....	v
Contenido.....	vi
Acrónimos .....	ix
Simbología .....	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de tablas .....	xv
Capítulo 1 .....	1
Introducción.....	1
1.1 Justificación .....	2
1.2 Definición del problema .....	3
1.3 Objetivo general .....	3
1.4 Objetivos específicos .....	4
1.5 Alcances.....	4
1.6 Limitaciones.....	4
1.7 Metas.....	4
Capítulo 2 .....	5
Estado del arte .....	5
2.1 Evolución materiales compuestos.....	5
2.2 Generalidades de los materiales compuestos.....	6
2.3 Influencia de las variables .....	9
2.3.1 Secuencia de apilado.....	9
2.3.2 Orientación de las fibras .....	15
2.3.3 Hibridación .....	16
2.3.4 Fracción de volumen.....	18
2.4 Compuestos híbridos carbono/vidrio.....	19
2.5 Conclusión del estado del arte .....	23

Capítulo 3 .....	25
Marco teórico.....	25
3.1 Normatividad de realización de pruebas.....	28
3.2 Secuencia de apilado .....	29
3.3 Fracción de volumen de la fibra .....	30
3.4 Diseño de laminados .....	31
3.5 Orientaciones estándar .....	31
3.6 Falla de laminados .....	32
3.7 Teoría clásica de laminados.....	33
3.8 Falla progresiva .....	35
3.9 Análisis de datos experimentales .....	36
3.9.1 Análisis univariado .....	37
3.9.2 Análisis divariado .....	37
3.9.3 Análisis trivariado.....	37
3.9.4 Elementos estadísticos.....	38
3.9.5 Modelo de regresión múltiple .....	38
3.10 Metodologías para estimar propiedades de un compuesto híbrido.....	39
3.11 Conclusiones del marco teórico .....	47
Capítulo 4 .....	49
Procedimiento experimental .....	49
4.1 Diseño del experimento .....	50
4.1.1 Propiedades de los materiales constituyentes .....	50
4.1.2 Diseño geométrico de las probetas y número de probetas.....	51
4.1.3 Método de manufactura .....	52
4.1.4 Variables de diseño .....	53
4.1.5 Secuencias de apilado híbridas para obtener las probetas de estudio.....	53
4.1.6 Materiales y equipos.....	55
4.2 Manufactura .....	55
4.2.1 Preparación de materiales .....	55
4.2.2 Manufactura de laminados .....	56
4.2.3 Obtención de probetas .....	58
4.2.4 Diseño paramétrico.....	61
4.3 Pruebas experimentales.....	63
Capítulo 5 .....	65

Análisis y discusión de resultados .....	65
5.1 Ensayos de tensión .....	65
5.2 Ensayos de flexión .....	70
5.3 Efecto híbrido a flexión .....	78
5.4 Modelos fenomenológicos a flexión .....	88
Conclusiones .....	96
Trabajos futuros .....	99
Referencias.....	100
Anexo 1 .....	106
Anexo 2 .....	115

## Acrónimos

---

CFRP	Polímeros reforzados con fibras de carbono
PSO	Método de optimización de enjambre de partículas
SA	Método de recocido simulado
GA	Algoritmo genético
FRC	Compuestos reforzados con fibra
HE	Fibras de alta elongación
LE	Fibras de baja elongación
FEA	Análisis de elemento finito
CLT	Teoría clásica de laminados
GFRP	Polímeros reforzados con fibra de vidrio
PP	Polipropileno
PPS	Sulfuro de polifenileno
PA	Poliamida
PEEK	Polieteretercetona
ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales
ROM	Regla de mezclas
RoHM	Regla de mezclas híbridas

## Simbología

---

$E$	Módulo de elasticidad.
$\rho$	Densidad.
$v_f$	Fracción de volumen de fibras.
$v_{fc}$	Fracción de volumen de fibras de carbono.
$v_{fv}$	Fracción de volumen de fibras de vidrio.
$V_{fc}$	Volumen de fibra de carbono.
$v_r$	Fracción de volumen de resina.
$N_x, N_y, N_{xy}$	Fuerzas resultantes de la tensión en el plano.
$M_x, M_y, M_{xy}$	Momentos flexionantes.
$\sigma_x, \sigma_y$	Esfuerzos normales.
$\varepsilon$	Elongación.
$\varepsilon_F$	Elongación por flexión.
$k$	Curvatura en el plano medio.
$[A], [B], [D]$	Matrices de rigidez.
$E_x^0, E_y^0, G_{xy}^0, \nu_{xy}^0$	Constantes efectivas de ingeniería en dirección longitudinal, transversal, de corte y mayor proporción de Poisson.
$f,   $	Representan las propiedades de flexión y el determinante de una matriz.
$E_f$	Módulo de elasticidad a flexión.
$E_t$	Módulo de elasticidad a tensión.
$F_{max}$	Carga máxima.
$\sigma_{ut}$	Esfuerzo último a tensión.
$\sigma_{uf}$	Esfuerzo último a flexión.
$R^2$	Coefficiente de determinación.

# Índice de figuras

Figura 1. Lámina conformada por una matriz y refuerzos de fibras largas [16].	5
Figura 2. Porcentajes del consumo global por sector de los CFRP [18].	6
Figura 3. El módulo de Young ( $E$ ) vs densidad ( $\rho$ ). Las elipses marcadas encierran datos para una clase dada de material. Las diagonales discontinuas muestran la velocidad de onda longitudinal. Las pautas de $E/\rho$ , $E^{1/2}/\rho$ y $E^{1/3}/\rho$ constantes permiten la selección de materiales para un diseño de peso mínimo, limitado por deflexión [19].	7
Figura 4. Curvas de esfuerzo-deformación por tensión y compresión para diferentes laminados compuestos [29].	10
Figura 5. Energía-Tiempo, $7J$ y $11J$ de energía de impacto [14].	10
Figura 6. Curvas de carga-desplazamiento para CFRP, polímeros reforzados con fibras de basalto (BFRP) y compuestos híbridos <i>interply</i> con diferentes secuencias de apilamiento [6].	11
Figura 7. Curvas de fuerza-desplazamiento para laminados compuestos con diferentes secuencias de apilamiento sometidas a prueba de flexión de tres puntos [3].	12
Figura 8. Variación de $E_{xb}$ y $E_{yb}$ para diferentes configuraciones de laminados híbridos [7].	12
Figura 9. Comparación de tasas de convergencia entre cuatro métodos usados [9].	13
Figura 10. Imagen de corte transversal de la secuencia de apilamiento (color) obtenida por un método de transformación de radón guiado. Una superposición de fase (negro), obtenida de un proceso de suavizado guiado, localiza los límites de las capas [30].	14
Figura 11. Esfuerzo-deformación de diferentes laminados híbridos [24].	14
Figura 12. Curvas esfuerzo-deformación para las diferentes secuencias de apilado [26].	15
Figura 13. Curva de esfuerzo-deformación: prueba de flexión de tres puntos: compuestos de <i>piassava</i> originales e híbridos [23].	17
Figura 14. Características de tensión-deformación de (a) lino no híbrido y epóxica-carbono, (b) laminados híbridos FC1-FC5 bajo tensión [25].	18
Figura 15. Rutas de grietas en muestras de tensión compacta con la misma dirección de fibra ( $90^\circ$ ) y una fracción de volumen de fibra (4.8%): (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4, (e) muestra 5 [10].	19
Figura 16. Rutas de grietas en muestras de tensión compacta con la misma dirección de fibra ( $90^\circ$ ) y una fracción de volumen de fibra (7%): (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4 [10].	19

Figura 17. Recomendaciones para mejorar la resistencia a la flexión. ....	20
Figura 18. Curvas esfuerzo-elongación de los laminados <i>cross-ply</i> [27] .....	21
Figura 19. Comparación de los módulos de elasticidad a tensión experimentales y teóricos [39]. ....	23
Figura 20. Red conceptual de los materiales compuestos [42].....	26
Figura 21. Procedimiento A — Diagrama de carga [44].....	28
Figura 22. Procedimiento B — Diagrama de carga [44].....	29
Figura 23. Orientación estándar de las fibras [41]. ....	32
Figura 24. Diferentes tipos de fallas [41] .....	32
Figura 25. Modos de daño [41]. ....	32
Figura 26. Configuración de un laminado típico [9]. ....	35
Figura 27. Fuerzas y momentos resultantes [9].....	35
Figura 28. Falla progresiva de la capa para un laminado [0° / 45° / 90 ° / -45°]s.....	36
Figura 29. Ilustración de las definiciones del efecto híbrido o efecto sinérgico para un compuesto híbrido basado en: (a) mejora aparente en el esfuerzo de falla; y (b) desviación de la Regla de Mezclas [50]. ....	40
Figura 30. Variación del módulo de elasticidad con la fracción de volumen de GRP en compuestos híbridos vidrio/sisal [51]. ....	41
Figura 31. Módulo de tensión vs fracción de volumen de fibra de carbono relativa para compuestos híbridos SGF / SCF / PP [52].....	42
Figura 32. Comparación de valores de resistencia a la tensión experimentales y teóricos de compuestos de vidrio / OPEFB híbridos PF [53].....	43
Figura 33. Módulos de flexión de compuestos híbridos hechos de dos sistemas de materiales: S-2 y T700S, y S-2 y TR30S [54].....	44
Figura 34. Comparación entre CFRP y compuestos híbridos [56]. ....	46
Figura 35. Diagrama para obtener las secuencias de apilado híbridas para aplicaciones estructurales .....	50
Figura 36. Esquema representativo del método de manufactura [16].....	53
Figura 37. Secuencias de apilado híbridas y laminados de referencia SAC y SAV.....	54
Figura 38. Materiales constituyentes de un laminado.....	55
Figura 39. Variación del espesor de laminado SA1. ....	58

Figura 40. Esquema del laminado SA1 con su respectivo número de probetas. ....	59
Figura 41. Laminado SA1 antes y después de ser cortado .....	59
Figura 42. Ancho de los laminados fabricados.....	60
Figura 43. Espesor de los laminados fabricados. ....	60
Figura 44. Masa de los laminados fabricados. ....	61
Figura 45. Diagrama esfuerzo-elongación del laminado SA9e.....	65
Figura 46. Diagrama esfuerzo-elongación del laminado SA11f.....	66
Figura 47. Pruebas de diversos talones para mejorar la sujeción.....	67
Figura 48. Módulos de elasticidad a tensión de cada configuración estudiada.....	68
Figura 49. Comparación de los módulos elásticos a tensión experimentales y los obtenidos por la CLT.....	69
Figura 50. Flexión de tres puntos.....	71
Figura 51. Curvas esfuerzo- elongación a flexión entre los laminados de referencia SAV y SAC.....	73
Figura 52. Curvas esfuerzo-elongación de laminados a flexión con una hibridación de 20% y laminados de referencia. ....	75
Figura 53. Curvas esfuerzo-elongación de laminados a flexión con una hibridación de 40% y laminados de referencia. ....	76
Figura 54. Curvas esfuerzo- elongación de laminados a flexión con una hibridación de 60% y laminados de referencia. ....	77
Figura 55. Comparación de los módulos elásticos a flexión experimentales y los obtenidos por la CLT.....	78
Figura 56. Porcentaje del efecto híbrido en relación al laminado SAC (20% de hibridación).....	80
Figura 57. Porcentaje del efecto híbrido en relación al laminado SAC (40% de hibridación).....	81
Figura 58. Porcentaje del efecto híbrido en relación al laminado SAC (60% de hibridación).....	82
Figura 59. Banda de mejor balance de propiedades mecánicas a flexión para el 20% de hibridación.....	83
Figura 60. Banda de mejor balance de propiedades mecánicas a flexión para el 40% de hibridación.....	84
Figura 61. Banda de mejor balance de propiedades mecánicas a flexión para el 60% de hibridación.....	85
Figura 62: Comparación de esfuerzos a flexión de laminados con el 60% de hibridación.....	92
Figura 63: Comparación de esfuerzos a flexión laminados con el 40% de hibridación.....	92

Figura 64: Comparación de esfuerzos a flexión de laminados con el 20% de hibridación.....	93
Figura 65: Asignación de valores a la secuencia de apilado del material con el 60% de hibridación. ....	94
Figura 66: Asignación de valores a la secuencia de apilado del material con el 40% de hibridación. ....	94
Figura 67: Asignación de valores a la secuencia de apilado del material con el 20% de hibridación. ....	95
Figura A1.1. Variación de espesor del laminado híbrido SA1. ....	106
Figura A1.2. Variación de espesor del laminado híbrido SA2. ....	107
Figura A1.3. Variación de espesor del laminado híbrido SA3. ....	107
Figura A1.4. Variación de espesor del laminado híbrido SA4. ....	108
Figura A1.5. Variación de espesor del laminado híbrido SA5. ....	108
Figura A1.6. Variación de espesor del laminado híbrido SA6. ....	109
Figura A1.7. Variación de espesor del laminado híbrido SA7. ....	109
Figura A1.8. Variación de espesor del laminado híbrido SA8. ....	110
Figura A1.9. Variación de espesor del laminado híbrido SA9. ....	110
Figura A1.10. Variación de espesor del laminado híbrido SA10. ....	111
Figura A1.11. Variación de espesor del laminado híbrido SA11. ....	111
Figura A1.12. Variación de espesor del laminado híbrido SA12. ....	112
Figura A1.13. Variación de espesor del laminado híbrido SA13. ....	112
Figura A1.14. Variación de espesor del laminado híbrido SA14. ....	113
Figura A1.15. Variación de espesor del laminado híbrido SA15. ....	113
Figura A1.16. Variación de espesor del laminado híbrido SAC. ....	114
Figura A1.17. Variación de espesor del laminado híbrido SAV. ....	114

# Índice de tablas

---

Tabla 1. Recomendaciones de geometría de muestras a tensión [45]. .....	29
Tabla 2. Actividades del proceso experimental. ....	49
Tabla 3. Propiedades físicas de la fibra de carbono [57].....	51
Tabla 4. Propiedades físicas de la fibra de vidrio [58].....	51
Tabla 5. Ficha técnica de la resina EPOLAM 5015 [59].....	51
Tabla 6. Requisitos geométricos de la probeta de material compuesto para ensayos de tensión [39]. ....	52
Tabla 7. Laminados concordantes con la secuencia de apilado del material y porcentajes de hibridación. ....	54
Tabla 8. Actividades durante el proceso de preparación de materiales.....	56
Tabla 9. Proceso de manufactura de laminados.....	57
Tabla 10. Diseño paramétrico de laminados híbridos carbono/vidrio.....	62
Tabla 11. Propiedades mecánicas de las probetas SA9e y SA11f.....	66
Tabla 12. Módulos de elasticidad a tensión, experimentales vs teóricos.....	70
Tabla 13. Propiedades de las configuraciones de estudio. ....	72
Tabla 14. Laminados con 20% de hibridación. ....	73
Tabla 15. Laminados con 40% de hibridación. ....	74
Tabla 16. Laminados con 60% de hibridación. ....	74
Tabla 17. Resultados del efecto híbrido con respecto al laminado de carbono con una hibridación del 20%.79	
Tabla 18. Resultados del efecto híbrido con respecto al laminado de carbono con una hibridación del 40%.79	
Tabla 19. Resultados del efecto híbrido con respecto al laminado de carbono con una hibridación del 60%.79	
Tabla 20. Laminados híbridos dentro de la banda de mejor balance de propiedades mecánicas ordenados por bloque del porcentaje de hibridación. ....	86
Tabla 21. Valor de la secuencia de apilado del material para la regresión $M\sigma F1$ .....	88
Tabla 22. Valor de la secuencia de apilado del material para la regresión $M\sigma F2$ .....	89
Tabla 23: Valores obtenidos de la regresión múltiple $M\sigma F1$ . ....	90
Tabla 24: Valores obtenidos de la regresión múltiple $M\sigma F2$ . ....	90
Tabla 25: Comparación de esfuerzos últimos a flexión.....	91

Tabla A2.1. Características geométricas y de masa de los laminados SA1 y SA2.....	115
Tabla A2.2. Características geométricas y de masa de los laminados SA3, SA4 y SA5.....	115
Tabla A2.3. Características geométricas y de masa de los laminados SA6, SA7 y SA8.....	116
Tabla A2.4. Características geométricas y de masa de los laminados SA9, SA10 y SA11.....	117
Tabla A2.5. Características geométricas y de masa de los laminados SA12, SA13 y SA14.....	117
Tabla A2.6. Características geométricas y de masa de los laminados SA15, SAC y SAV. ....	118

## Introducción

La evolución de la humanidad ha estado relacionada con el descubrimiento de nuevos materiales. Durante las edades de piedra, cobre, bronce, hierro, se conformaron etapas en las cuales el hombre por medio del conocimiento, manejo y uso de nuevos materiales impulsó el crecimiento social y tecnológico [1].

El concepto de material compuesto es muy antiguo, un ejemplo claro es la madera. Dentro de esta existe una combinación de fibras de celulosa con una matriz de lignina. Un material compuesto creado por el hombre en el comienzo de la civilización fue el adobe, el cual fue utilizado para la construcción de chozas, siendo las bases para las construcciones que hoy en día se utilizan con mucha frecuencia [1]. Es importante que un material compuesto esté formado por una matriz y fibras, debido a que a partir de ello se tendrá un material resistente.

Recientemente, los materiales compuestos han tenido un gran auge debido a sus numerosas ventajas sobre los materiales convencionales, las cuales implican procesos de fabricación, costos, resistencia a la corrosión, flexibilidad, peso, entre otros. Debido a sus ventajas, tienen diversas aplicaciones en distintos sectores de la industria, por ejemplo, en la industria del transporte, aeroespacial, aeronáutica, marina y en edificaciones. Es debido a sus ventajas que están sometidos a un constante desarrollo que se adecúa a la demanda requerida para su aplicación [2]. Sin embargo, existen diversas limitaciones sobre el conocimiento de las fallas de los materiales compuestos [3][4], originadas por diversas circunstancias por ejemplo el medio ambiente donde sean usados.

Se han desarrollado diversidad de pruebas y técnicas para solucionar las deficiencias de los materiales compuestos de acuerdo con las aplicaciones requeridas, las cuales incluyen el orden de apilado, el espesor de los laminados, orientación de las fibras, fracción de volumen, entre otros. Sin embargo, concluyen en la secuencia de apilado como un factor importante para solventar las deficiencias de los compuestos laminados, porque al variar el efecto de sus componentes se adaptan propiedades en función de la aplicación de interés [3], [5]–[8] (no existen modelos generalizados que aborden el efecto de la secuencia de apilado).

Por lo anterior, en esta investigación se desarrolló una metodología que involucra la secuencia de apilado y la hibridación como variables de estudio en laminados híbridos reforzados con fibras largas debido a que son los factores de mayor impacto en las propiedades de los materiales compuestos laminados híbridos. Se trabajó con laminados híbridos poliméricos reforzados con fibras largas debido a que ofrecen un equilibrio en las propiedades mecánicas en comparación con los compuestos no híbridos. Los resultados obtenidos marcaron la influencia de la secuencia de apilado e hibridación y otorgaron las configuraciones con las que el módulo de elasticidad y esfuerzo último son mejores respecto a los laminados de referencia de carbón y vidrio.

## **1.1 Justificación**

Hoy en día, los materiales compuestos ocupan gran parte de las aplicaciones. Ofrecen diversas ventajas sobre los materiales convencionales como reducción de peso, resistencia a la corrosión, excelentes propiedades mecánicas, absorción a la humedad, son moldeables por lo que pueden adoptar formas complejas, baja conductividad térmica, entre otros [9]. En los últimos años, se ha incrementado el uso de los materiales compuestos en diversas áreas (automotriz, construcción, aeronáutica, aeroespacial) debido a que implican un menor costo de fabricación y pueden sustituir las propiedades de los materiales comúnmente utilizados [10]. Entre los materiales compuestos más utilizados, destacan los polímeros laminados reforzados con fibras largas. Estos compuestos híbridos son utilizados en diversidad de aplicaciones. Pueden tener alta resistencia al desgaste, bajo coeficiente de expansión térmica, alta resistencia a la fatiga, logran ser aislantes térmicos y tener alta eficiencia estructural (bajo peso y costo) [11].

A causa de la demanda que representan, cada vez se intenta mejorar las propiedades de los materiales compuestos. Aún no se conoce la evolución del daño que presentan de acuerdo con su aplicación y falta información sobre el comportamiento mecánico que tendrá el compuesto fabricado [11]. Durante la fabricación se consideran como principales factores que influyen en el desempeño: el orden de apilado, las propiedades de los materiales constituyentes, la orientación de las fibras y la fracción de volumen. En la literatura destacan la estrecha relación que existe entre las propiedades del material y la secuencia de apilado, porque al variar ésta, se logran mejorar las características del material [3][5]–[9]. Sin embargo, no existen modelos que generalicen la determinación del efecto de la secuencia de

apilado en compuestos laminados y por lo tanto la secuencia de apilado continúa siendo un parámetro para resolver en estudios de materiales compuestos. Por lo tanto, en este trabajo se presenta una investigación sobre la determinación de la secuencia de apilado e hibridación que logren alcanzar el mejor desempeño de un compuesto laminado híbrido.

## **1.2 Definición del problema**

La demanda de estructuras complejas fabricadas con materiales compuestos en la industria actual, está sometida a un desarrollo constante debido a las ventajas comparativas que ofrecen sobre los materiales convencionales. Debido a sus ventajas cada día se intentan crear nuevos materiales que sustituyan a los materiales comúnmente utilizados. Sin embargo, una de las principales limitantes para cubrir la demanda de estructuras complejas es el poco conocimiento que se tiene sobre la evolución del daño que presentan [11], ya que este se puede originar por diversos factores, por ejemplo, impactos con aves, granizo, rayos, por la aplicación de cargas o por el deterioro causado por la humedad o fluidos hidráulicos entre otros.

Estudios mencionan la secuencia de apilado, orientación de las fibras, las propiedades de los materiales constituyentes, la fracción de volumen y la hibridación como factores que influyen en las características de los materiales compuestos laminados [7]–[9], [12–[14]. No obstante, es complejo analizar el diseño de todas las variables involucradas. Por otro lado, destacan el efecto de la secuencia de apilado e hibridación debido a que se asocian directamente con las propiedades mecánicas finales que presentan después de ser fabricados. Sin embargo, no existen modelos generalizados para la determinación del impacto o efecto de la secuencia de apilado en compuestos laminados. Es por eso que en este trabajo se propone el desarrollo de una metodología para la determinación de la secuencia híbrida de apilado más adecuada para aplicaciones estructurales específicas, con laminados híbridos con refuerzo de dos materiales distintos.

## **1.3 Objetivo general**

- Establecer una metodología para determinar la secuencia de apilado con el propósito de alcanzar el mejor desempeño de un compuesto laminado híbrido sometido a un esquema específico de cargas.

## **1.4 Objetivos específicos**

- Se determinará el efecto de la secuencia de apilado en dos esquemas de carga (tensión y flexión).
- Se desarrollará un modelo fenomenológico para estimar las propiedades que se obtendrán en función de la secuencia de apilado.

## **1.5 Alcances**

- Los ensayos se realizarán bajo pruebas estandarizadas.
- Para el estudio, se trabajará bajo laminados simétricos.

## **1.6 Limitaciones**

- El estudio se realizará a nivel macroscópico, es decir, sin análisis de mecanismos de falla.
- Se trabajará bajo las pruebas de flexión y tensión.
- Se trabajará con resina epóxica y dos tipos de fibras cerámicas (vidrio y carbón).

## **1.7 Metas**

- Establecer el grado de influencia que tiene la secuencia de apilado de la hibridación en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

## Estado del arte

Los materiales compuestos han tomado recientemente una gran variedad de aplicaciones en las diversas áreas de la ingeniería. Principalmente se debe a las propiedades físicas y mecánicas que pueden llegar a tener después de ser fabricados además del ahorro monetario que implican para las industrias. Por lo tanto, cada vez se intentan suplir los materiales comúnmente utilizados con materiales compuestos, lo que los ha convertido actualmente en un objeto de estudio potencial.

### 2.1 Evolución materiales compuestos

La historia de los materiales compuestos para aplicaciones estructurales se inició durante la segunda guerra mundial; comenzó con la fabricación de casetas para equipos y partes de aviones. Al finalizar la década de los cuarenta, se empezaron a reconocer los materiales compuestos por la facilidad para tomar formas complejas en su moldeado. A principios de los años cincuenta, los materiales compuestos se utilizaban para fabricar láminas y elementos para la construcción. En los años sesenta, se dio principal interés a paneles y sistemas de placas elaboradas con fibras de vidrio. Desde entonces, se ha observado una constante evolución e investigación respecto a su aplicación en la industria de la construcción [15]. En la Figura 1 se detalla la estructura de un material compuesto laminado, en la que se puede observar las fibras, las cuales en combinación con resina epóxica forman una lámina. Las láminas se colocan de acuerdo a un eje de referencia para representar su orientación.

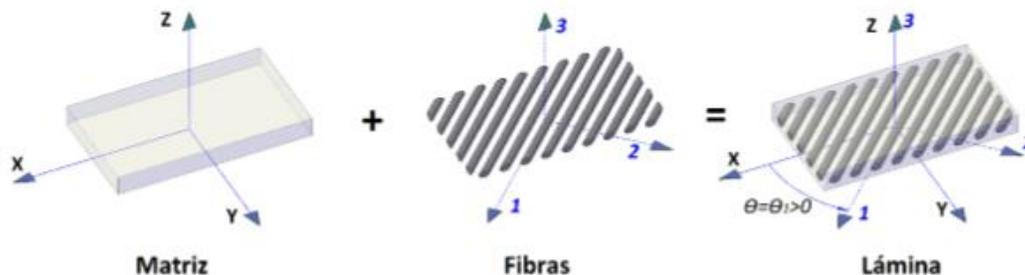


Figura 1. Lámina conformada por una matriz y refuerzos de fibras largas [16].

La investigación sobre compuestos híbridos de fibra comenzó hace varias décadas. Después de la invención de las fibras de carbono en los años sesenta, el alto costo fue la principal

limitante. Con el propósito de reducir el costo, la hibridación se transformó en un área de investigación muy activa en los años setenta y ochenta. A partir del uso de la hibridación, el precio disminuyó y el enfoque pasó a las tecnologías de producción y al entendimiento del comportamiento mecánico de los materiales no híbridos. En la actualidad existe una variedad amplia de materiales con los que se han inventado y perfeccionado nuevas tecnologías de manufactura, lo cual ha devuelto nuevamente el interés en los compuestos híbridos como una posible estrategia para mejorar los compuestos reforzados con fibra [17].

Actualmente, la demanda de los materiales compuestos está en aumento. Un ejemplo son los polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP). Los compuestos poliméricos fueron desarrollados en los años cuarenta para aplicaciones militares y aeroespaciales. Desde entonces, se convirtieron en uno de los materiales más utilizados debido a sus propiedades mecánicas, su resistencia a la corrosión a los agentes químicos y sobre todo por su capacidad de ser moldeados de forma libre. En un estudio realizado por Kühnel [18] se muestra el porcentaje del mercado global de CFRP por aplicación, en el cual el sector de aviación, aeroespacial y defensa ocupan el 30%, el sector automotriz ocupa el 22%, la energía eólica ocupa el 13%; el deporte y ocio con el 12%; la construcción con el 5% y otros con el 18% (ver Figura 2).

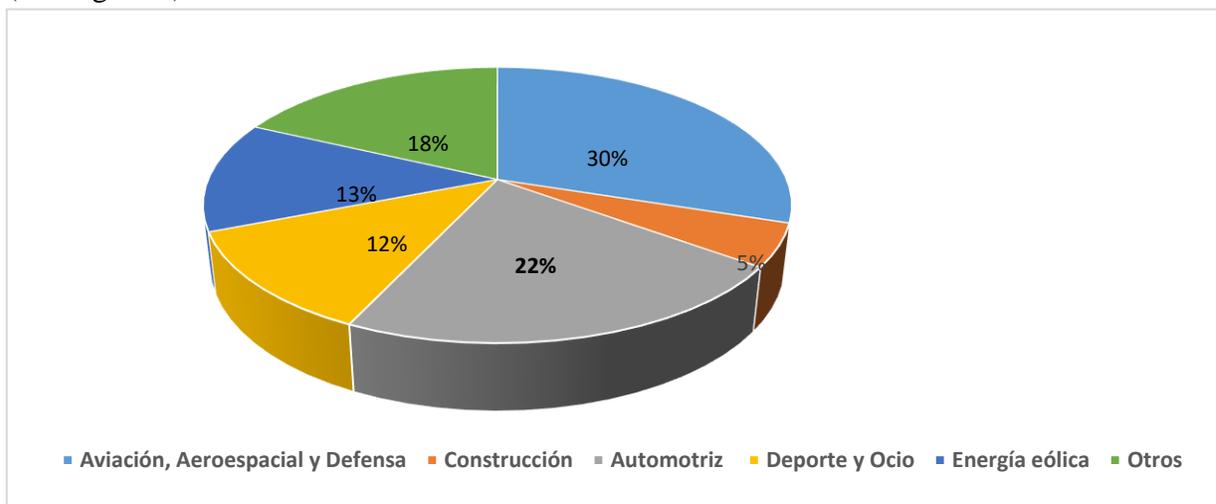


Figura 2. Porcentajes del consumo global por sector de los CFRP [18].

## 2.2 Generalidades de los materiales compuestos

Las fibras de los materiales compuestos pueden ser largas continuas, largas discontinuas o partículas. Los compuestos reforzados con fibras largas adquieren una mayor resistencia a la tensión, dado que se conforman de filamentos muy delgados, teniendo una configuración

compacta, aportando rigidez y resistencia al compuesto. Cuando las fibras largas y continuas se impregnan se forma una lámina. Las láminas se apilan una sobre otra con orientaciones de acuerdo con los requerimientos. A este tipo de compuestos se le designa laminado [11].

Los materiales compuestos reforzados con fibras largas y continuas muestran un excelente potencial para reducir no solo el peso, sino también los costos de mantenimiento de por vida, debido a su resistencia a la corrosión y la fatiga. Se pueden producir en grandes cantidades, son más sostenibles, ligeros y resistentes que otros materiales convencionales, como el acero. Se calcula que una reducción del 25% en el peso del automóvil podría ahorrar hasta 250 millones de barriles de petróleo crudo. Por estas razones, los materiales compuestos reforzados con fibras largas generan interés de diversas industrias de ingeniería y aplicaciones estructurales [17]. Sin embargo, cuando se exponen a daños por impacto, son costosos y difíciles de reparar [8]. En la Figura 3 se muestra el rango de módulo de Young y densidad para los materiales de ingeniería, se puede notar que los materiales compuestos alcanzan las mismas características que los metales.

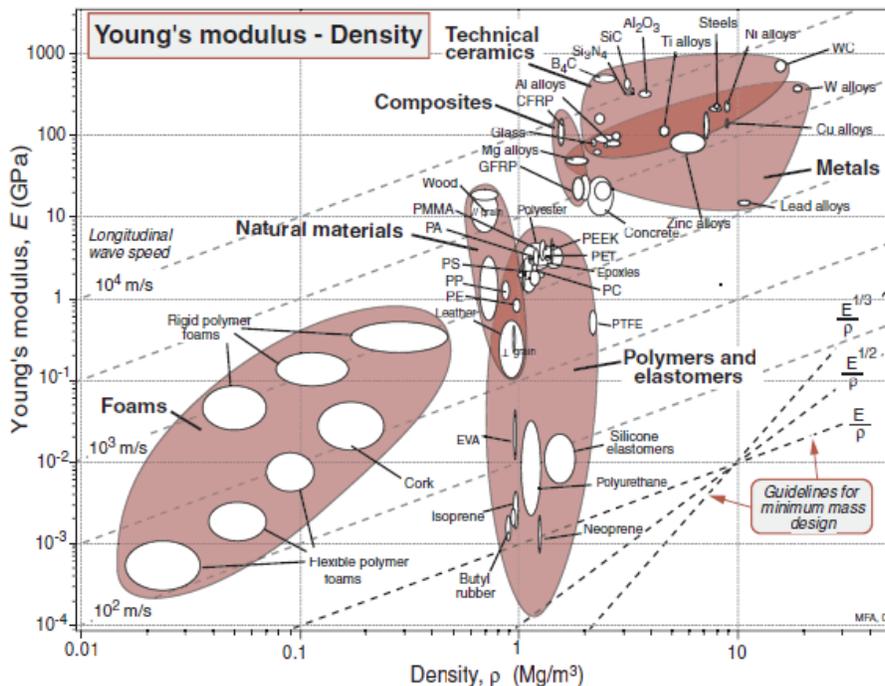


Figura 3. El módulo de Young ( $E$ ) vs densidad ( $\rho$ ). Las elipses marcadas encierran datos para una clase dada de material. Las diagonales discontinuas muestran la velocidad de onda longitudinal<sup>1</sup>. Las pautas de  $E/\rho$ ,  $E^{1/2}/\rho$  y  $E^{1/3}/\rho$  constantes permiten la selección de materiales para un diseño de peso mínimo, limitado por deflexión [19].

<sup>1</sup> Las ondas longitudinales, como el sonido, se transmiten a través de medios con velocidades que dependen de la densidad y elasticidad de la sustancia.

Existen dos tipos de fibras: naturales y sintéticas. Los investigadores evalúan la posibilidad de aplicar fibras naturales como refuerzo para los materiales compuestos de moldeo de láminas para su uso en la industria de la construcción [17]. Sin embargo, se ha determinado que las propiedades al impacto de los compuestos reforzados con fibra natural, por sí mismas, no pueden competir con los compuestos reforzados con fibra sintética [20], por lo que las fibras sintéticas son comúnmente utilizadas en las industrias relacionadas con los materiales compuestos.

Los materiales compuestos híbridos se han desarrollado y aplicado durante la última década en las industrias de ingeniería y estructuras. Los investigadores han determinado que los compuestos híbridos satisfacen la necesidad de reducir los costos en términos de operación, mantenimiento y construcción, mejoran los requisitos de rendimiento con respecto al rango de aplicabilidad, resistencia, carga útil y estabilidad. Igualmente, presentan excelentes propiedades, tales como alta rigidez, alta resistencia, excelente resistencia química y menores costos de fabricación. Sin embargo, por la exigencia del mercado, es necesario disminuir los efectos del daño para cumplir con las demandas de rendimiento avanzadas. Se han realizado sistemas híbridos de fibra de vidrio con fibra de carbono para aplicaciones de vigas y parachoques de automóviles. Ambas aplicaciones demuestran que los compuestos híbridos se han convertido en un material alternativo aceptable y viable para aplicaciones estructurales [17].

La hibridación se realiza combinando diferentes fibras naturales juntas, mediante una combinación de diferentes fibras sintéticas o combinando fibras naturales y sintéticas. La combinación de dos o más fibras diferentes proporciona un alto rendimiento estructural, lo que ayuda a obtener una alta propiedad de tenacidad con resistencia al impacto y capacidad de carga. Como resultado del efecto de hibridación, se produce un efecto híbrido positivo o negativo [21]. Los compuestos híbridos, debido a sus características mejoradas sobre los materiales compuestos convencionales, se han convertido en el centro de atención de investigaciones porque producen una mayor rigidez y resistencia en comparación con los compuestos poliméricos reforzados individuales. Por lo tanto, los compuestos híbridos logran otorgar una alta rigidez y resistencia, mejoran la resistencia al impacto y la fatiga, proporcionan una alta resistencia a la fractura y al mismo tiempo reducen peso y costo total [22]. Los compuestos híbridos de matriz polimérica son los más usados en aplicaciones

(aeronáutica y aeroespacial) que requieran alta relación entre la rigidez o resistencia y densidad [11]. Se debe tener en cuenta, que las propiedades del compuesto híbrido dependen de las características y propiedades de cada uno de los materiales constituyentes. Se espera que las ventajas de una fibra puedan complementarse con las ventajas de otra fibra o elemento, de manera que la hibridación pueda producir un mejor equilibrio entre costo y desempeño para alcanzar las necesidades de la aplicación [23].

Actualmente, como una consecuencia al uso demandante de los materiales compuestos, se trabaja para mejorar sus propiedades concordes con un requerimiento específico. Investigadores realizaron valiosos estudios que consideran distintos parámetros, con el propósito de mejorar las propiedades de los materiales compuestos. Han analizado la disposición de la secuencia de apilado sometida a cargas por flexión de impacto de baja velocidad, fracción de volumen, orientación de las fibras, selección de fibras, entre otros parámetros porque son factores que mejoran las propiedades mecánicas de los compuestos [3], [6], [25]–[28], [7]–[10], [14], [21], [23], [24]. Subagia *et al* [6] en 2014 y Kureemun *et al* [25] en 2018 indicaron que la hibridación es uno de los métodos más eficientes, puesto que genera un menor costo y mejora las propiedades de los materiales compuestos. La hibridación ha permitido crear mejores sistemas de materiales compuestos para diversos eventos y aplicaciones [17].

## **2.3 Influencia de las variables**

A lo largo del tiempo los investigadores han comprobado que las propiedades mecánicas de los materiales compuestos se ven afectadas por diversas variables que alteran o modifican dichas propiedades [3], [6], [28]–[32], [7], [9], [10], [14], [21], [23]–[25]. Las variables involucradas generan que no se conozcan las propiedades mecánicas que puede llegar a tener el material después de ser fabricado. Entre las distintas variables destacan: la secuencia de apilado, la fracción de volumen, las propiedades de los materiales constituyentes, la hibridación y la orientación de las fibras.

### **2.3.1 Secuencia de apilado**

En 2012 Zhang *et al* [29] investigaron la influencia de la secuencia de apilado en la resistencia de los compuestos híbridos a través pruebas estáticas que incluían ensayos de

tensión, compresión y flexión de tres puntos. Después de analizar cinco compuestos laminados, los resultados mostraron que los compuestos laminados híbridos con un 50% de refuerzo de fibra de carbono proporcionan las mejores propiedades de flexión cuando las capas de carbono están en el exterior, mientras que las capas de carbono/vidrio alternas proporcionan la mayor resistencia a la compresión. La secuencia de apilado afectó significativamente las propiedades de flexión y compresión (ver Figura 4).

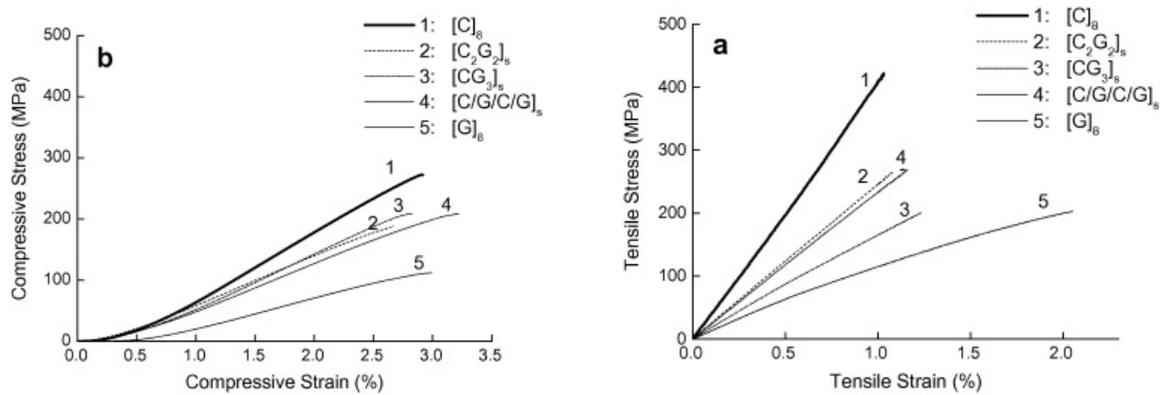


Figura 4. Curvas de esfuerzo-deformación por tensión y compresión para diferentes laminados compuestos [29].

En 2014 Riccio *et al* [14] establecieron modelos numéricos para estudiar las propiedades de impacto a baja velocidad de los laminados con diferentes secuencias de apilado. A través de dos configuraciones de apilamiento sometidas a distintas energías de impacto estimaron la influencia de tiempo de carga, tiempo de desplazamiento y tiempo de energía (ver Figura 5). Mediante del uso del software ABAQUS modelaron el comportamiento de los materiales y concluyeron que el daño de la matriz en cada capa individual está influenciado por cada secuencia de apilado.

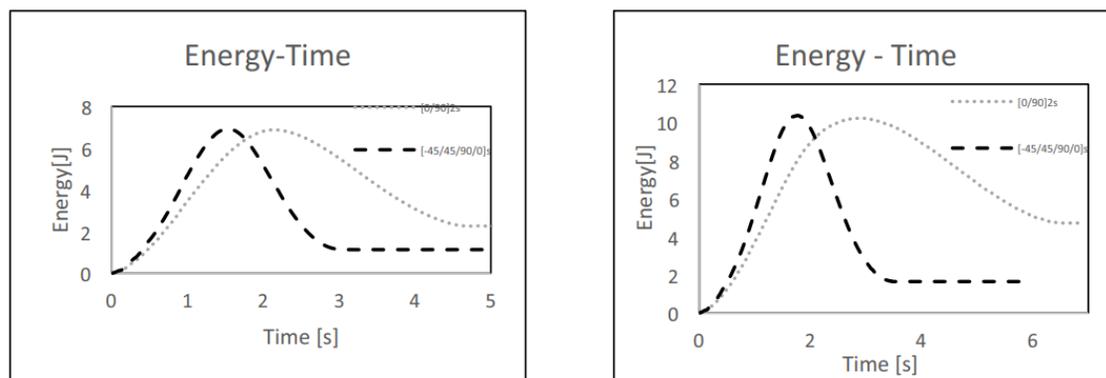


Figura 5. Energía-Tiempo, 7J y 11J de energía de impacto [14].

En 2014 Subagia *et al* [6] investigaron las diferentes secuencias de apilado del carbono y basalto en las propiedades flexionantes de los laminados compuestos híbridos. Se encontró que la secuencia de apilado afecta las propiedades flexionantes de los compuestos híbridos por lo que, al variar las secuencias de apilado de los componentes del compuesto, se adaptan las propiedades mecánicas según aplicaciones de interés (ver Figura 6).

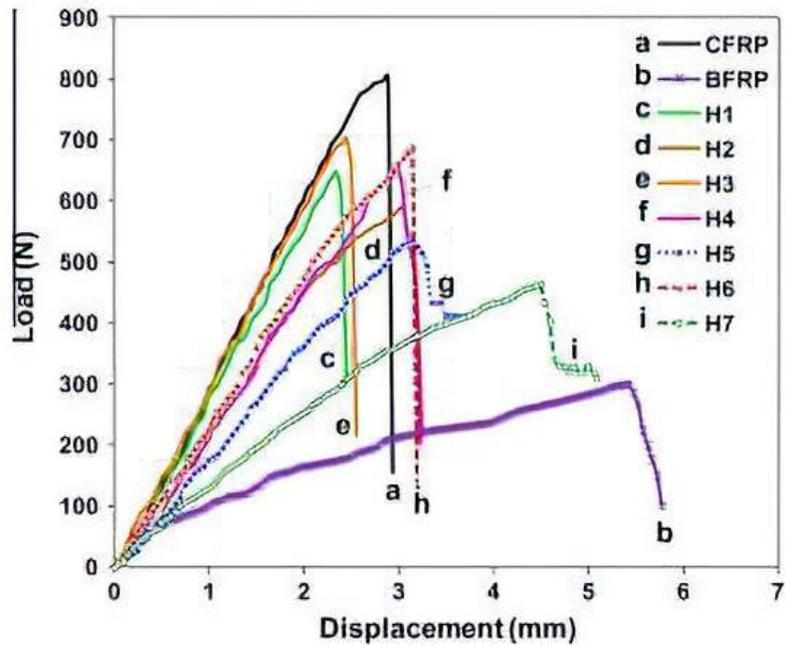


Figura 6. Curvas de carga-desplazamiento para CFRP, polímeros reforzados con fibras de basalto (BFRP) y compuestos híbridos *interply* con diferentes secuencias de apilamiento [6].

En 2016, Caminero *et al* [3] caracterizaron y evaluaron el daño en laminados compuestos de CFRP con diferentes secuencias de apilado sometidos a impacto de baja velocidad y carga por flexión. A través de la prueba de impacto de Charpy y la prueba de flexión de tres puntos, lograron obtener la respuesta al impacto y el comportamiento a la flexión de diferentes laminados, además, establecieron que el efecto de las secuencias de apilado sobre el impacto y la flexión mostraron tendencias similares a las de casos de respuesta a la tensión estudiada en trabajos anteriores (ver Figura 7).

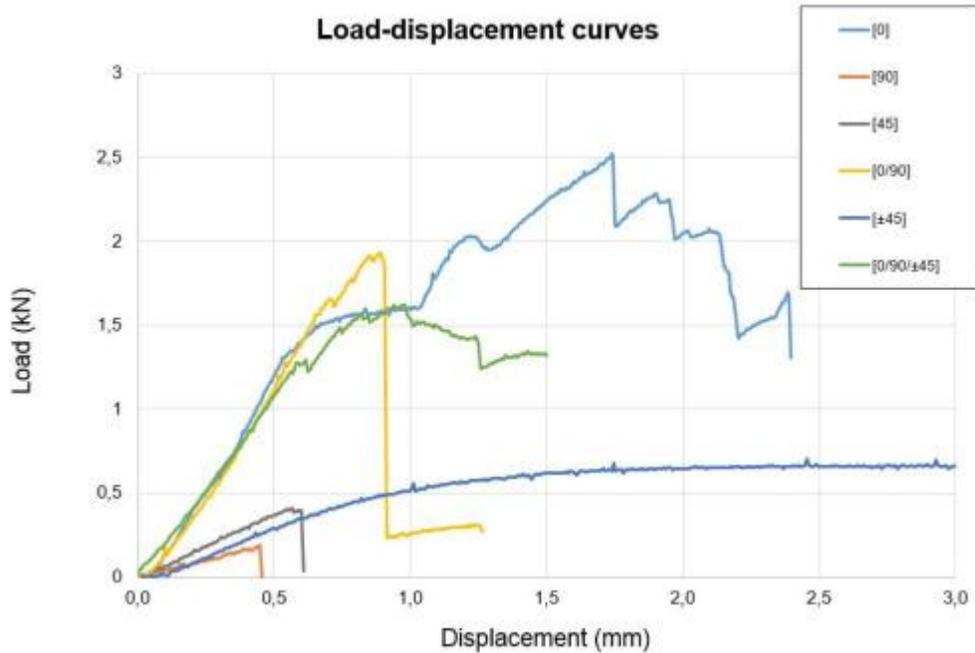


Figura 7. Curvas de fuerza-desplazamiento para laminados compuestos con diferentes secuencias de apilamiento sometidas a prueba de flexión de tres puntos [3].

En 2018, Potluri *et al* [7] presentaron un estudio donde se investigó analíticamente el efecto de la disposición de la secuencia de apilado en las propiedades mecánicas y térmicas de dos laminados híbridos (sándwich y entrelazado) usando MATLAB. A partir de lo analizado, llegaron a la conclusión que, variando las secuencias de apilado de las láminas del compuesto, se pueden adaptar las propiedades mecánicas y térmicas con las aplicaciones específicas requeridas (ver Figura 8).

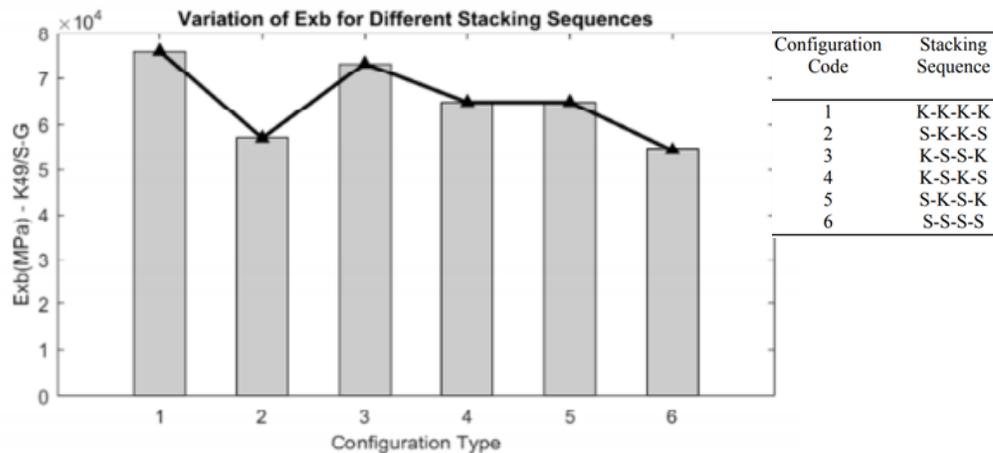


Figura 8. Variación de  $E_{xb}$  y  $E_{yb}$  para diferentes configuraciones de laminados híbridos [7].

En 2018 Javidrad *et al* [9] abordaron la optimización de la secuencia de apilamiento de materiales compuestos laminados sometidos a fuerzas en el plano y momentos de flexión para un peso mínimo mediante un método híbrido, basado en los métodos de optimización de enjambre de partículas (PSO) y de recocido simulado (SA), y demostraron que el algoritmo híbrido PSO-SA puede usarse de manera confiable y efectiva para problemas de optimización de peso sometidos a una variedad de restricciones (constantes de rigidez de ingeniería efectivas, tensiones de falla y pautas de disposición de diseño) (ver Figura 9).

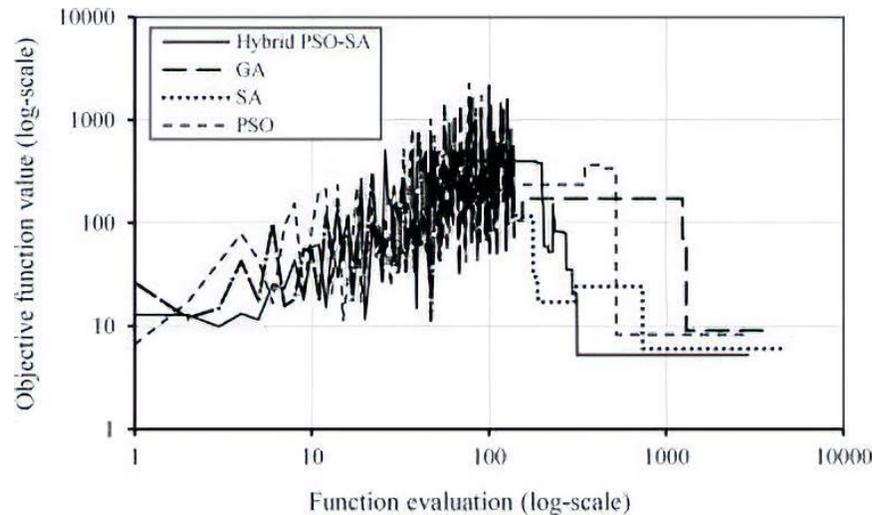


Figura 9. Comparación de tasas de convergencia entre cuatro métodos usados [9].

En 2019 Nelson *et al* [30] presentaron un método basado en la técnica no destructiva de eco de pulso ultrasónico. Esta técnica puede mapear la secuencia de apilado en compuestos unidireccionales de fibra de carbono, con lo que se logró proporcionar mapas interpretables de la secuencia de apilado. Por lo tanto, el método permite visualizar y cuantificar la secuencia de colocación de capas, ondulación en el plano y arrugas fuera del plano (ver Figura 10).

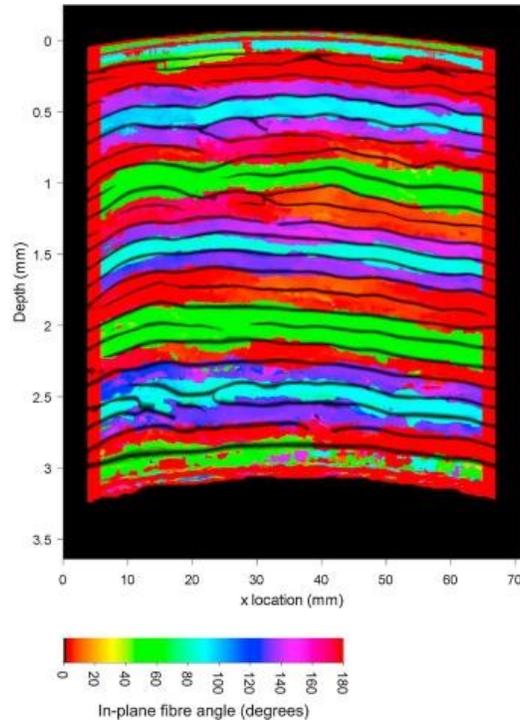


Figura 10. Imagen de corte transversal de la secuencia de apilamiento (color) obtenida por un método de transformación de radón guiado. Una superposición de fase (negro), obtenida de un proceso de suavizado guiado, localiza los límites de las capas [30].

En 2019 Ricciardi *et al* [24] investigaron experimentalmente el efecto de la secuencia de apilado sobre el comportamiento mecánico y de impacto de los compuestos híbridos de basalto/lino. A través de las pruebas (impacto, flexión y cizallamiento interlaminar), los resultados mostraron el papel de la hibridación con las fibras naturales y la relevancia de la secuencia de apilado en el diseño compuesto para cumplir con los requisitos específicos (ver Figura 11).

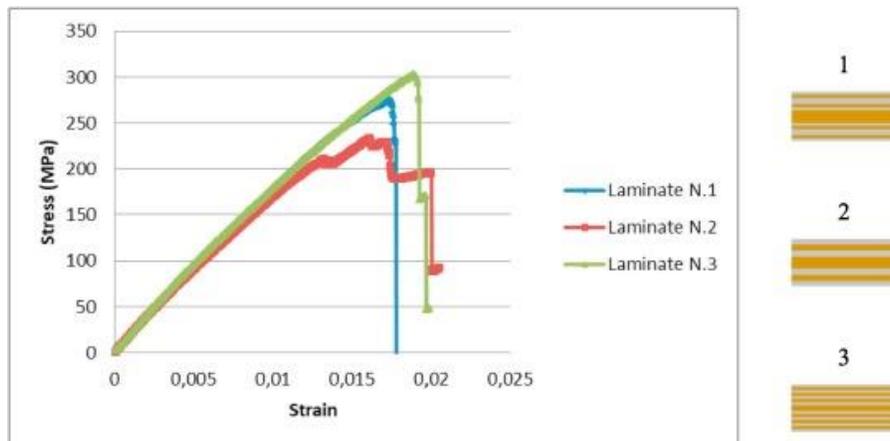


Figura 11. Esfuerzo-deformación de diferentes laminados híbridos [24].

### 2.3.2 Orientación de las fibras

En 2017 Roundi *et al* [26] compararon el comportamiento de fatiga de los compuestos de vidrio/epóxica con diferentes secuencias de apilado y orientaciones de fibras a través un análisis experimental y numérico (método de elementos finitos). Los resultados mostraron un efecto significativo para cada ángulo de orientación de la fibra en los rendimientos estáticos y de fatiga de los compuestos de vidrio/epóxica. Por lo tanto, concluyen que es fundamental elegir la configuración adecuada del material compuesto para cada aplicación (ver Figura 12).

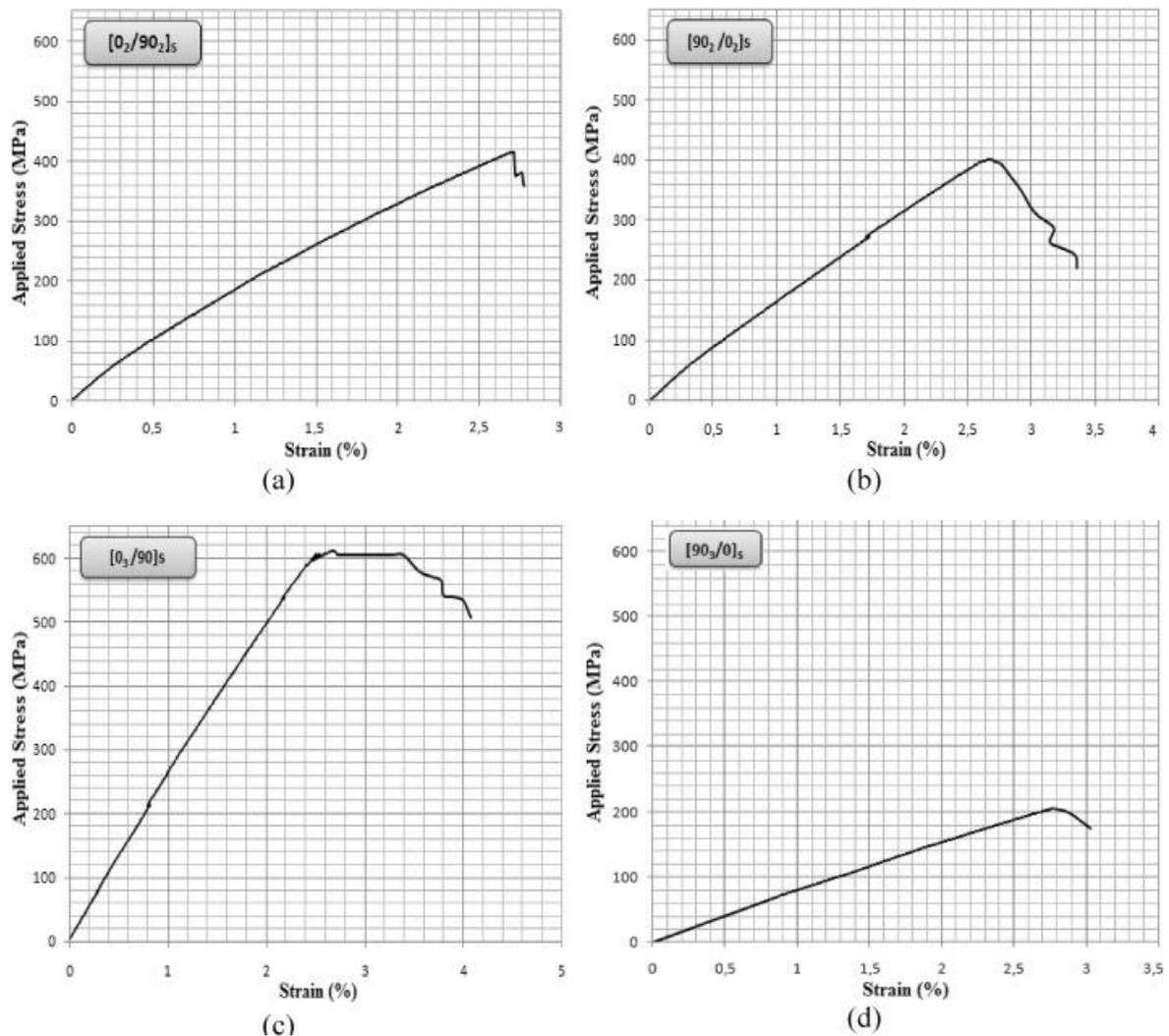


Figura 12. Curvas esfuerzo-deformación para las diferentes secuencias de apilado [26].

Por otra parte, la investigación realizada por Ramírez [31] presentó las bases de una metodología para la optimización de la resistencia de materiales compuestos laminados

utilizando Algoritmos Genéticos (GA) como técnica de optimización para el diseño de compuestos laminados. Ramírez aplicó la técnica de Algoritmo Genético al análisis de laminados determinando la resistencia máxima y el fallo progresivo del laminado tomando como variable la orientación de las fibras. Los resultados mostraron que el Algoritmo Genético empleado puede resolver problemas relacionados con la resistencia de laminados y que los valores máximos de resistencia última del laminado dependen del número de generaciones y de la orientación de las fibras.

### **2.3.3 Hibridación**

La hibridación es un procedimiento para que los materiales compuestos reforzados con fibra (FRC) logren ser más resistentes al daño y menos frágiles. La hibridación se puede lograr mezclando dentro de un laminado las fibras de refuerzo con fibras dúctiles [33]–[35]. Los dos tipos de fibra que se mezclan se conocen comúnmente como fibras de alta elongación (HE) y baja elongación (LE). Los materiales compuestos híbridos se pueden clasificar principalmente en “*interply*” (las capas se apilan entre sí) y “*intraply*” (los dos tipos de fibra se mezclan en una misma capa). Actualmente, se han realizado investigaciones para tener un entendimiento mayor sobre el comportamiento mecánico de los materiales compuestos híbridos, basados principalmente en los beneficios otorgados por las fibras de baja y alta elongación.

El desarrollo de modelos para entender el efecto híbrido comenzó con Zweben [36], su investigación consistió en un paquete híbrido de una sola fibra de carbono (LE) y fibras de vidrio (HE). Este modelo impulsó al progreso de investigaciones relacionadas con el efecto híbrido.

En 2018 Bulut y Erkliğ [21] investigaron el comportamiento de indentación de los laminados compuestos híbridos con dos configuraciones de fibras y también exploraron los efectos de la hibridación con diferentes secuencias de apilado bajo una penetración constante. Los resultados demostraron que la hibridación de dos o tres fibras distintas afecta de modo importante las respuestas de penetración (fuerza y energía absorbida) con respecto a compuestos no híbridos. Bulut y Erkliğ [21] señalan que diversas investigaciones han demostrado que el efecto de hibridación mejora las propiedades mecánicas y la resistencia al daño de los laminados compuestos debido a diversas pruebas realizadas las cuales arrojaron

resultados positivos. En 2019 de Oliveira *et al* [23] realizaron una investigación sobre el desarrollo de dos materiales compuestos (fibra de *piassava* y compuesto híbrido basado en fibra de *piassava* y tejidos de vidrio E) para comparar el comportamiento mecánico entre ambos. Los resultados mostraron a través la prueba de flexión de tres puntos que el compuesto híbrido presenta mejores propiedades respecto al compuesto de *piassava* original. Además, indican que la hibridación es fundamental para mejorar las propiedades de los materiales (ver Figura 13).

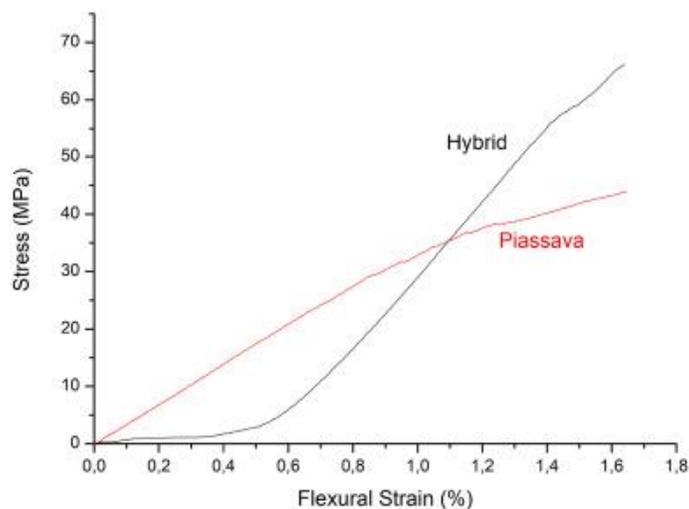


Figura 13. Curva de esfuerzo-deformación: prueba de flexión de tres puntos: compuestos de *piassava* originales e híbridos [23].

En 2018 Kureemun *et al* [25] compararon la mejora del desempeño mecánico de los materiales compuestos de fibra natural con las fibras de carbono. A través del método de hibridación con una de las fibras naturales más fuertes y rígidas, el lino, los resultados mostraron que, después de evaluar el comportamiento a la tensión de varias configuraciones híbridas de lino-carbono de capa intermedia en fracciones de bajo volumen de carbono, se observaron mejoras en la resistencia y rigidez (ver Figura 14).

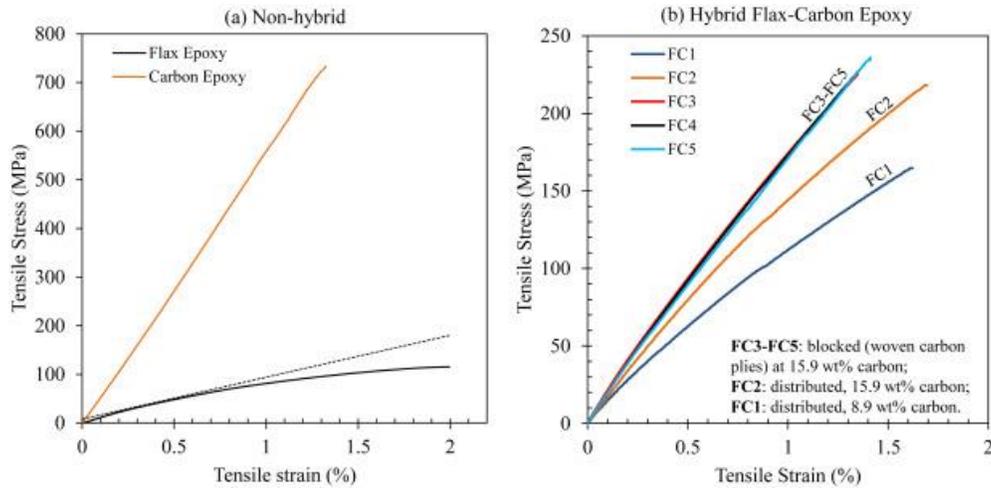


Figura 14. Características de tensión-deformación de (a) lino no híbrido y epóxica-carbono, (b) laminados híbridos FC1-FC5 bajo tensión [25].

### 2.3.4 Fracción de volumen

En 2019 Keck y Fulland [10] investigaron el comportamiento mecánico a la fractura de compuestos epóxicos reforzados con fibra de lino unidireccional bajo carga estática. Se analizaron cinco direcciones de fibra diferentes que se refieren a la grieta inicial junto con cinco fracciones de volumen de fibra diferentes, además, concluyeron que la alineación de las fibras con respecto a la posición del plano de grieta inicial y la fracción de volumen influyen en el camino de la grieta y demostraron que cuántas más fibras existan contenidas, más rápido tiende a propagarse el camino de la grieta en la dirección de la fibra (ver Figura 15 y 16).

En este estudio la fracción de volumen es un parámetro difícil de manipular debido a la manufactura de los laminados híbridos ya que no se tienen fracciones de volumen exactas para cada una de las probetas que posteriormente se ensayan. Por tal motivo esta variable no es de consideración en la investigación realizada y permanecerá fija.

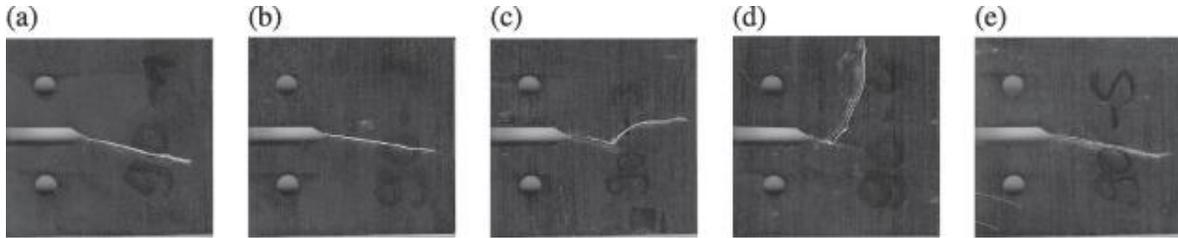


Figura 15. Rutas de grietas en muestras de tensión compacta con la misma dirección de fibra ( $90^\circ$ ) y una fracción de volumen de fibra (4.8%): (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4, (e) muestra 5 [10].

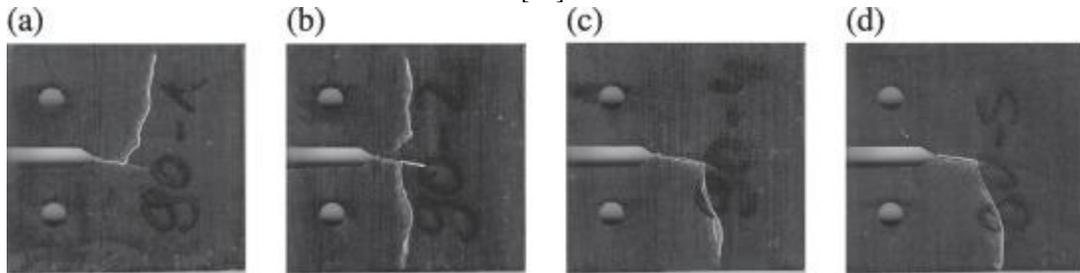


Figura 16. Rutas de grietas en muestras de tensión compacta con la misma dirección de fibra ( $90^\circ$ ) y una fracción de volumen de fibra (7%): (a) muestra 1, (b) muestra 2, (c) muestra 3, (d) muestra 4 [10].

## 2.4 Compuestos híbridos carbono/vidrio

Como se mencionó anteriormente, los compuestos híbridos por sus propiedades que adquieren al combinar dos fibras, hoy en día tienen numerosas aplicaciones, es por eso que diversos estudios se basan en encontrar las mejores características que pueden obtener al realizar distintas configuraciones de apilado y porcentajes de hibridación.

En 2011 Pandya *et al* [32] presentaron un estudio sobre las propiedades mecánicas de dos tipos de compuestos híbridos fabricados de fibra de vidrio y carbón tejida. A través del análisis en un plano cuasi-estático de tensión y compresión, concluyeron que la colocación de láminas de vidrio en el exterior y láminas de vidrio en el interior, mejora la resistencia a la tensión y a la deformación.

En 2016 Kalantari *et al* [28] investigaron el efecto de la hibridación sobre la resistencia a la flexión de laminados híbridos de resina epóxica reforzados con fibra de carbono/ vidrio con la finalidad de explicar los mecanismos que existen detrás del efecto de híbrido. A través de la teoría clásica de laminación (CLT, por sus siglas en inglés) y el análisis de elemento finito (FEA, por sus siglas en inglés) determinaron las tensiones en la primera capa y con base en cuatro teorías de falla establecieron la resistencia a la flexión. A partir de los resultados obtenidos, presentaron cuatro recomendaciones generales en las cuales se describe como mejorar la resistencia a la flexión en compuestos híbridos y obtener un efecto híbrido positivo.

1. La colocación de láminas con un módulo más bajo y una elongación más alta en la superficie del lado compresivo mejorará la resistencia a la flexión en comparación con los laminados compuestos que contienen solo láminas de alto módulo.
2. Colocar láminas con un módulo más bajo y una elongación más alto cerca del eje neutro en el lado de tensión mejorará la resistencia a la flexión en comparación con los laminados compuestos que contienen solo láminas de alto módulo. Se puede lograr un efecto similar girando un módulo más alto y una lámina de elongación más baja en la misma ubicación.
3. Las reglas 1 y 2 no tienen conflictos y pueden combinarse, es decir, colocar fibras de bajo módulo tanto en la superficie en el lado de compresión como cerca del eje neutro en el lado de tensión, lo cual mejorará la resistencia a la flexión.
4. El efecto de la recomendación 1 es significativamente mayor que el de la recomendación 2.



4. La recomendación 1 tiene mayor impacto que la 2.

Figura 17. Recomendaciones para mejorar la resistencia a la flexión.

En 2018 Jesthi *et al* [12] determinaron experimentalmente las propiedades mecánicas de CFRP, polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) y dos laminados híbridos simétricos. A partir de las pruebas de tensión y flexión, con distintas secuencias de apilado, identificaron que éstas afectaron las propiedades mecánicas de los laminados híbridos, y concluyeron que el laminado que exhibió mejores características mecánicas fue el  $[G_2C_2G]_S$ , el cual presentó una resistencia a la tensión de 311.44 MPa (debido a la alta rigidez de las fibras de carbono

en el medio del compuesto híbrido) y una resistencia a la flexión de 397.845 MPa, respecto al laminado  $[CG_3C]_S$ .

En 2019 Jesthi y Nayak [37] investigaron el efecto de la secuencia de apilado con cinco tipos de compuestos híbridos de fibras cruzadas de carbono/vidrio epóxicos. A través de las distintas pruebas mecánicas se obtuvieron resultados en los que, acorde con el tipo de prueba, cada laminado presenta distintas características. Los resultados revelaron que el compuesto híbrido  $[G_3C_2]_S$  tiene la máxima resistencia a la tensión con 329 MPa, e indicaron que esto se debe a que existen láminas de carbono en el centro del compuesto. Por otro lado, la máxima resistencia a la flexión la exhibió el compuesto híbrido  $[GCG_2C]_S$  con 469 MPa; además, señalaron que esto se debe a que existe una alternancia de capas de vidrio y carbono en la parte exterior del laminado, este mecanismo mejora la resistencia a la flexión y su módulo. Concluyeron que el compuesto  $[GCG_2C]_S$  presentó mejores propiedades mecánicas generales respecto a los demás y que es posible el uso de este tipo de materiales en aplicaciones marinas.

Actualmente, en un estudio realizado por Alcuía *et al* [27] presentó la evaluación del efecto híbrido en las propiedades mecánicas del laminado *cross-ply*  $[C/V/C/V/C]_T$ . Los resultados mostraron que el laminado híbrido exhibe mejores propiedades respecto a los laminados de referencia (carbono y vidrio). Por lo tanto, el efecto positivo de la hibridación permite al laminado tener una mayor resistencia al daño y una menor fragilidad además de reducir costos, (ahorro de fibra de carbono) el efecto positivo de la hibridación se puede ver en la Figura 18.

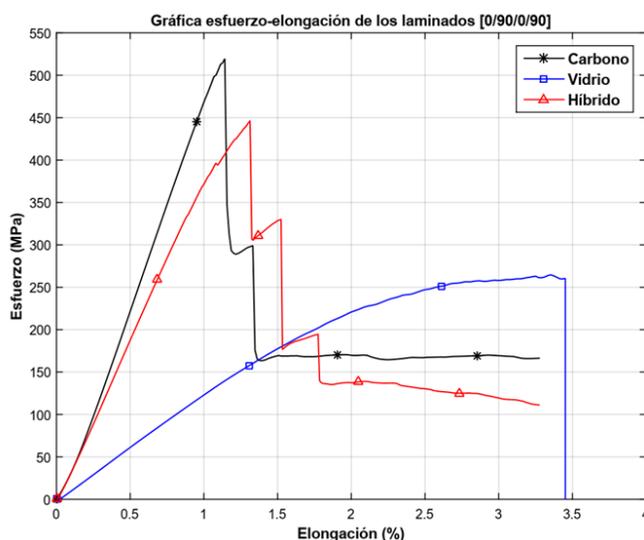


Figura 18. Curvas esfuerzo-elongación de los laminados *cross-ply* [27].

En 2019 Jesthi y Nayak [38], evaluaron la influencia de la secuencia de apilado de los laminados híbridos de carbón/vidrio epóxicos respecto a la resistencia a la flexión, a la tensión, al impacto y la absorción de agua de mar. A partir de las pruebas realizadas, se encontró que el laminado híbrido que presentó mejor resistencia a la tensión fue el  $[CG_3C]_S$  con 311 MPa; mencionan que esto puede deberse a que existen fibras de carbono en el centro de compuesto. Por otra parte, el laminado híbrido que exhibió máxima resistencia a la flexión fue el  $[CG_2CG]_S$  con 490 MPa; indican que puede deberse a que existen láminas de fibra de carbono en la superficie exterior del compuesto híbrido. Por último, concluyeron que el laminado  $[CG_2CG]_S$  tiene las mejores propiedades mecánicas en comparación con los demás laminados y que es posible la aplicación de los compuestos híbridos en sectores motrices, en alta mar y marinos. Sin embargo, se deben considerar otros parámetros de diseño para obtener el mejor potencial de los laminados híbridos.

En 2019 Chen *et al* [13], investigaron el desempeño a la flexión de laminados híbridos de carbono, vidrio y basalto a través de diferentes enfoques (experimentales, analíticos y numéricos). Mediante los distintos enfoques, la ductilidad, la resistencia a la flexión y el módulo de flexión se vieron afectadas por las secuencias de apilado y las relaciones híbridas. Por ejemplo, al aumentar la relación híbrida, la ductilidad aumentó mientras que el módulo de flexión y la resistencia a la flexión disminuyeron. Por otra parte, mencionan que la secuencia de apilado fue importante en la falla progresiva y podría ayudar a comprender el comportamiento mecánico de los compuestos híbridos. Finalmente, concluyeron que el laminado híbrido que presentó las mejores propiedades conforme con el análisis fue el  $[C_2G_4C_2]_S$  por lo tanto, las láminas de vidrio presentaron mejores características (mejora en la ductilidad y rentabilidad) en comparación con las láminas de basalto. Con los resultados obtenidos, el material compuesto híbrido se convierte en candidato para componentes estructurales sujetos a flexión.

En el 2020 Alcudia *et al* [39] estudiaron experimentalmente el efecto de la hibridación de laminados carbón/vidrio sometidos a cargas de flexión y tensión. Los resultados que obtuvieron demostraron que el laminado  $[G/C/G]_S$  obtuvo un mejor balance en las propiedades de tensión y flexión. Los resultados se le atribuyen principalmente a un alto grado de dispersión entre las capas de carbono y vidrio. Además, el grado de dispersión afectó directamente el módulo de elasticidad de las condiciones híbridas  $\nu_{fLE} = 2/6$  y  $\nu_{fLE} = 4/6$ .

Por lo tanto, los módulos de elasticidad dependen de las fracciones de volumen híbridas. También, demostraron que la teoría clásica de laminados es una buena manera teórica de estimar los módulos de elasticidad a tensión, lo cual se puede ver en la Figura 19.

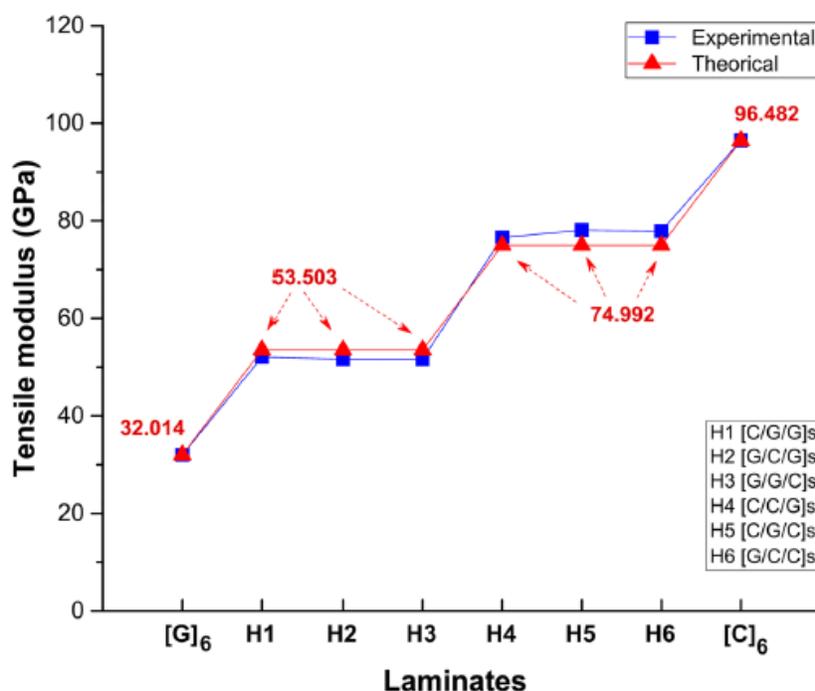


Figura 19. Comparación de los módulos de elasticidad a tensión experimentales y teóricos [39].

## 2.5 Conclusión del estado del arte

Los investigadores han demostrado que a través del método de hibridación se pueden mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, ya que se pueden obtener propiedades similares o mejores que en los laminados sin hibridar y en el caso de las fibras de carbono, implica hacer menor uso de este tipo de fibras, por lo que se ahorran costos de fabricación. Por lo tanto, es de vital importancia su consideración. Sin embargo, existen otros factores, como lo son: secuencia de apilado, la fracción de volumen, la orientación de las fibras y las propiedades de los materiales constituyentes, que influyen en el desempeño de los materiales compuestos. Además, los resultados de distintos estudios demostraron una estrecha relación entre la secuencia de apilado y las propiedades de los materiales compuestos, dado que, al variar la secuencia de apilado, se adoptan distintas características mecánicas.

Actualmente, aún no existen modelos que generalicen la relación entre la secuencia de apilado y la hibridación en el desempeño de los compuestos laminados, y menos aún los

criterios de diseño de la secuencia de apilado para responder a demandas de aplicaciones específicas. Dada la falta de estudios sobre el efecto de las diferentes secuencias de apilado en compuestos laminados, en este trabajo se abordó el desarrollo de una metodología para la determinación de la secuencia de apilado más conveniente para dos esquemas de cargas (flexión y tensión), con distintos porcentajes de hibridación en laminados con refuerzos de dos materiales distintos, considerando factores que ayuden con el desarrollo de la investigación.

### Marco teórico

*Se define como material compuesto: todo sistema o combinación de materiales constituido a partir de una unión (no química, insolubles entre sí) de dos o más componentes, que da lugar a uno nuevo con propiedades características específicas, no siendo estas propiedades ninguna de las anteriores [40].* Todo material compuesto consta de dos elementos:

1. Matriz (fase continua): es aquella que define las propiedades físicas y químicas, transmite las cargas al refuerzo, protege y brinda cohesión al material.
2. Refuerzo (fase discontinua): es el elemento resistente, se usa para mejorar la resistencia y rigidez mecánica, así como para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión. En la Figura 20 se muestran las características principales de los materiales compuestos.

La unión entre fibras y matrices se realiza durante la fase de fabricación del material compuesto. La unión influye fundamentalmente en las propiedades mecánicas del compuesto. Las fibras consisten en varios cientos o miles de filamentos, cada uno de ellos consta de un diámetro de entre 5 y 15  $\mu m$ , lo que permite que se puedan procesar en máquinas textiles. Las fibras se comercializan de la siguiente forma [41]:

- Fibras cortas, con longitudes de una fracción de milímetro a unos centímetros. Las fibras son fieltros, esteras y fibras cortas usadas en moldeo por inyección.
- Fibras largas, que se cortan durante el tiempo de fabricación del material compuesto, se utilizan como están o se tejen.

En literatura [42] existen diversas clasificaciones de materiales compuestos según sea las ideas o conceptos requeridos para identificarlos, una de las más importantes clasificaciones es referente a su matriz.

- Material compuesto de matriz metálica.
- Material compuesto de matriz polimérica.
- Material compuesto de matriz cerámica.

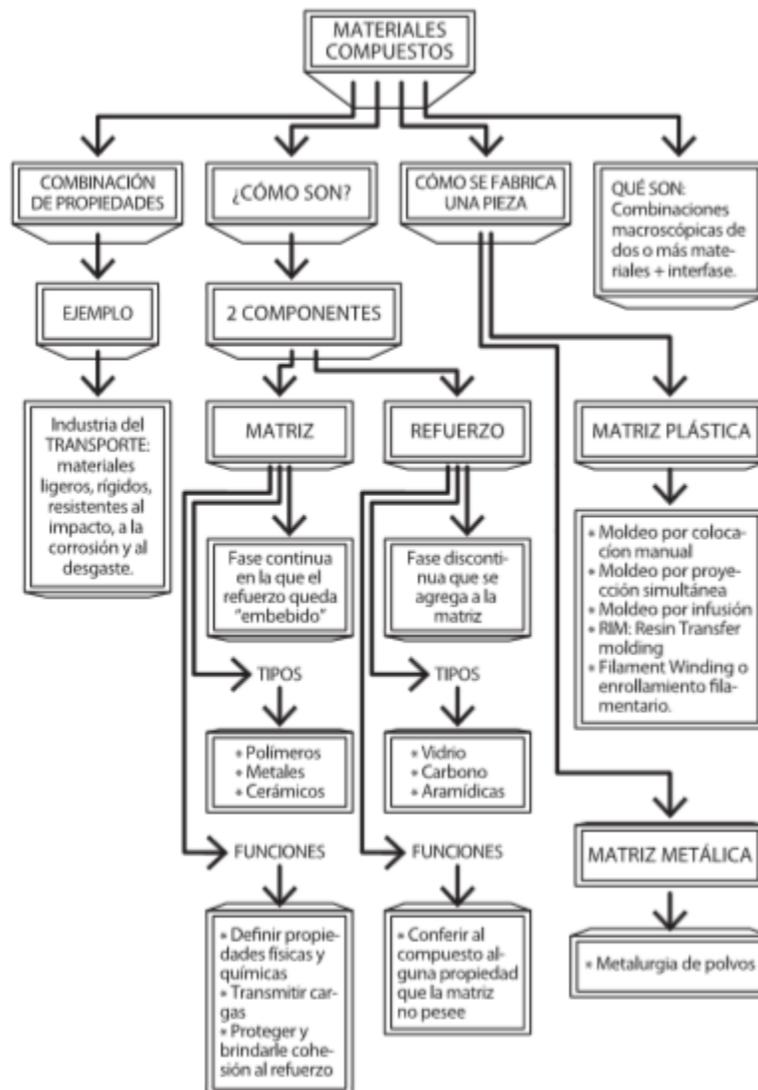


Figura 20. Red conceptual de los materiales compuestos [42].

Algunos materiales que se utilizan para formar la matriz son los siguientes:

1. Matriz polimérica:

a. Resinas termoplásticas (polipropileno [PP], sulfuro de polifenileno [PPS], poliamida [PA], polieteretercetona [PEEK], entre otros.).

b. Resinas termoestables (poliésteres, compuestos fenólicos, melaminas, siliconas, poliuretanos, epoxis).

2. Matriz mineral: carburo de silicio, carbono. Se pueden usar a altas temperaturas.

3. Matriz metálica: aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio.

Actualmente los materiales compuestos ofrecen ventajas sobre los materiales convencionales y se caracterizan por algunas de las siguientes propiedades [15].

- Por su alta resistencia mecánica, tanto a tracción como a compresión, corte, flexión y resistencia al impacto.
- Por su ligereza, lo cual significa una contribución económica en transporte, montaje y puesta en obra de las piezas, incluyendo la reducción de cargas muertas en la edificación.
- Por su comportamiento ante la corrosión, y ataque de agentes medioambientales, lo cual genera un menor mantenimiento.
- Por su flexibilidad, lo que permite adoptar formas y diseños creativos junto con el moldeo de grandes piezas y una variedad de acabados, colores y ciertos grados de luminosidad. A través de la selección adecuada de resinas y aditivos pueden ser resistentes al fuego, presentando baja inflamabilidad.
- Con las configuraciones adecuadas, los materiales consiguen altos índices de aislamiento acústico y térmico.
- Son aislantes eléctricos, por lo que se utilizan en instalaciones con alta rentabilidad.

Sin embargo, las características de los materiales compuestos resultantes de la combinación de refuerzos y matriz dependen de las proporciones de refuerzos y matriz, la forma del refuerzo y el proceso de fabricación [41].

Como se describió en el apartado **2.2**, la demanda en el crecimiento de los materiales compuestos se debe principalmente a que implican menores costos de fabricación y que pueden suplir las características de los materiales convencionales, como son sus propiedades mecánicas en diversos sectores. Sin embargo, aún existen limitaciones por el poco conocimiento acerca de la evolución del daño que presentan cuando son sometidos a distintas aplicaciones. El desarrollo de materiales estructurales se centra en tres propiedades importantes: módulo elástico, resistencia y tenacidad [4]. Si bien el efecto de factores como el ambiente, la fabricación, las condiciones de carga y el estado de daño inicial en el

rendimiento de los materiales compuestos se entiende ampliamente, aún falta información sobre la respuesta del material en condiciones específicas, que debe estudiarse a fondo [4].

### 3.1 Normatividad de realización de pruebas

Para la realización de pruebas se hacen numerosos ensayos que involucran la normatividad según la Asociación Americana de Ensayo de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés).

La norma ASTM D4762 propone una guía estándar para la prueba de materiales compuestos de matriz polimérica. Esta guía resume la aplicación de los métodos de prueba estándar de ASTM (y otros estándares de apoyo) a los materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibra continua [43].

En la norma ASTM D 7264 [44] se propone una metodología para determinar las propiedades de flexión (incluyendo la resistencia, la rigidez y el comportamiento de carga/deflexión) de los materiales compuestos de matriz polimérica. Las pruebas se pueden realizar a través de dos procedimientos de los cuales se debe elegir uno. Cabe señalar que los procedimientos no deben ser mezclados durante la realización de las pruebas debido a que los valores en cada sistema no son iguales y los resultados pueden dar lugar a una no conformidad, las Figuras 21 y 22 ilustran los dos tipos de procedimientos se pueden utilizar. La relación entre el ancho estándar y el grosor de cada probeta es de 32:1; por ejemplo, si el grosor estándar de la muestra es de 4 mm [0.16 in.] y el ancho estándar de la muestra es de 13 mm [0.5 in.] la longitud de la muestra debe aproximadamente un 20% más larga que lapso de soporte. Se deben probar cinco muestras por condición de prueba a menos que se logren obtener datos válidos con menos pruebas.

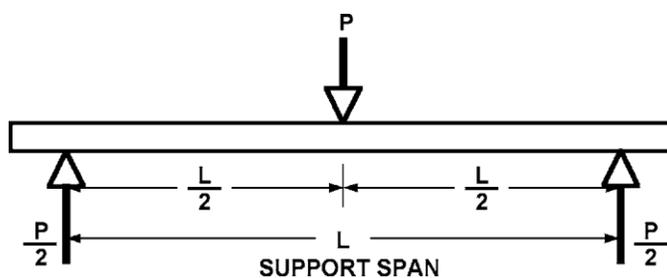


Figura 21. Procedimiento A — Diagrama de carga [44]

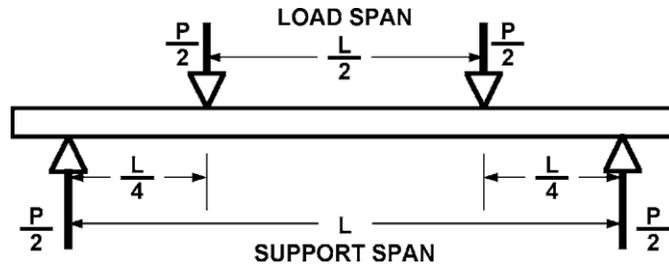


Figura 22. Procedimiento B — Diagrama de carga [44].

Por otra parte, la norma ASTM D 3039 [45] determina las propiedades de tensión en el plano de los materiales compuestos de matriz polimérica. La prueba brinda la información sobre: material, métodos de preparación y colocación del material, secuencia de apilamiento de la muestra, preparación de la muestra, acondicionamiento de la muestra, entorno de prueba, alineación y agarre de la muestra, velocidad de la prueba, tiempo a temperatura, contenido vacío y porcentaje de volumen de refuerzo.

Se deben probar cinco muestras por condición de prueba a menos que se logren obtener datos válidos con menos pruebas. La longitud de la muestra normalmente debería ser sustancialmente más larga que el requisito mínimo para minimizar las tensiones de flexión causadas por excentricidades de agarre menores. En la Tabla 1 se muestran las proporciones aceptables sobre las dimensiones para configuraciones típicas.

Tabla 1. Recomendaciones de geometría de muestras a tensión [45].

Orientación de la fibra	Ancho (mm)	Longitud total (mm)	Espesor (mm)	Longitud de la pestaña (mm)	Espesor de la pestaña (mm)	Bisel de la pestaña (ángulo)
0° unidireccional	15	250	1.0	56	1.5	7° o 90°
90° unidireccional	25	175	2.0	25	1.5	90°
Balanceado o simétrico	25	250	2.5			
Aleatorio-Discontinuo	25	250	2.5			

### 3.2 Secuencia de apilado

La dirección de las fibras de un compuesto laminado reforzado con fibras produce dependencia direccional con las propiedades mecánicas del compuesto.

La secuencia de apilado describe la orientación de las fibras medidas a partir de un eje situado en el laminado y el orden en que se coloque cada capa en el laminado. Cuando el ángulo se mide en sentido contrario al de las manecillas del reloj, será positivo, de lo contrario será negativo (ver Figura 21). La secuencia de apilado enlista las orientaciones de las fibras que constituyen al laminado, desde la parte superior hasta la capa situada al fondo del laminado. Por la tanto, para un laminado con  $N_L$  capas, su representación será la siguiente  $(\theta_1/\theta_2/\theta_3/\dots/\theta_{N_L})$  [46].

Cuando distintas capas con la misma orientación se localizan adyacentes una con la otra, se acostumbra a agruparlas y colocar en el ángulo correspondiente en la secuencia de apilado un subíndice con el número total de capas adyacentes.

Se dice que un laminado es *simétrico* cuando las orientaciones de las fibras de las láminas son simétricas respecto al plano medio. Por ejemplo  $[0/\pm 30/45_2/90_2/\pm 30/0][0/\pm 30/45_2/90_2/\pm 30/0]_T \equiv [0/\pm 30/45_2/90]_s$  donde el subíndice "s" representa la simetría sobre el plano medio.

Cuando el número de capas con orientación  $+\theta$  es igual al número de capas con orientación  $-\theta$ , se dice que el laminado está *balanceado*. Un ejemplo es  $[0/+45/-45/90_2/0]_T$  donde el subíndice "T" denota el total de capas en el laminado.

### 3.3 Fracción de volumen de la fibra

La fracción de volumen de fibra se define como [41]:

$$V_f = \frac{\text{Volumen de la fibra}}{\text{Volumen total}} \quad (1)$$

Como resultado, la fracción de volumen de la matriz se da como:

$$V_m = \frac{\text{Volumen de la matriz}}{\text{Volumen total}} \quad (2)$$

A partir del cual:

$$V_m = 1 - V_f \quad (3)$$

### **3.4 Diseño de laminados**

Como cada componente mecánico, una pieza compuesta debe cumplir con las especificaciones del producto. El enfoque del diseño de un compuesto tiene que extenderse en un rango más amplio que el de un compuesto hecho de material clásico predeterminado. En realidad, se aplica lo siguiente [41]:

- Para los materiales isotrópicos, el enfoque convencional del diseñador consiste en la selección de un material existente y luego en el dimensionamiento de la parte que será constituida.
- Para una pieza compuesta, el diseñador fabrica el material conforme con las necesidades definidas por los requisitos funcionales. El diseñador define lo siguiente:
  1. Refuerzo
  2. Matriz
  3. Proceso de formación

Por otro lado, para el diseño se consideran distintos factores. Los factores se encargan de atender las incertidumbres de: la magnitud de las características mecánicas de refuerzo y matriz, las concentraciones de esfuerzos, la imperfección de las hipótesis para el cálculo, el proceso de fabricación y el nivel de control de calidad asociado, el envejecimiento de los materiales [41].

### **3.5 Orientaciones estándar**

Una de las ventajas fundamentales de los laminados es su capacidad para adaptar y controlar la orientación de las fibras para que el material pueda resistir mejor las cargas. Por lo cual, es fundamental saber cómo las capas contribuyen a la resistencia del laminado, teniendo en cuenta su orientación relativa con respecto a la dirección de carga. Las orientaciones más utilizadas se muestran en la Figura 23. La llamada dirección  $0^\circ$  corresponde a la dirección de carga principal, a una dirección preferencial de la parte correspondiente o a un eje del sistema de coordenadas elegido [41].

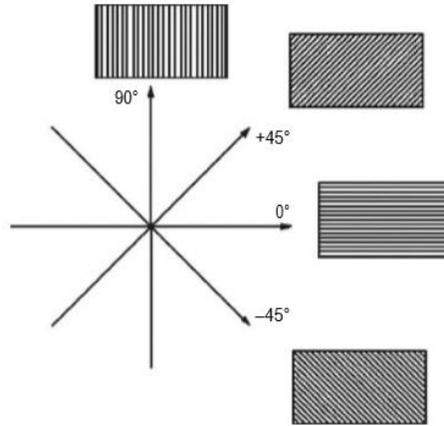


Figura 23. Orientación estándar de las fibras [41].

### 3.6 Falla de laminados

En la Figura 24 se pueden observar los diferentes tipos de fallas que llevan al daño de un laminado. Cuando las cargas exceden los niveles críticos, los modos principales de daño para el laminado se ilustran en la Figura 25

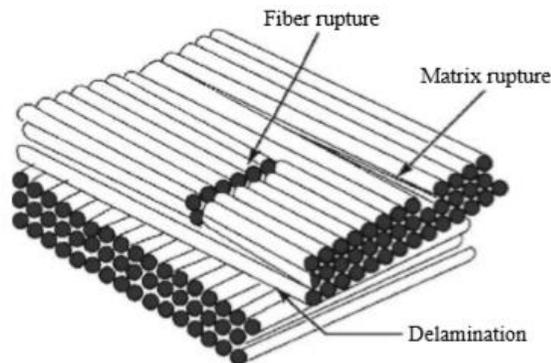


Figura 24. Diferentes tipos de fallas [41]

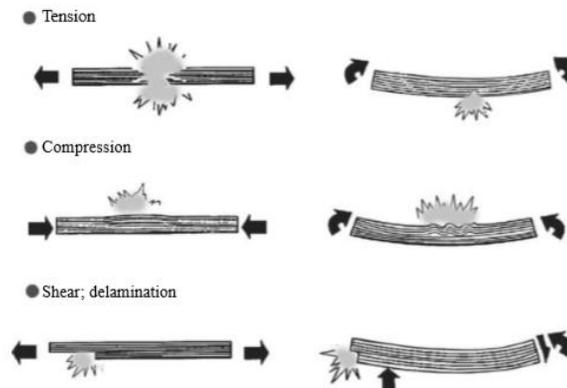


Figura 25. Modos de daño [41].

### 3.7 Teoría clásica de laminados

La CLT es sin duda el método más simple y popular para analizar materiales compuestos laminados. La CLT se basa en la consideración de condición de tensión del plano y utiliza la hipótesis de Kirchhoff en la cual las deformaciones de las líneas normales al plano medio geométrico del laminado permanecen rectas después de dicha deformación. Tomando en cuenta el comportamiento elástico en el sistema de coordenadas (ver Figura 26), las relaciones entre tensión y deformación para una sola se describen como:

Las fuerzas resultantes de la tensión en el plano  $(N_x, N_y, N_{xy})^T$  y los momentos flexionantes resultantes  $(M_x, M_y, M_{xy})^T$ , por unidad de longitud de la sección transversal del laminado, se determinan de la siguiente forma [9] (ver Figura 27):

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}_k dz \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz \quad (5)$$

Donde:

$\sigma_x, \sigma_y$ , son los esfuerzos normales de la lámina.

$\sigma_{xy}$ , es el esfuerzo de corte de la lámina.

Las relaciones entre los esfuerzos resultantes y las deformaciones globales del plano medio ( $\varepsilon$ ) y curvaturas ( $k$ ) en las coordenadas globales se pueden derivar de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Las matrices de rigidez se calculan de la siguiente manera:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad i, j, = 1, 2, 6 \quad (7)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad i, j, = 1, 2, 6 \quad (8)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad i, j, = 1, 2, 6 \quad (9)$$

Donde:

$\bar{Q}$  indica la matriz de rigidez reducida como transformada de coordenadas del material al sistema de coordenadas global.

Las constantes de ingeniería efectivas son medidas de una estabilidad laminar multidireccional cuando se agrupan en unidireccional. Cuando el laminado no está acoplado, es decir,  $B_{ij} = 0$ , estas constantes para un laminado con espesor  $t$  que consiste en capas ortotrópicas, se escriben como:

$$E_x^0 = \frac{|A|}{(A_{22}A_{66} - A_{26}^2)t} \quad (10)$$

$$E_y^0 = \frac{|A|}{(A_{11}A_{66} - A_{16}^2)t} \quad (11)$$

$$G_{xy}^0 = \frac{|A|}{(A_{11}A_{22} - A_{12}^2)t} \quad (12)$$

$$v_{xy}^0 = \frac{A_{12}A_{66} - A_{16}A_{26}}{(A_{22}A_{66} - A_{26}^2)} \quad (13)$$

$$E_x^f = \frac{12|D|}{(D_{22}D_{66} - D_{26}^2)t^3} \quad (14)$$

$$E_y^f = \frac{12|D|}{(D_{11}D_{66} - D_{16}^2)t^3} \quad (15)$$

$$G_{xy}^f = \frac{12|D|}{(D_{11}D_{22} - D_{12}^2)t^3} \quad (16)$$

$$\nu_{xy}^f = \frac{D_{12}D_{66} - D_{16}D_{26}}{(D_{22}D_{66} - D_{26}^2)} \quad (17)$$

donde  $E_x^0$ ,  $E_y^0$ ,  $G_{xy}^0$  y  $\nu_{xy}^0$  indican constantes efectivas de ingeniería en dirección longitudinal, transversal, de corte y mayor proporción de Poisson, respectivamente. El superíndice  $f$  y  $\parallel$  representan las propiedades de flexión y el determinante de una matriz.

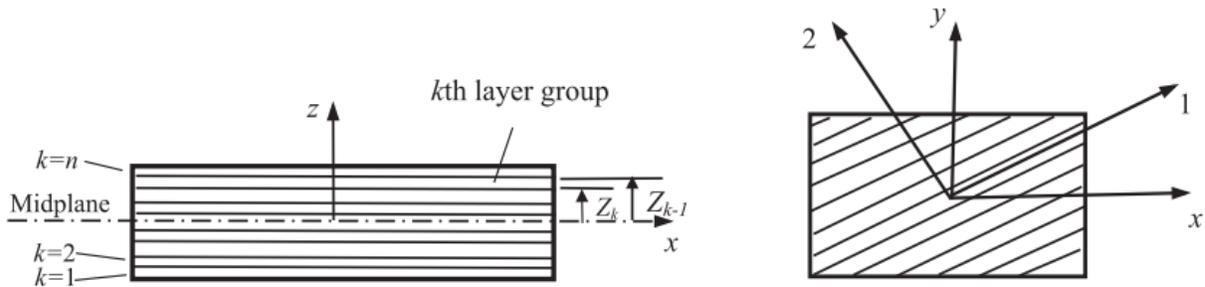


Figura 26. Configuración de un laminado típico [9].

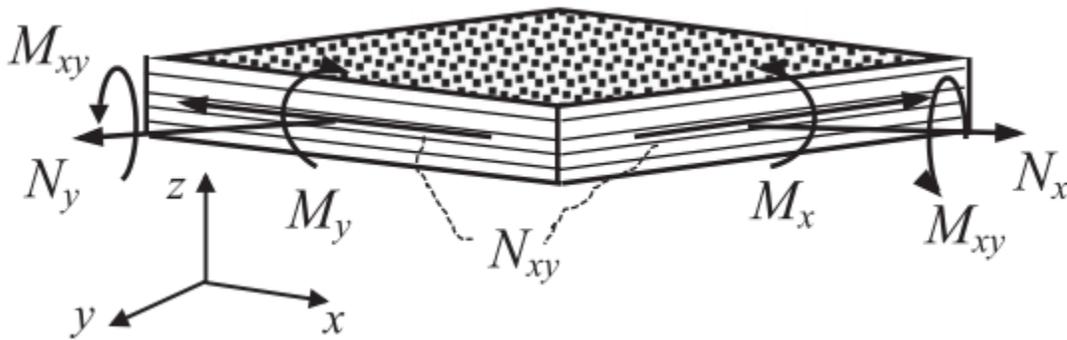


Figura 27. Fuerzas y momentos resultantes [9].

### 3.8 Falla progresiva

La falla progresiva representa la manera en la que falla el material conforme con la colocación de cada lámina. Es decir, exhibe una falla progresiva capa por capa.

Cuando un laminado se carga en tensión hasta el fallo, no todas las capas fallan al mismo tiempo. Las fallas progresivas de las capas en un laminado de  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$  se muestran en la Figura 28. Las capas fallarán sucesivamente en el orden creciente de resistencia en la dirección de carga. Debido a que la fuerza transversal de las capas unidireccionales es menor que la resistencia longitudinal, las capas transversales fallarán primero. El fallo de las capas de  $90^\circ$  generalmente es seguido por otras capas fuera de ángulo (por ejemplo,  $\pm 45^\circ$ ) y finalmente las capas de  $0^\circ$  mucho más fuertes. La aparición de fallas en la primera capa, aunque es un criterio de diseño relativamente conservador, a menudo se usa en la industria aeroespacial para interpretar fallas en el laminado [47].

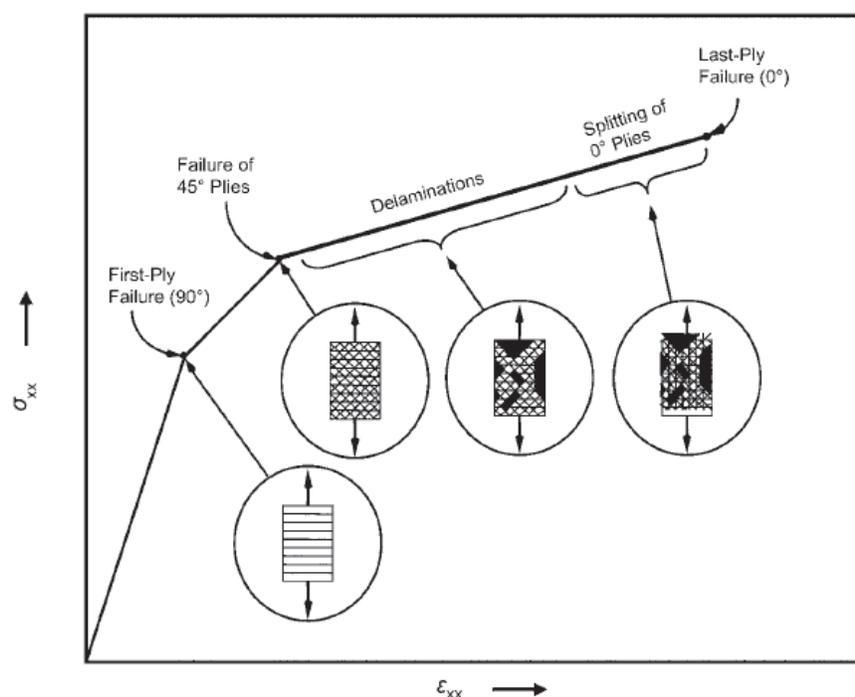


Figura 28. Falla progresiva de la capa para un laminado  $[0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ]_s$  [47].

### 3.9 Análisis de datos experimentales

El procesamiento de datos experimentales se inicia con el análisis de datos, siendo una de las etapas más importantes de la investigación. En esta etapa se establece la forma en la que se analizarán los datos, así como las herramientas adecuadas para dicho propósito. La interpretación de los datos se realiza en dos etapas a partir de los resultados de la investigación. Las etapas sustentarán el grado de validez y confiabilidad [48].

1. Interpretación de las relaciones entre las variables y los datos que las sustentan con fundamento en algún nivel de significancia estadística.
2. Establecer un significado más amplio de la investigación, es decir, determinar el grado de generalización de los resultados de la investigación.

Los datos facilitan el proceso aplicando técnicas de análisis complejas, las cuales se incluyen en el reporte final y pueden ser útiles para analizar una o más variables. A través de este último criterio, el análisis puede ser univariado, bivariado o trivariado dependiendo de la cantidad de variables que se analizan [48].

### **3.9.1 Análisis univariado**

Consiste en el análisis de cada una de las variables estudiadas por separado, es decir, el análisis está basado en una sola variable. Las técnicas más frecuentes de análisis univariado son la distribución de frecuencias para una tabla univariada y el análisis de las medidas de tendencia central de la variable [48].

### **3.9.2 Análisis bivariado**

El análisis bivariado diseña tablas con tabulaciones cruzadas, es decir, las categorías de una variable se cruzan con las categorías de una segunda variable. Se les conoce como tablas de contingencia. Los requisitos que debe cubrir son [48]:

1. El título debe reflejar la información que contiene la tabla.
2. Incluir un subtítulo para cada columna y subcolumna que se integre a la tabla.
3. Indicar el 100% cuando la tabla se exprese en términos porcentuales.
4. Indicar al final de cada columna el número total de casos o categorías que comprende.

### **3.9.3 Análisis trivariado**

El análisis trivariado incluye una tercera variable que se utiliza como variable control, lo cual permite analizar la asociación entre las dos variables, controlando el efecto de una tercera variable a través la observación de las dos primeras sobre cada condición que presenta la tercera [48].

### 3.9.4 Elementos estadísticos

La herramienta utilizada para el análisis de datos es la estadística. Esta disciplina proporciona innumerables beneficios a la investigación científica y tecnológica. La estadística descriptiva se entiende como el conjunto de métodos para procesar información en términos cuantitativos de tal forma que se les dé un significado. La estadística inferencial estudia la confiabilidad de las inferencias de que los fenómenos observados en la muestra son extensivos a la población de donde se exhibió la muestra, es decir, facilita el establecimiento de inferencias de la muestra analizada hacia la población de origen [48].

### 3.9.5 Modelo de regresión múltiple

Para analizar los datos obtenidos a partir de las pruebas de flexión y tensión, se utilizará el modelo de regresión lineal múltiple. La regresión lineal múltiple pretende ajustar modelos lineales o que se pueden linealizar entre una variable dependiente y más de una variable independiente. La regresión al trabajar con variables, calcula promedios (promedio de una variable, de una correlación, de una tendencia, de una función; promedios de variables estandarizadas, estudentizadas o refuncionalizadas con cualquier otra función) y su desviación típica (es una denominación que se reserva a la muestra y a la población, cuando se refiere a un parámetro estimado). Una vez calculados ambos se interpretan conjuntamente (si son altos, bajos, en términos absolutos o lo que es más usual, en relación con algo como por ejemplo una distribución normal). Así, la función es [49]:

$$Y_i = b_0 + b_1X_{1i} + b_2X_{2i} + \dots + b_nX_{ni} + \varepsilon \quad (18)$$

Donde  $Y$  es una variable dependiente y  $X_{1i}, X_{2i} \dots X_{ni}$  son variables que pueden ser denominadas independientes. En regresión lineal se pueden usar una variable dependiente y varias variables independientes.

$b_0$  es el término independiente. Es el valor esperado de  $Y$  cuando  $X_{1i}, X_{2i} \dots X_{ni}$  son cero.

$b_1, b_2, \dots b_n$  son los coeficientes parciales de la regresión.

$\varepsilon$  es el error de observación debido a variables no controladas.

Considerando el modelo se puede obtener la siguiente información muestral.

$$\begin{matrix}
Y_1 & X_{11} & \cdots & X_{1i} \\
Y_2 & X_{21} & \cdots & X_{2i} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
Y_n & X_{n1} & \cdots & X_{ni}
\end{matrix} \quad (19)$$

De la expresión matemática del modelo de regresión lineal general se deduce:

Asumimos que los errores  $\boldsymbol{\varepsilon}_1, \boldsymbol{\varepsilon}_2, \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_n$  tienen distribución normal de media cero y varianza  $\sigma^2$ , y que son independientes.

Las variables explicativas son linealmente independientes entre sí.

A partir de la muestra se obtienen los estimadores  $\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1, \dots, \mathbf{b}_n$  y  $\sigma^2$ .

El modelo se puede plantear de forma matricial de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & \cdots & X_{1i} \\ 1 & X_{21} & \cdots & X_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & \cdots & X_{ni} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_1 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\varepsilon}_n \end{pmatrix} \quad (20)$$

Atribuyendo la notación a las matrices respectivas, se puede escribir la expresión anterior de la siguiente manera:

$$Y = Xb + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (21)$$

Para estimar el vector de parámetros  $\mathbf{b}$  se aplica el método de mínimos cuadrados, igual que en el modelo lineal simple, y como resultado se obtiene el siguiente estimador:

$$\hat{\mathbf{b}} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (22)$$

Donde  $X^T$  es la matriz transpuesta de  $X$ .

Para usar la secuencia de apilado como una variable es necesario convertirla en una variable cuantitativa. Para lograrlo, después de las pruebas mecánicas se le asignará un valor acorde con las propiedades encontradas en las pruebas en función de la secuencia de apilado.

### 3.10 Metodologías para estimar propiedades de un compuesto híbrido

Existen diversas formas para estimar el efecto híbrido que se puede conseguir al fabricar un material compuesto laminado híbrido. En la mayoría de las investigaciones utilizan la ley de las mezclas híbridas para obtener un efecto híbrido ya sea positivo o negativo. Un efecto híbrido positivo o negativo se define como una desviación positiva o una desviación negativa

de cierta propiedad mecánica del comportamiento de las mezclas de híbridos. Para los compuestos híbridos de fibra, el "efecto híbrido" se denomina como un efecto sinérgico sobre la respuesta de esfuerzo-deformación en la carga mecánica de híbridos sobre el compuesto no híbrido. Se define de dos formas distintas; la primera basada en el aumento aparente del esfuerzo de falla del compuesto híbrido en comparación con el compuesto de fibra de baja elongación pura (ilustrado esquemáticamente en la Figura 29a; y el segundo basado en la desviación del comportamiento mecánico de las predicciones de la Regla de Mezclas (ilustrada esquemáticamente en la Figura 29b) [50].

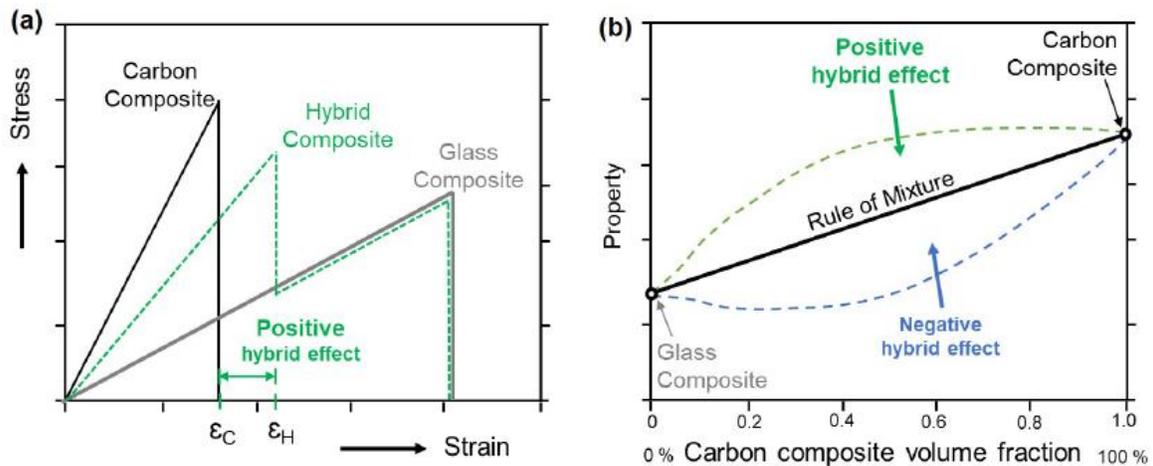


Figura 29. Ilustración de las definiciones del efecto híbrido o efecto sinérgico para un compuesto híbrido basado en: (a) mejora aparente en el esfuerzo de falla; y (b) desviación de la Regla de Mezclas [50].

En 1996 Kalaprasad *et al* [51] calcularon teóricamente el efecto híbrido de un compuesto vidrio/sisal mediante el uso de la ley aditiva de las mezclas híbridas. Conforme con esta ley, las propiedades del compuesto híbrido son calculadas usando la siguiente ecuación.

$$X_H = X_1V_1 + X_2V_2 \quad (23)$$

donde:

$X_H$  – Es una propiedad característica del compuesto híbrido.

$X_1$  y  $X_2$  – Son propiedades características de los compuestos individuales.

$V_1$  y  $V_2$  – Son las fracciones de volumen de los refuerzos en compuestos híbridos.

Los resultados teóricos y experimentales se representan en la Figura 30. Se puede apreciar si el resultado es un efecto híbrido positivo o negativo.

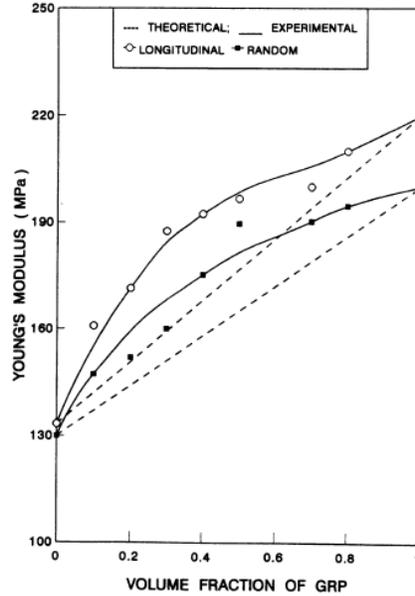


Figura 30. Variación del módulo de elasticidad con la fracción de volumen de GRP en compuestos híbridos vidrio/sisal [51].

También, en el 2001 Fu *et al* [52] analizaron el efecto de la hibridación de materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio y carbono. El efecto híbrido lo calcularon teóricamente a través la regla de las mezclas híbridas (RoHM, por sus siglas en inglés).

$$P_H = P_G V_G + P_C V_C \quad (24)$$

donde:

$P_H$  – Es la propiedad que se requiere investigar.

$P_G$  – Es la propiedad correspondiente a la fibra de vidrio.

$P_C$  – Es la propiedad correspondiente a la fibra de carbono.

$V_G, V_C$  – Son las fracciones de volumen de la fibra de vidrio y carbono.

$$V_G + V_C = 1 \quad (25)$$

En la Figura 31 se muestran los valores predichos y los valores experimentales del módulo a tensión de los compuestos híbridos. A partir de los valores encontrados, se puede observar si existe un efecto híbrido positivo o negativo.

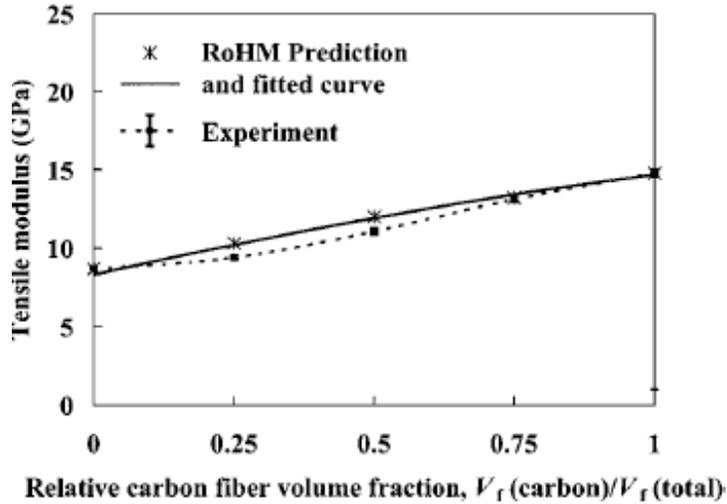


Figura 31. Módulo de tensión vs fracción de volumen de fibra de carbono relativa para compuestos híbridos SGF / SCF / PP [52].

Por otra parte, en el 2002 Sreekala *et al* [53], calcularon teóricamente el efecto de refuerzo híbrido de dos fibras. Utilizaron los modelos paralelos y de Hirsch para predecir las propiedades mecánicas de los compuestos híbridos.

Según el modelo paralelo:

$$X_c = X_f V_f + X_m V_m \quad (26)$$

donde:

$X_c, X_f$  y  $X_m$  – Son propiedades de resistencia del compuesto, la fibra y la matriz.

$V_f$  y  $V_m$  – Representan las fracciones de volumen de la fibra y matriz.

Según el modelo de Hirsch:

$$X_c = x(X_f V_f + X_m V_m) + (1 - x) \frac{X_f X_m}{X_m V_f + X_f V_m} \quad (27)$$

donde:

$x$  – Varía entre 0 y 1, lo que determina la transferencia de tensión entre la fibra y la matriz.

La ley aditiva de las mezclas híbridas se utilizó para calcular el efecto híbrido. La ley es la siguiente.

$$X_H = X_1 V_1 + X_2 V_2 \quad (28)$$

donde:

$X_H$  – Es una propiedad característica del compuesto híbrido.

$X_1$  y  $X_2$  – Son propiedades características de los compuestos individuales.

$V_1$  y  $V_2$  – Son las fracciones de volumen de los refuerzos en compuestos híbridos.

En la Figura 32 se compara la propiedad de tensión experimental de los compuestos híbridos con los valores teóricamente calculados.

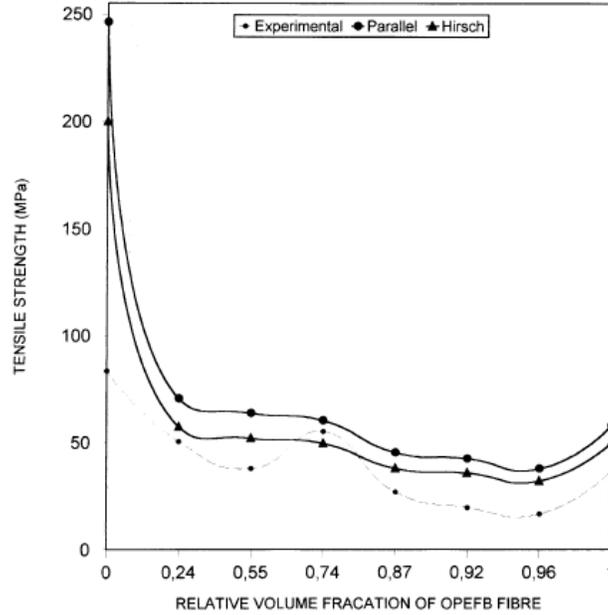


Figura 32. Comparación de valores de resistencia a la tensión experimentales y teóricos de compuestos de vidrio / OPEFB híbridos PF [53].

Por otra parte, en el 2012 Dong y Davies [54] utilizaron una relación híbrida con el fin de caracterizar el grado de hibridación de un laminado híbrido carbono/vidrio sobre el comportamiento a flexión. Para ello, utilizaron el espesor total de las fibras de carbono y de vidrio, así como las fracciones de volumen de cada uno de los refuerzos respectivamente.

$$r_h = \frac{1}{1 + \frac{h_c V_{fc}}{h_g V_{fg}}} \quad (29)$$

donde:

$h_c$  y  $h_g$  –Son los espesores de las secciones de carbono y vidrio.

$V_{fc}$  y  $V_{fg}$  –Son las fracciones de volumen de carbono y vidrio.

A partir de obtener la relación híbrida, proporcionan un modelo para predecir el módulo de flexión de compuestos híbridos. El modelo involucra los módulos de flexión de las láminas de carbono y vidrio, la relación híbrida obtenida previamente y coeficientes que se obtienen a partir de una regresión.

$$E_F = E_{cc} - (E_{cc} - E_{cg})[c_1 r_h + (1 - 2.1c_1)r_h^2 + 1.1c_1 r_h^3] \quad (30)$$

donde:

$E_{cc}$  y  $E_{cg}$  – Representa los módulos de flexión de los laminados de carbono y vidrio.

$c_1$  – Coeficiente obtenido de regresión.

$r_h$  – Relación híbrida.

Para comprobar la eficiencia del modelo, se eligieron dos configuraciones de apilado. Como se puede observar en la Figura 33, los resultados mostraron que el modelo presentado puede predecir con eficacia el módulo de flexión de los compuestos completos de carbono y vidrio.

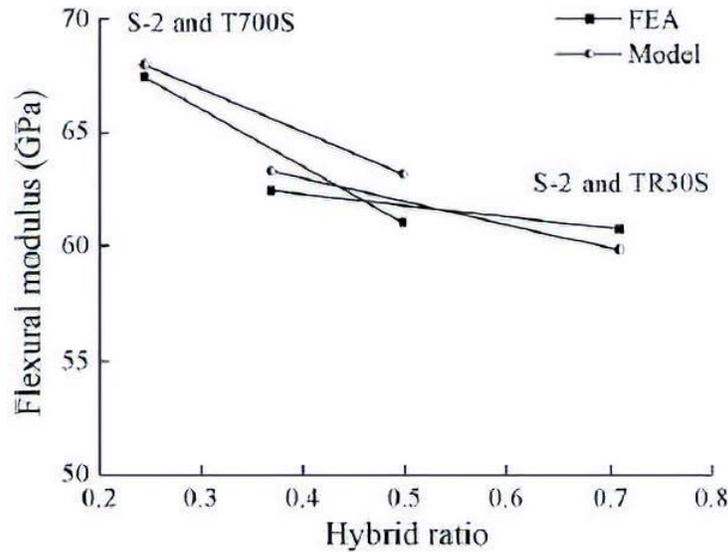


Figura 33. Módulos de flexión de compuestos híbridos hechos de dos sistemas de materiales: S-2 y T700S, y S-2 y TR30S [54].

Seguidamente, en el 2016 Dong [55] con el fin de caracterizar cuantitativamente el grado de hibridación, introdujo una relación híbrida, que es el porcentaje relativo de fibras de vidrio con respecto a todas las demás fibras restantes en el compuesto híbrido, es decir:

$$r_h = \frac{h_g V_{fg}}{h_g V_{fg} + h_c V_{fc}} \quad (31)$$

donde:

$h_c$  y  $h_g$  – Son los espesores de las secciones de carbono y vidrio.

$V_{fc}$  y  $V_{fg}$  – Son las fracciones de volumen de las secciones de carbono y vidrio

Para calcular la resistencia a la flexión utiliza la carga máxima que puede soportar el laminado híbrido.

$$S_F = \frac{3P_{max}S}{2bh^2} \quad (32)$$

donde:

$P_{max}$  – Carga máxima antes de la falla.

$S$  – Alcance de la muestra (distancia entre los soportes).

$b$  – Ancho de la muestra.

$h$  – Profundidad de la muestra (espesor total del laminado)

La ecuación proporciona una resistencia a la flexión aparente basada en la suposición de la distribución de tensiones lineales a lo largo del espesor, que refleja la carga máxima que una muestra puede soportar dada la amplitud y la profundidad.

La resistencia a la flexión de los compuestos híbridos que utilizan la ROM viene dada por:

$$S_{FRoM} = S_{Fc}(1 - r_h) + S_{Fg}r_h \quad (33)$$

donde:

$S_{Fc}$  y  $S_{Fg}$  – Resistencia a la flexión del compuesto de carbono y vidrio respectivamente.

$r_h$  – Relación híbrida.

Por lo tanto, el efecto híbrido se obtiene de la siguiente manera:

$$e_h = \frac{S_F}{S_{FRoM}} - 1 \quad (34)$$

donde:

$S_F$  – Resistencia a la flexión aparente.

$S_{FRoM}$  – Resistencia a la flexión híbrida.

Por otro lado, en el 2018 Singh *et al* [56] analizaron a través de la regla de mezclas (ROM) el efecto híbrido de laminados carbono/vidrio. La desviación en las propiedades mecánicas determinadas a partir de la investigación experimental y ROM también se conoce como el efecto híbrido. Utilizaron la ROM para determinar las características de tensión y compresión de las muestras híbridas.

El módulo de elasticidad de las láminas de vidrio y carbono lo calcularon a través la siguiente expresión:

$$E_g = E_{gf}V_{gf} + E_m(1 - V_{gf}) \quad (35)$$

$$E_c = E_{cf}V_{cf} + E_m(1 - V_{cf}) \quad (36)$$

donde:

$E_{cf}$  y  $E_{gf}$  – Módulos de elasticidad de las fibras de carbono y vidrio.

$V_{cf}$  y  $V_{gf}$  – Fracciones de volumen de las fibras de carbono y vidrio.

$E_m$  – Módulo de elasticidad de la matriz.

La fracción de volumen de todas las fibras de carbono y vidrio se obtiene de la siguiente expresión:

$$V_{gc} = \frac{V_{gf}}{V_{gf} + V_{cf}} \quad (37)$$

$$V_{cc} = \frac{V_{cf}}{V_{gf} + V_{cf}} \quad (38)$$

Con lo anterior se calcula el módulo de elasticidad híbrido.

$$E_{hc} = E_g V_{gc} + E_c V_{cc} \quad (39)$$

Para conocer si existió un efecto híbrido positivo o negativo, compararon los resultados de los laminados híbridos con laminados de referencia de vidrio y carbono (ver Figura 34).

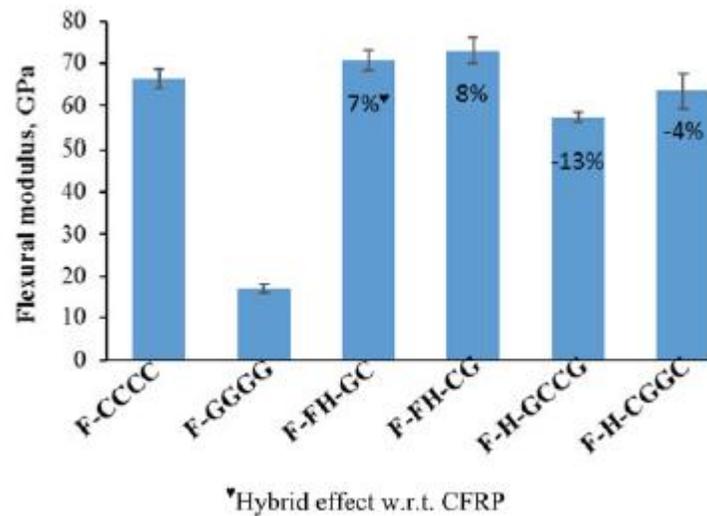


Figura 34. Comparación entre CFRP y compuestos híbridos [56].

Por otra parte, en el 2020 Rajpurohit *et al* [50] realizaron el cálculo de la resistencia a la tensión de compuestos híbridos unidireccionales. Para realizar el cálculo consideraron las fracciones de volumen de cada refuerzo, y mencionan que, en fracciones de volumen compuesto de carbono más bajas, la propiedad de los compuestos híbridos estaría gobernada por compuestos de fibra de vidrio, mientras que, en fracciones de volumen compuesto de carbono más altas, estaría gobernada por compuestos de fibra de carbono.

Por lo tanto, en fracciones de volumen compuesto de carbono más bajas (en tensión):

$$\sigma_{max}^h = \sigma_{max}^g \times (1 - V_c) \quad (40)$$

y, a fracciones de volumen compuesto de carbono más altas (en tensión):

$$\sigma_{max}^h = \sigma_{max}^c \times V_c + (\sigma^g)_{\varepsilon_{max}^c} \times (1 - V_c) \quad (41)$$

donde:

$\sigma_{max}^h$  – Es la resistencia a la tensión del compuesto híbrido.

$\sigma_{max}^c$  – Es la resistencia a la tensión del compuesto de carbono.

$\sigma_{max}^g$  – Es la resistencia a la tensión del compuesto del vidrio.

$(\sigma^g)_{\varepsilon_{max}^c}$  – Es la tensión en el compuesto de vidrio correspondiente a la deformación final del compuesto de carbono.

$V_c$  – Es la fracción de volumen del carbono.

Para calcular el efecto híbrido, se considera como efecto híbrido positivo un aumento en la falla por deformación de los compuestos híbridos sobre la falla por deformación de los compuestos de referencia.

$$\lambda_{falla\ por\ deformación} = \frac{\varepsilon H}{\varepsilon LE} - 1 \quad (42)$$

donde:

$\varepsilon H$  – es la falla por deformación del compuesto híbrido.

$\varepsilon LE$  – es la falla por deformación del compuesto de baja elongación.

Para las resistencias a la tensión y compresión, el efecto híbrido se calcula a través de la ecuación 43. Un efecto híbrido positivo aquí se define como una desviación positiva de una determinada propiedad mecánica del comportamiento de la Regla de Mezclas.

$$\lambda_{Resistencia} = \frac{\sigma H}{\sigma ROM} - 1 \quad (43)$$

donde:

$\sigma H$  – Se obtiene experimentalmente la resistencia del compuesto híbrido

$\sigma ROM$  – Es el valor teóricamente obtenido para el compuesto híbrido usando la regla de mezclas (igual al  $\sigma_{max}^h$ ).

### 3.11 Conclusiones del marco teórico

En la mayoría de las investigaciones realizadas utilizan la regla de mezclas para predecir comportamientos referentes a la hibridación y encontrar el efecto híbrido de los materiales compuestos. Para lograr las predicciones siempre consideran las fracciones de volumen y las

propiedades mecánicas de los materiales constituyentes. Con estas características se puede calcular también una relación híbrida que sirve para predecir teóricamente resultados de resistencias y módulos ya sean de tensión o flexión. Sin embargo, no relacionan la secuencia de apilado con los resultados finales de la relación híbrida o del efecto de hibridación. Por tal motivo, este estudio tratará de involucrar la secuencia de apilado y el efecto de hibridación para poder predecir de manera más aproximada las propiedades que se requieran obtener. Si bien la secuencia de apilado no es una variable cuantitativa, es necesario asignarle un valor de acuerdo con la propiedad mecánica que se desee obtener con el fin de convertirla en una variable.

## Procedimiento experimental

El proceso experimental para el estudio tiene como base las siguientes fases mostradas en la Tabla 2 y en la Figura 35. El desarrollo del proceso experimental concede el análisis y la discusión sobre los resultados del estudio. Éste permite detectar criterios que puedan ayudar a encontrar posibles secuencias de apilado híbridas que mejoren las propiedades mecánicas de los compuestos laminados.

Tabla 2. Actividades del proceso experimental.

No.	Actividad	Descripción	Objetivo	Producto
1	Estado del arte de la influencia de la secuencia de apilado híbrida sobre las propiedades de materiales compuestos laminados híbridos.	Se buscó información sobre la influencia de la secuencia de apilado híbrida.	Hallar información que ayude para dar solución al estudio.	Metodologías, tendencias de investigación y variables de mayor influencia.
2	Diseño del experimento.	Se establecieron las variables de estudio, los materiales para la construcción, el método de manufactura, configuraciones de apilado y el número de probetas a ensayar.	Establecer parámetros diseño.	Diseño experimental o matriz de datos.
3	Construcción de laminados	Se empleó la combinación de dos métodos, estos son: Método de infusión de resina asistido por vacío y método de aplicación manual.	Obtener las probetas a ensayar.	Laminados para obtención de probetas.
4	Realización de pruebas mecánicas.	Se realizaron las pruebas de flexión y de tensión según las normas ASTM D7264 y D3039.	Encontrar los valores de tensión y flexión para cada tipo de laminado.	Base de datos.
5	Interpretación de datos.	Se analizó la relación de la secuencia de apilado e hibridación respecto a las propiedades de resistencia de los materiales compuestos.	Detectar las configuraciones de laminados que obtengan mejores propiedades de flexión y tensión.	Laminados con mejores propiedades.

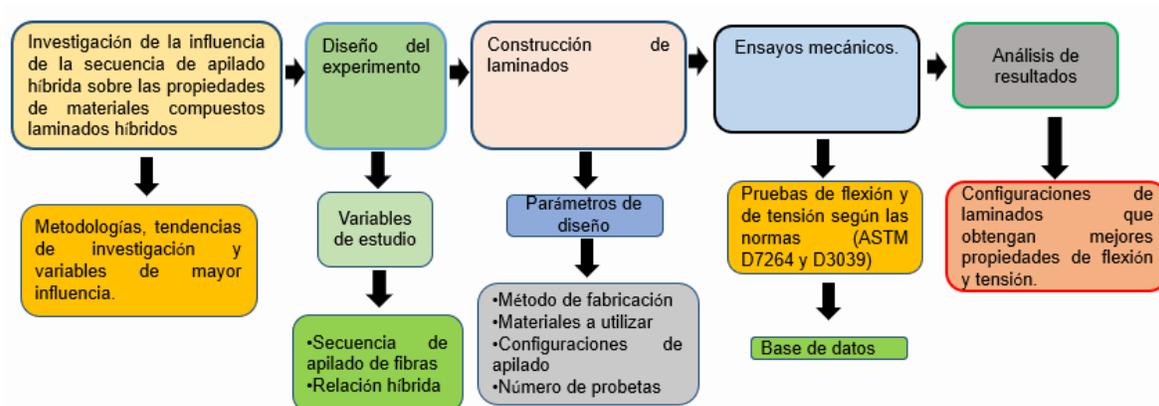


Figura 35. Diagrama para obtener las secuencias de apilado híbridas para aplicaciones estructurales.

## 4.1 Diseño del experimento

En esta sección se establecen las variables que conforman al procedimiento experimental, el cual involucra la selección de parámetros para el estudio de la secuencia híbrida de apilado sobre las propiedades mecánicas de los materiales compuestos laminados, el método de manufactura, las características de las probetas, el número de ensayos, la metodología de ensayo y los resultados esperados.

### 4.1.1 Propiedades de los materiales constituyentes

La combinación de fibras de carbono con fibras de vidrio es la manera más viable de hibridar debido a que se obtienen mejores propiedades mecánicas respecto a otras configuraciones híbridas, además de que se ahorran costos. Por tales motivos, se seleccionaron estos dos tipos de fibras. Cabe señalar que existen diversas presentaciones textiles de las fibras (tela tejida, tela unidireccional, etc.). Para este estudio se eligieron las fibras unidireccionales por las ventajas que ofrecen al trabajar con ellas (las fibras unidireccionales permanecen en una configuración plana y recta dentro de la tela, además, de evitar que las fibras cambien de posición o se amontonen durante su manejo). En la Tabla 3, 4 y 5 se muestran las propiedades físicas de la fibra de carbono, vidrio (fibras suministradas por la empresa “*ACP composites*”) y resina (suministrada por la empresa “*Axon Technologies*”).

Tabla 3. Propiedades físicas de la fibra de carbono [57].

Propiedades físicas	
Forma	Tela unidireccional
Densidad superficial	$4.8 \pm 5\% \text{ oz/yd}^2 (16.275 \pm 5\% \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2)$
Espesor	$0.01" \pm 0.002" (2.540 \pm 0.508 \times 10^{-4} \text{ m})$
Fibra	12K de fibra de carbono

Tabla 4. Propiedades físicas de la fibra de vidrio [58].

Propiedades físicas	
Forma	Tela unidireccional
Densidad Superficial	$4.2 \frac{\text{oz}}{\text{yd}^2} \pm 5\% (14.241 \pm 5\% \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2)$
Espesor	$.009" \pm .005" (2.286 \pm 0.508 \times 10^{-4} \text{ m})$
Fibra	406 tex S2 fibra de vidrio

Tabla 5. Ficha técnica de la resina EPOLAM 5015 [59].

Propiedades físicas	
Dureza	85 Shore D15
Módulo a flexión	3,000 MPa
Resistencia a la tensión	80 MPa
Resistencia a la flexión	105 MPa
Viscosidad a 25°C	210 mPa.s
Pot a life a 25°C	135 min

#### 4.1.2 Diseño geométrico de las probetas y número de probetas

Las dimensiones de las probetas están conformadas de acuerdo con la normatividad de ASTM D7264 para pruebas a flexión (sus dimensiones están en función de la geometría de cada probeta). Para el caso de las pruebas a tensión, las dimensiones de las probetas serán: 13 mm de ancho y 135 mm de largo por conveniencia. En la tabla 6 se muestran los requisitos geométricos de la probeta de material compuesto para ensayos a tensión conforme con la norma ASTM D3039.

Tabla 6. Requisitos geométricos de la probeta de material compuesto para ensayos de tensión [39].

Requisitos geométricos de la probeta de material compuesto para ensayos de tensión	
Parámetro	Requisito
Forma	De sección transversal rectangular constante
Longitud mínima	Sujeción + 2 veces el ancho + longitud de medición
Ancho de la probeta	El requerido
Tolerancia del ancho de la probeta	$\pm 1\%$ del ancho
Espesor de la probeta	El requerido
Tolerancia del espesor de la probeta	$\pm 4\%$ del espesor

El número de probetas son las mismas tanto para las pruebas a flexión como a tensión. Acorde con las normas ASTM D3039 y ASTM D7264 indican que se deben probar cinco muestras por condición de prueba a menos que se logren obtener datos válidos con menos pruebas.

#### 4.1.3 Método de manufactura

Para la manufactura de los materiales laminados híbridos, se empleó la combinación de dos métodos, estos son: método de infusión de resina y método de *hand lay-up*, en la Figura 36 se muestra un esquema representativo del método de manufactura. La combinación de estos métodos funciona de forma general con las siguientes etapas:

1. Se humedece la tela desplegable (*peel-ply*) con la resina epóxica, y se coloca en el molde de vidrio. A partir de lo anterior, se colocan una a una las láminas de fibra humedecidas respectivamente. El lapso entre colocación de las láminas es de 10 minutos.
2. Una vez colocadas todas las láminas previamente definidas, se coloca otra tela desplegable seguido de otro molde de vidrio.
3. Se colocan los conectores y arterias en el perímetro del laminado junto con el conector de aluminio, el cual se conectará a las arterias con la bomba de vacío mediante una manguera.

4. Se sella el sistema a través una bolsa de plástico, la cual permitirá realizar el vacío. El sistema se somete a una presión de -1 atm durante tres periodos (30 segundos de vacío y 1 minuto de reposo). Por último, se desconecta la bomba de vacío y se sella la manguera que conecta el interior del sistema con la bomba de vacío.
5. Se pasa al proceso de curado.

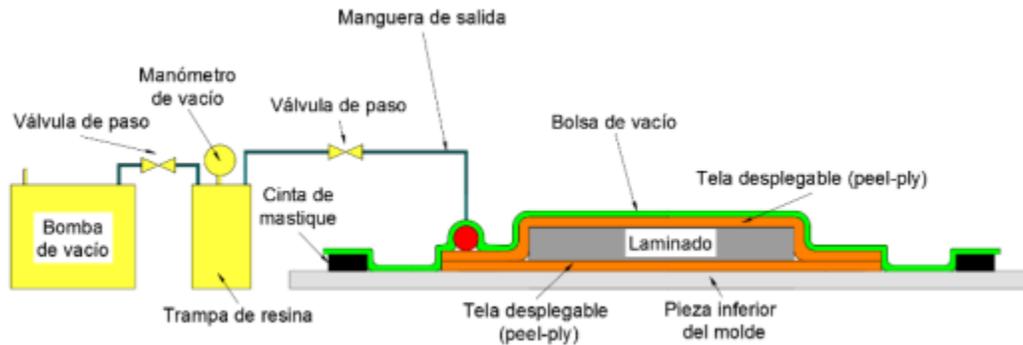


Figura 36. Esquema representativo del método de manufactura [16].

#### 4.1.4 Variables de diseño

Durante la revisión del estado del arte se encontraron diversos factores que influyen en las propiedades mecánicas finales de los materiales compuestos, estos factores son: propiedades de los materiales constituyentes, secuencia de apilado, orientación de las fibras e hibridación. Sin embargo, la secuencia de apilado e hibridación son las variables que causan un mayor impacto en las características de los materiales compuestos laminados híbridos. Por tal motivo, solo se consideran estas dos variables. Por lo tanto, las variables restantes permanecerán fijas durante este estudio.

#### 4.1.5 Secuencias de apilado híbridas para obtener las probetas de estudio

Los laminados se realizaron con 10 láminas apiladas en una sola dirección (debido a que la orientación de las fibras estará fija) con el fin de apreciar el efecto híbrido. La selección de 10 láminas se eligió con la intención de apreciar de mejor manera el efecto de la hibridación ya que de acuerdo con lo observado en la literatura no hay un criterio que establezca el número de capas óptimo en un laminado híbrido vidrio/carbón. La hibridación es con base al número de capas de carbono que existen en el compuesto. El número de laminados se muestran en la Tabla 7. Se realizaron cinco por cada laminado conforme con la norma ASTM D3039. También, se muestran las secuencias de apilado del material en la Figura 37.

Donde:

V corresponde a la fibra de vidrio y C a la fibra de carbono.

Tabla 7. Laminados concordes con la secuencia de apilado del material y porcentajes de hibridación.

Secuencia de apilado del material										Nomenclatura	Hibridación	
SA1	C	V	V	V	V	V	V	V	V	C	$[C/V/V/V/V]_s$	20%
SA2	C	C	V	V	V	V	V	V	C	C	$[C/C/V/V/V]_s$	40%
SA3	C	C	C	V	V	V	V	C	C	C	$[C/C/C/V/V]_s$	60%
SA4	V	C	V	V	V	V	V	V	C	V	$[V/C/V/V/V]_s$	20%
SA5	V	C	C	V	V	V	V	C	C	V	$[V/C/C/V/V]_s$	40%
SA6	V	C	C	C	V	V	C	C	C	V	$[V/C/C/C/V]_s$	60%
SA7	V	V	C	V	V	V	V	C	V	V	$[V/V/C/V/V]_s$	20%
SA8	V	V	C	C	V	V	C	C	V	V	$[V/V/C/C/V]_s$	40%
SA9	V	V	C	C	C	C	C	C	V	V	$[V/V/C/C/C]_s$	60%
SA10	V	V	V	C	V	V	C	V	V	V	$[V/V/V/C/V]_s$	20%
SA11	V	V	V	C	C	C	C	V	V	V	$[V/V/V/C/C]_s$	40%
SA12	C	V	C	V	C	C	V	C	V	C	$[C/V/C/V/C]_s$	60%
SA13	V	V	V	V	C	C	V	V	V	V	$[V/V/V/V/C]_s$	20%
SA14	C	V	C	V	V	V	V	C	V	C	$[C/V/C/V/V]_s$	40%
SA15	C	V	V	C	C	C	C	V	V	C	$[C/V/V/C/C]_s$	60%
SAV	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	$[V/V/V/V/V]_s$	N/A
SAC	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	$[C/C/C/C/C]_s$	N/A

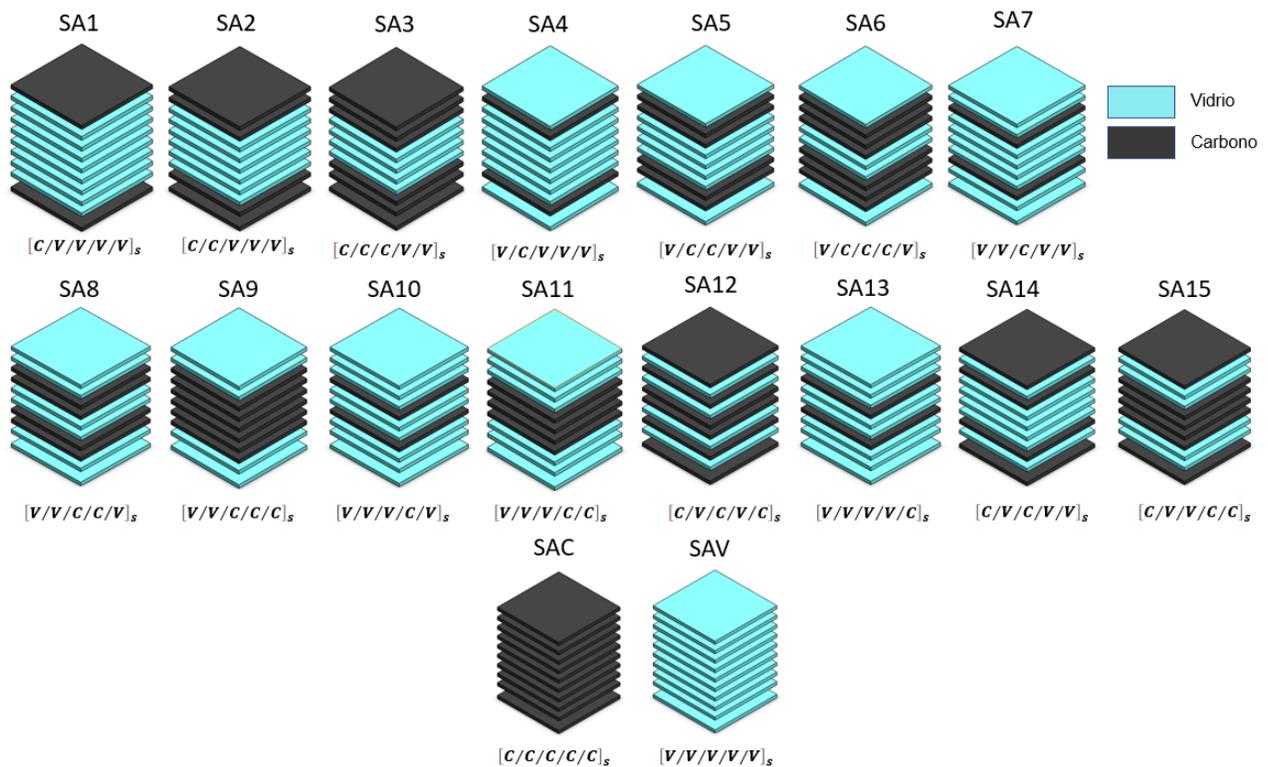


Figura 37. Secuencias de apilado híbridas y laminados de referencia SAC y SAV.

De los laminados fabricados se obtuvieron las probetas para la realización de las pruebas mecánicas de tensión y flexión correspondientes (es decir, cinco pruebas por condición). A partir de las pruebas antes mencionadas se obtuvo una base de datos experimentales, los cuales permitieron determinar la influencia de las variables (secuencia de apilado e hibridación) en las propiedades de los materiales compuestos.

#### 4.1.6 Materiales y equipos

- Resina epóxica.
- Fibras de vidrio y carbono.
- Máquina universal de ensayos Shimadzu AG-X plus 100 kN.
- Fresadora multiusos Grizzly industrial® modelo G0704.
- Equipo de infusión de resina.
- Aditamentos.
- Celda de carga

### 4.2 Manufactura

#### 4.2.1 Preparación de materiales

Los materiales que se utilizaron son los siguientes.

- Fibra de carbono
- Fibra de vidrio
- Resina Epolam 515
- Endurecedor Epolam 515
- Tela *peel-ply*
- Vidrio de 35cm X 35 cm
- Vidrio de 15cm X15 cm
- Cera desmoldante
- Bolsa de polietileno
- Otros

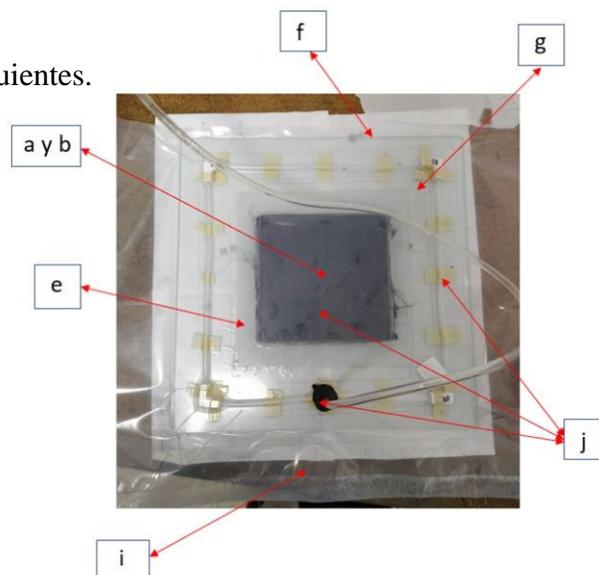


Figura 38. Materiales constituyentes de un laminado.

La preparación de los materiales consistió en cortar 70 láminas de fibra de carbono de 15cm X 15 cm y 100 láminas de fibra de vidrio haciendo un total de 170 láminas. Con las láminas se fabricaron 17 laminados. La Tabla 8 muestra las actividades principales que se realizaron.

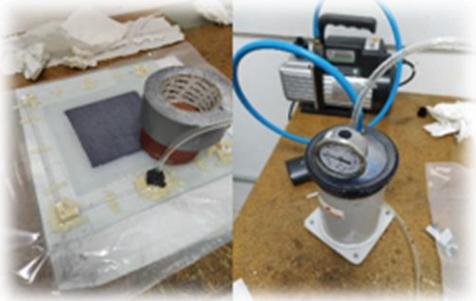
Tabla 8. Actividades durante el proceso de preparación de materiales.

No.	Actividad	Material que se usa	Imagen
1	Se cortó del rollo de fibra de vidrio un total de 100 láminas de 15cm X 15cm.	Fibra de vidrio	
2	Se cortó del rollo de fibra de carbono un total de 70 láminas de 15cm X 15cm.	Fibra de carbono	
3	Se enceraron un total de 68 vidrios.	Vidrio	
4	Se cortaron un total de 34 bolsas de polietileno.	Bolsa de polietileno	
5	Se cortaron del rollo de tela un total de 68 cuadros de 21cm X 21cm.	Tela <i>peel-ply</i>	
6	Material que ayuda con el proceso de manufactura (plantilla de referencia, alcohol, espátulas, vasos, mangueras, entre otros).	Otros.	

#### 4.2.2 Manufactura de laminados

La manufactura de los laminados se basa en la combinación de dos métodos (método de infusión de resina asistido por vacío y el método de *hand lay-up*), se lleva a cabo a través de distintos procedimientos para llegar al laminado final y después obtener las probetas. En la Tabla 9 se observan los procedimientos principales.

Tabla 9. Proceso de manufactura de laminados.

No.	Proceso	Imagen
1	Preparación de todo el material que se enlista en la Tabla 1.	
2	Peso del total de láminas de vidrio y carbono que se usarán para cada laminado.	
3	Mezcla de resina con el endurecedor.	
4	Armado del laminado que se describe anteriormente.	
5	Selección de materiales para sellar el laminado (bolsa, arterias, manguera, codos).	
6	Aplicación de vacío al laminado armado previamente.	
7	Sustracción del laminado.	

En la Figura 39 se muestra la variación de espesor del laminado SA1, lo cual permite observar la eficiencia del método de manufactura antes mencionado y la influencia del espesor en las propiedades mecánicas finales del laminado. (Ver Anexo 1 para las variaciones de espesor de todas las configuraciones).

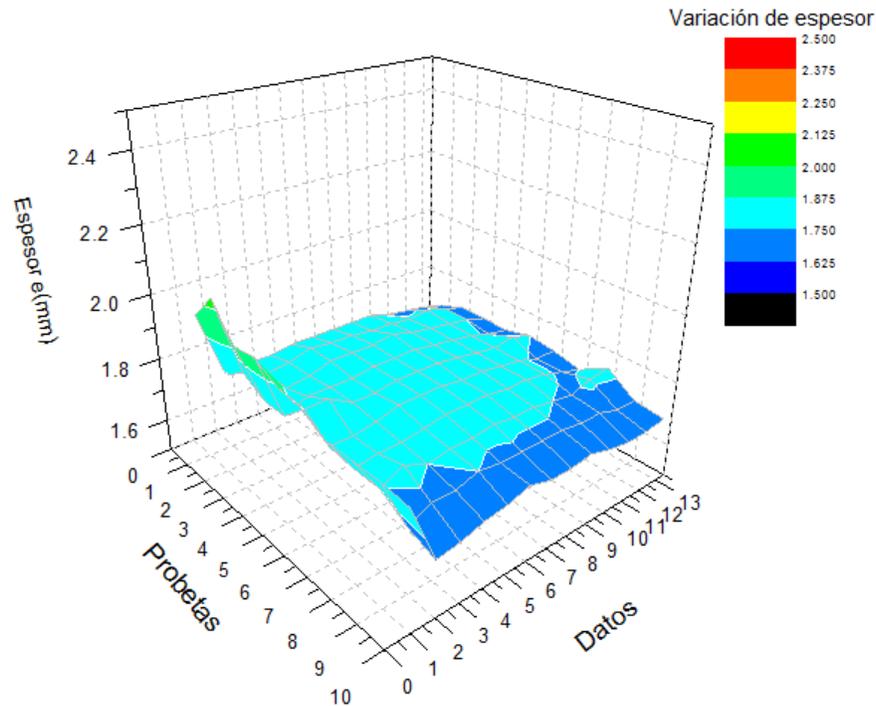


Figura 39. Variación del espesor de laminado SA1.

### 4.2.3 Obtención de probetas

La obtención de probetas de los laminados de estudio planteados en la Tabla 7 se clasifican en 17 configuraciones de apilado. por cada laminado se obtienen 10 probetas, de las cuales cinco serán para pruebas de tensión y las restantes para pruebas de flexión. En la Figura 40 se puede ver el esquema del laminado SA1 con sus respectivas probetas que se obtienen después de fabricar cada laminado.

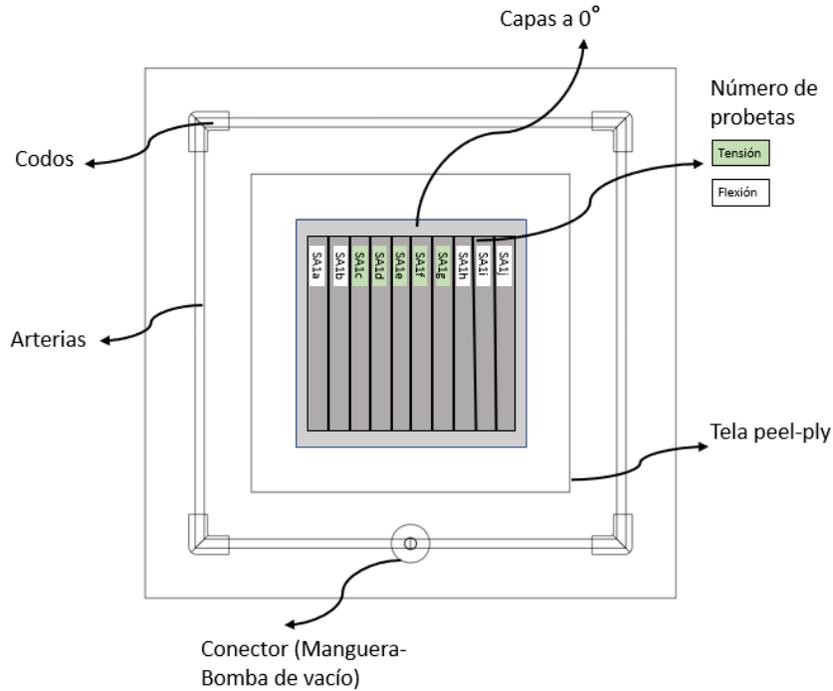


Figura 40. Esquema del laminado SA1 con su respectivo número de probetas.

Luego de realizar el proceso de manufactura de los laminados, continua la obtención de las 10 probetas mostradas en la Figura 40. Para la obtención de las probetas, se identificó el área utilizable y se cortaron las probetas utilizando una fresadora multiusos GRIZZLY industrial® modelo G0704 con un cortador de 1/8" a una velocidad de operación de 1400rpm. La Figura 41 muestra el laminado antes y después de ser cortado, los espacios representan el espacio de material que se pierde debido al cortador. Cabe señalar que, por esta razón, las probetas varían milimétricamente (entre 1mm y 1.5mm de diferencia) su ancho y largo (ver Anexo 2).

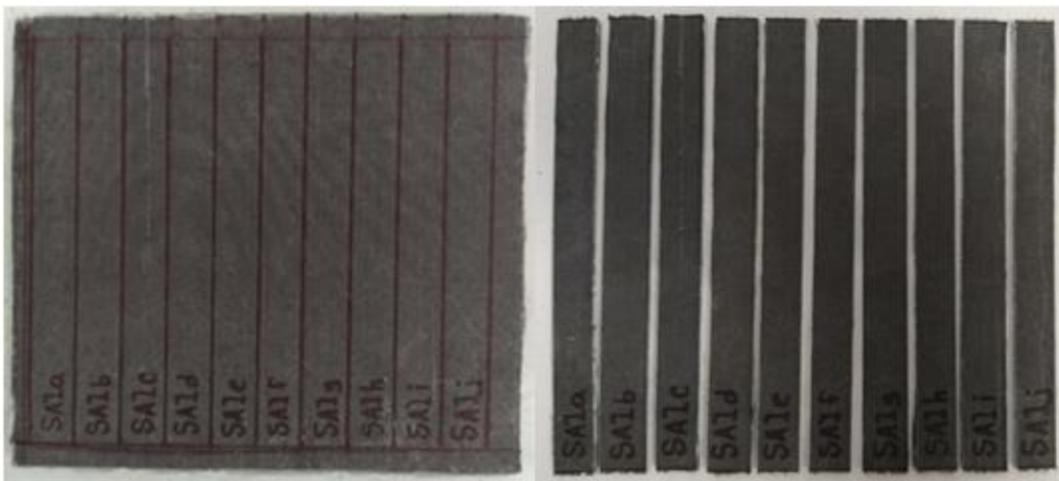


Figura 41. Laminado SA1 antes y después de ser cortado.

Cada laminado produce 10 probetas, por lo tanto, fueron un total de 170 probetas. Después de cortar las probetas, se obtuvieron las características (geométricas y físicas) de cada laminado. A partir de la obtención de las características, se generó una matriz la cual contiene todos los datos de cada laminado. En las Figuras 42, 43 y 44 se muestran las características de los laminados (ver Anexo 2).

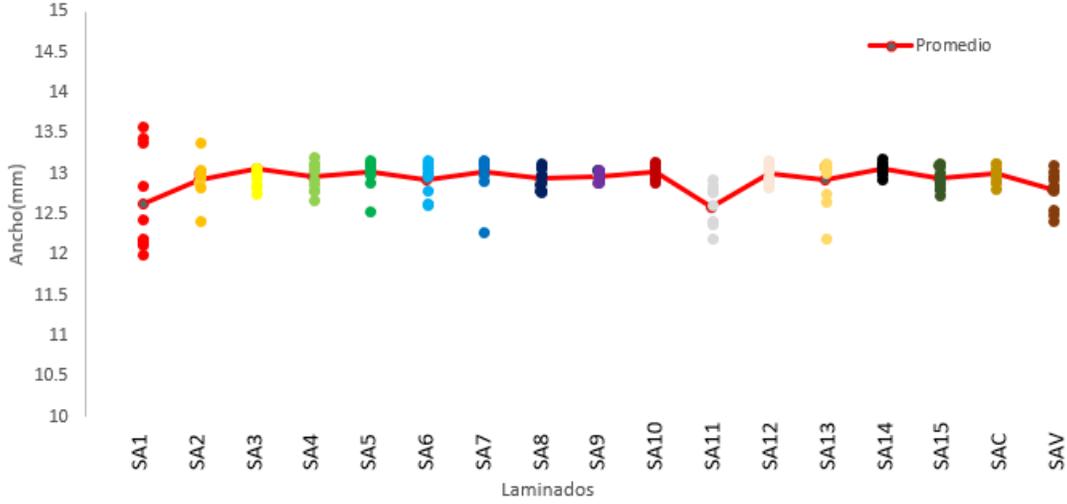


Figura 42. Ancho de los laminados fabricados.

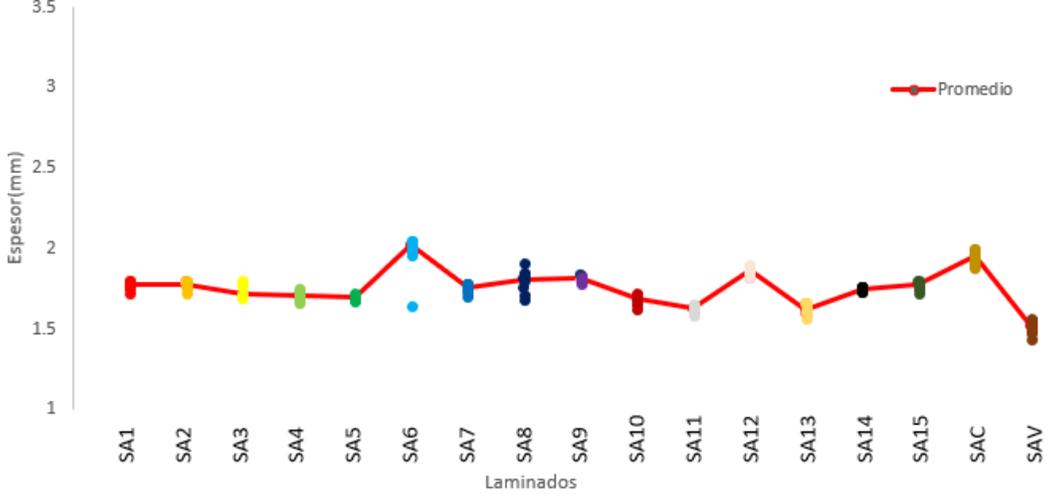


Figura 43. Espesor de los laminados fabricados.

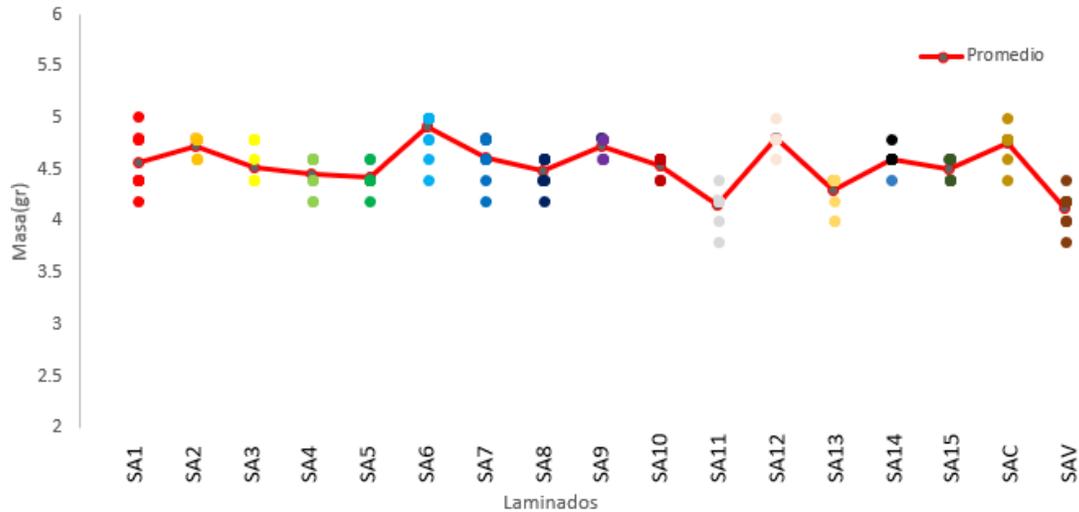


Figura 44. Masa de los laminados fabricados.

Las características físicas que obtiene cada laminado son producto del método de manufactura empleado, lo cual es muy importante ya que se derivan las propiedades mecánicas de cada configuración. Por ejemplo, los espesores son distintos en las diez probetas que constituyen al laminado, entre más dispersos se encuentren los espesores, los datos obtenidos después de ensayar cada laminado se pueden alejar de los valores reales y provocan una variación de datos finales. Sin embargo, el método de manufactura se considera confiable debido a que la variación de datos no es significativa en espesor, masa y ancho de cada probeta.

#### 4.2.4 Diseño paramétrico

Este diseño muestra el total de probetas por cada laminado, así como también el número de ellas que fueron destinadas para las distintas pruebas mecánicas (flexión y tensión), donde **T** indica que serán sometidas a pruebas de tensión y **F** indica que serán sometidas a pruebas de flexión. La Tabla 10 muestra el diseño paramétrico para este estudio (SA16 es SAV y SA17 es SAC, que son los laminados de referencia de vidrio y carbono).

Tabla 10. Diseño paramétrico de laminados híbridos carbono/vidrio.

Laminado	Probeta	Prueba	Laminado	Probeta	Prueba	Laminado	Probeta	Prueba
<b>SA1</b>	SA1a	F	<b>SA4</b>	SA4a	F	<b>SA7</b>	SA7a	F
	SA1b	F		SA4b	F		SA7b	F
	SA1c	T		SA4c	T		SA7c	T
	SA1d	T		SA4d	T		SA7d	T
	SA1e	T		SA4e	T		SA7e	T
	SA1f	T		SA4f	T		SA7f	T
	SA1g	T		SA4g	T		SA7g	T
	SA1h	F		SA4h	F		SA7h	F
	SA1i	F		SA4i	F		SA7i	F
	SA1j	F		SA4j	F		SA7j	F
	Laminado	Probeta		Prueba	Laminado		Probeta	Prueba
<b>SA2</b>	SA2a	F	<b>SA5</b>	SA5a	F	<b>SA8</b>	SA8a	F
	SA2b	F		SA5b	F		SA8b	F
	SA2c	T		SA5c	T		SA8c	T
	SA2d	T		SA5d	T		SA8d	T
	SA2e	T		SA5e	T		SA8e	T
	SA2f	T		SA5f	T		SA8f	T
	SA2g	T		SA5g	T		SA8g	T
	SA2h	F		SA5h	F		SA8h	F
	SA2i	F		SA5i	F		SA8i	F
	SA2j	F		SA5j	F		SA8j	F
	Laminado	Probeta		Prueba	Laminado		Probeta	Prueba
<b>SA3</b>	SA3a	F	<b>SA6</b>	SA6a	F	<b>SA9</b>	SA9a	F
	SA3b	F		SA6b	F		SA9b	F
	SA3c	T		SA6c	T		SA9c	T
	SA3d	T		SA6d	T		SA9d	T
	SA3e	T		SA6e	T		SA9e	T
	SA3f	T		SA6f	T		SA9f	T
	SA3g	T		SA6g	T		SA9g	T
	SA3h	F		SA6h	F		SA9h	F
	SA3i	F		SA6i	F		SA9i	F
	SA3j	F		SA6j	F		SA9j	F
	Laminado	Probeta		Prueba	Laminado		Probeta	Prueba
<b>SA10</b>	SA10a	F	<b>SA13</b>	SA13a	F	<b>SAV</b>	SA16a	F
	SA10b	F		SA13b	F		SA16b	F
	SA10c	T		SA13c	T		SA16c	T

	SA10d		T		SA13d		T		SA16d		T
	SA10e		T		SA13e		T		SA16e		T
	SA10f		T		SA13f		T		SA16f		T
	SA10g		T		SA13g		T		SA16g		T
	Sa10h	F			Sa13h	F			Sa16h	F	
	SA10i	F			SA13i	F			SA16i	F	
	SA10j	F			SA13j	F			SA16j	F	
Laminado	Probeta	Prueba	Laminado	Probeta	Prueba	Laminado	Probeta	Prueba			
<b>SA11</b>	SA11a	F		<b>SA14</b>	SA14a	F		<b>SAC</b>	SA17a	F	
	SA11b	F			SA14b	F			SA17b	F	
	SA11c		T		SA14c		T		SA17c		T
	SA11d		T		SA14d		T		SA17d		T
	SA11e		T		SA14e		T		SA17e		T
	SA11f		T		SA14f		T		SA17f		T
	SA11g		T		SA14g		T		SA17g		T
	Sa11h	F			Sa14h	F			Sa17h	F	
	SA11i	F			SA14i	F			SA17i	F	
	SA11j	F			SA14j	F			SA17j	F	

Laminado	Probeta	Prueba	Laminado	Probeta	Prueba		
<b>SA12</b>	SA12a	F	<b>SA15</b>	SA15a	F		
	SA12b	F		SA15b	F		
	SA12c			T	SA15c		T
	SA12d			T	SA15d		T
	SA12e			T	SA15e		T
	SA12f			T	SA15f		T
	SA12g			T	SA15g		T
	Sa12h	F			Sa15h	F	
	SA12i	F			SA15i	F	
	SA12j	F			SA15j	F	

### 4.3 Pruebas experimentales

Después de obtener las probetas (proceso de corte), procede la preparación de acuerdo con las normas ASTM D3039 y D7264 para realizar los ensayos de tensión y flexión, respectivamente.

La realización de las pruebas mecánicas (tensión y flexión), emplean la máquina universal de ensayos Shimadzu AG-X plus 100kN. La máquina puede usar celdas de carga con distinta

capacidad, una con capacidad de 100kN (para pruebas de tensión en este estudio) y la otra con capacidad de 5kN (para pruebas de flexión en este estudio). Cabe señalar que la utilización cumple con los requisitos de las normas ASTM previamente mencionadas.

En el caso de las pruebas de tensión, para registrar las deformaciones se utilizó el extensómetro Epsilon® 3542-050M-050-ST (longitud calibrada de 50mm). La rapidez del travesaño de la máquina es de 2 mm/min y opera a una velocidad constante como lo indica la norma. Las probetas por su forma plana utilizan cabezales de cuña. Para la sujeción, en ocasiones es necesario usar talones (pestañas de fricción) debido a que pueden arrojar mejores resultados en comparación con sujeciones sin talones, sin embargo, no siempre es así. Por tal motivo, se debe realizar una prueba con talón y la otra sin talón, las demás pruebas se realizarán con el método de sujeción que obtenga mejores resultados. El proceso se debe repetir para cada laminado con sus distintas probetas.

Por otra parte, en el caso de la prueba de flexión, la norma ASTM D7264 indica que se pueden emplear dos métodos (flexión de cuatro y tres puntos). En el estudio realizado se utilizó el método de flexión de tres puntos con una relación de 32:1 conforme a la norma para colocar los puntos de apoyo de cada probeta. Cabe señalar que los puntos de apoyo están en función del espesor de la probeta por lo que van a cambiar de acuerdo con cada laminado.

Para realizar la fase experimental, fue requerido conocer el funcionamiento de la máquina de ensayos universales Shimadzu AG-X plus 100 kN, lo cual implicó conocer la forma correcta de colocar los aditamentos, el extensómetro, la calibración de la máquina y el conocimiento del software TRAPEZIUMX que opera a la máquina. También se aprendió la forma correcta de colocar las probetas en cada prueba para que los resultados no sean ineficientes.

## Análisis y discusión de resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos a partir de la experimentación, así como el análisis de cada configuración estudiada encontrando los mejores laminados conforme con el tipo de ensayo. Se realizaron ensayos de tensión y flexión a las configuraciones propuestas anteriormente. Para el caso de los laminados ensayados a tensión, se lograron obtener los módulos de elasticidad y para el caso de los laminados ensayados a flexión, se lograron obtener los módulos de elasticidad, los esfuerzos máximos y las deformaciones a la falla. También, se muestra una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente y los resultados obtenidos a través de la teoría clásica de laminados.

### 5.1 Ensayos de tensión

La realización de las pruebas a tensión de los laminados estudiados se llevó a cabo en la máquina universal de ensayos Shimadzu AG-X plus 100 kN. De los laminados SA9  $[V/V/C/C/C]_S$  y SA11  $[V/V/V/C/C]_S$ , se seleccionaron las probetas SA9e y SA11f para ser sometidos a ensayos de tensión. Las gráficas de las Figuras 45 y 46 muestran el diagrama esfuerzo-elongación para cada probeta.

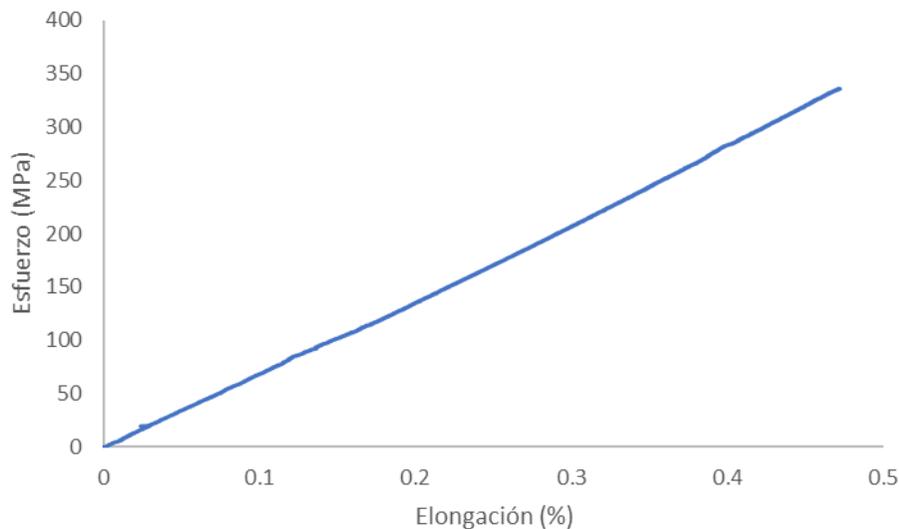


Figura 45. Diagrama esfuerzo-elongación del laminado SA9e.

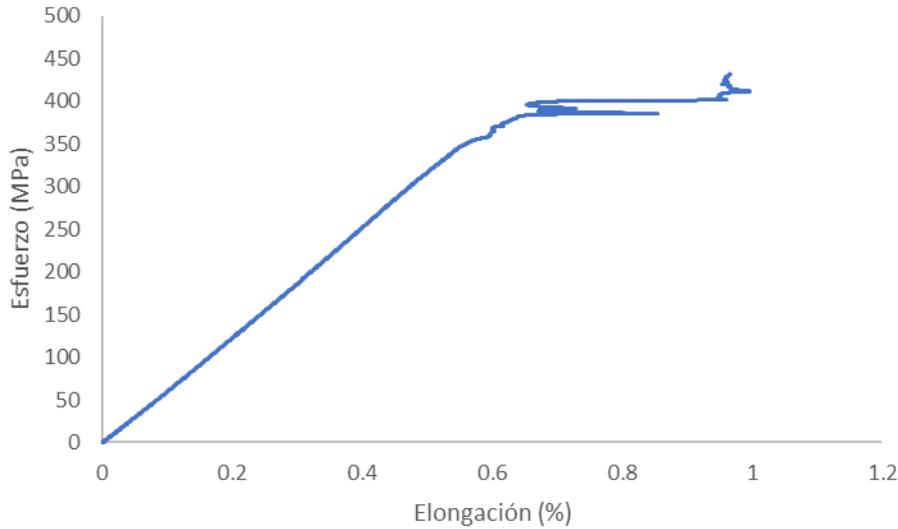


Figura 46. Diagrama esfuerzo-elongación del laminado SA11f.

El laminado SA9 contiene seis capas de carbono ubicadas en el centro del material, por lo que las láminas de vidrio quedan situadas en el exterior. La probeta SA9e exhibió un esfuerzo a tensión hasta antes de que se deslizará la probeta de 336.11 MPa. Por otra parte, el laminado SA11 contiene cuatro capas de carbono en el centro del material y seis capas de vidrio en el exterior. La probeta SA11f presentó un esfuerzo a la tensión hasta antes de que se deslizará la probeta de 432.34 MPa, además, el comportamiento de la línea horizontal (entre 0.6 y 1 de elongación) que muestra la Figura 46 se debe al problema de la sujeción y del uso incorrecto del extensómetro. La Tabla 11 muestra las propiedades mecánicas de ambas probetas. La fracción de volumen se calculó conforme con procedimiento usado por Alcludia 2 [16], aunque no es objeto de estudio, este trabajo la presenta debido a que es una variable que influye en las propiedades finales de los materiales compuestos laminados híbridos.

Tabla 11. Propiedades mecánicas de las probetas SA9e y SA11f.

Probeta	<b><i>Fmax</i></b> (N)	$\sigma_t$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$v_f$	$v_r$
SA9e	8052.71	336.11	0.471	0.43	0.57
SA11f	9196.90	432.34	0.645	0.46	0.54

donde:

***Fmax*** – Fuerza máxima que resiste una probeta.

$\sigma_t$  – Esfuerzo a tensión (hasta antes de que se deslizará la probeta).

$\epsilon$  – Porcentaje de deformación.

$v_f$  – Fracción de volumen de las fibras.

$v_r$  – Fracción de volumen de la resina.

Los resultados de las pruebas muestran que la probeta SA11f presenta mayor esfuerzo antes del deslizamiento de la probeta y elongación en comparación con la probeta SA9e. Principalmente se debe a que contiene mayor número de capas de vidrio. Por otro lado, los resultados de la resistencia a la tensión se vieron afectados por la influencia del agarre debido a que las láminas de vidrio se barrieron al realizarse la prueba. Por tal motivo, el laminado que contiene menor número de capas de vidrio en la parte exterior no exhibió resultados confiables y su esfuerzo a tensión fue menor respecto al laminado que cuenta con mayor cantidad de capas de vidrio.

Para poder solucionar el problema de la sujeción se probaron diversos tipos de talones como se puede ver en la Figura 47 (lija, aluminio y talones del mismo material compuesto). Desafortunadamente los resultados no fueron los que se esperaban ya que las probetas a cierto nivel de carga se resbalaban sin lograr obtener el esfuerzo último y llegar a su punto de fractura.



Figura 47. Pruebas de diversos talones para mejorar la sujeción.

Debido a la complejidad del problema de la sujeción de las probetas, únicamente se logró obtener los módulos de elasticidad de cada configuración por medio de la experimentación. La fuerza que cada probeta soportó antes de resbalar fue suficiente para poder encontrar los módulos de elasticidad de cada una de ellas con ayuda del extensómetro. En la Figura 48 se muestran los valores que obtuvieron los 15 laminados híbridos correspondientes a su módulo de elasticidad.

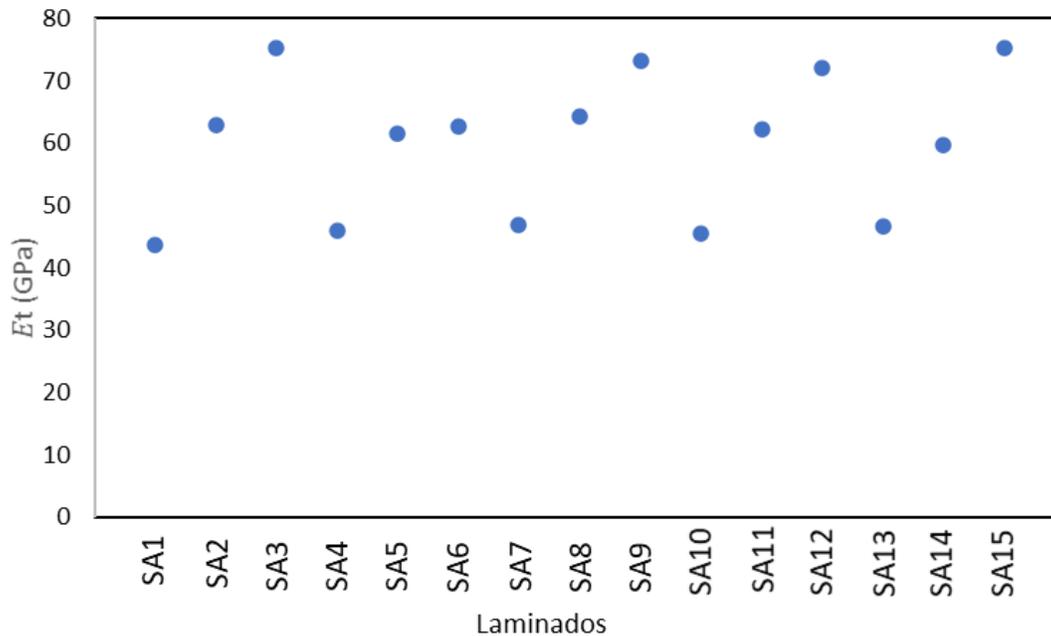


Figura 48. Módulos de elasticidad a tensión de cada configuración estudiada.

Haciendo un análisis de los resultados encontrados respecto a los módulos de elasticidad, conforme fue aumentando el porcentaje de hibridación (cantidad de refuerzo de carbono en el laminado híbrido), el módulo de elasticidad lo hizo de igual forma. Esencialmente, se debe a la resistencia que otorgan las láminas de carbono. El módulo del laminado SA6 no se ve influenciado por el número de capas de carbono en comparación con los laminados SA3, SA9, SA12 y SA15 (se le atribuye a los posibles errores causados por la manufactura, el proceso de obtención de las probetas o el extensómetro, además fue el laminado con el cual se probaron tres distintos agarres que fueron: sin talón, talón de lija y talón de aluminio. Por lo tanto, los resultados no siguieron la tendencia de los laminados con el mismo porcentaje de hibridación). Respecto a la secuencia de apilado del material, se observó que no tiene algún impacto significativo en el módulo ya que se ven más influenciados por el porcentaje de hibridación.

Otro análisis para encontrar los módulos de elasticidad a tensión es de manera teórica mediante la teoría clásica de laminados. Los datos experimentales de los módulos de elasticidad  $E_t$  presentados en la Tabla 12 fueron usados como datos de entrada para predecir los módulos de elasticidad de los laminados presentados en este estudio. La comparación entre los valores experimentales y teóricos calculados a través de la CLT son presentados en la Figura 49. Los módulos de elasticidad estimados con la CLT tienen una diferencia porcentual promedio de 2.755% en comparación con los valores obtenidos experimentalmente. Los resultados demuestran que la CLT puede estimar de manera favorable los módulos de elasticidad a tensión considerando distintos porcentajes de hibridación. Por lo tanto, al hacer uso de esta teoría se logró aproximar los valores obtenidos con los valores experimentales.

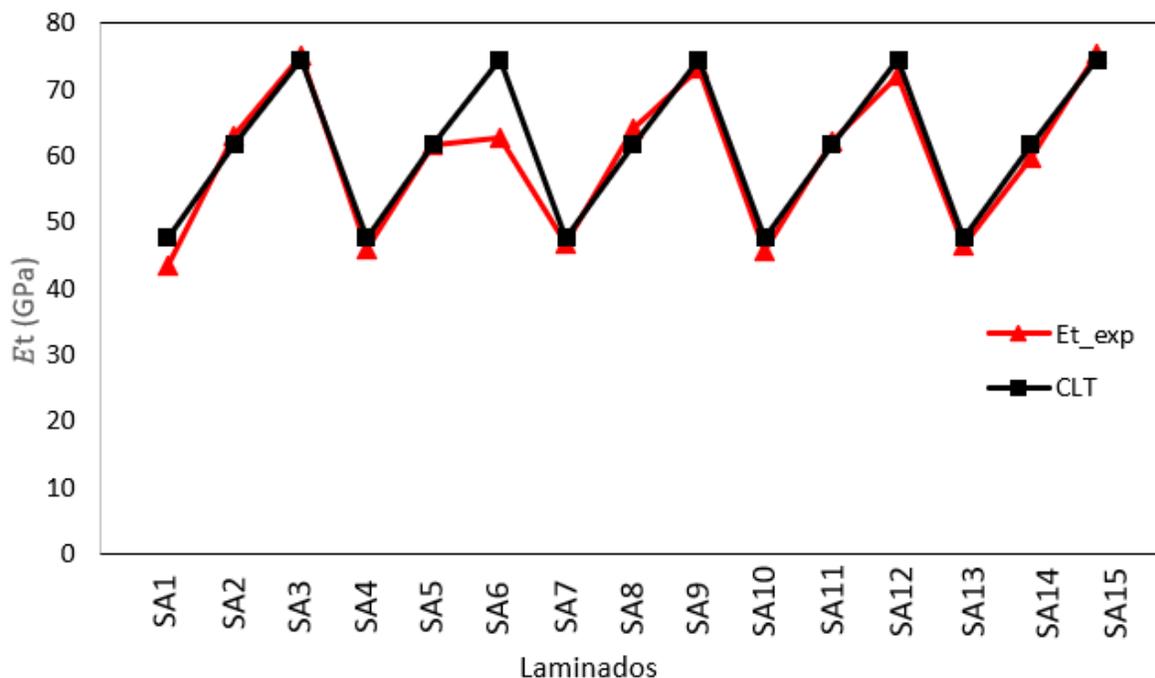


Figura 49. Comparación de los módulos elásticos a tensión experimentales y los obtenidos por la CLT.

Como se observa en la Figura 49, la CLT tiene una buena estimación respecto a los valores experimentales por lo que es una buena herramienta para analizar laminados unidireccionales a tensión. La secuencia de apilado del material no representa influencia alguna en los valores obtenidos por la CLT. Es importante mencionar que la CLT tiene una mejor estimación a tensión que a flexión. Fundamentalmente, se debe a que a flexión existen más

desplazamientos que no son considerados por la teoría. En la Tabla 12 se muestran los valores experimentales y teóricos, así como el porcentaje de diferencia entre un valor y otro.

Tabla 12. Módulos de elasticidad a tensión, experimentales vs teóricos.

<b>Tensión</b>			
<b>Laminados</b>	$E_t$ (GPa)	CLT (GPa)	Diferencia%
<b>SA1</b>	43.57	47.70	9.46
<b>SA2</b>	62.92	61.78	1.82
<b>SA3</b>	75.24	74.48	1.01
<b>SA4</b>	46.05	47.70	3.58
<b>SA5</b>	61.60	61.78	0.29
<b>SA6</b>	62.71	74.48	18.78
<b>SA7</b>	46.79	47.70	1.95
<b>SA8</b>	64.24	61.78	3.84
<b>SA9</b>	73.16	74.48	1.80
<b>SA10</b>	45.60	47.70	4.61
<b>SA11</b>	62.28	61.78	0.81
<b>SA12</b>	71.97	74.48	3.48
<b>SA13</b>	46.60	47.70	2.35
<b>SA14</b>	59.59	61.78	3.67
<b>SA15</b>	75.36	74.48	1.17
<b>SAV</b>	32.01	32.01	0
<b>SAC</b>	96.48	96.48	0

## 5.2 Ensayos de flexión

De cada laminado se obtuvieron cinco probetas representativas. Los ensayos de flexión de tres puntos se llevaron a cabo en la máquina universal de ensayos Shimadzu AG-X plus 100kN a una velocidad de prueba de 1 mm/min (el tiempo por probeta es de 20 a 30 minutos). En la nariz de carga y los puntos de apoyo se utilizaron rodillos de 5mm de diámetro. También, una relación de 32 se utilizó entre la longitud de apoyos y el espesor, por lo cual

las distancias entre los apoyos son distintas para cada configuración. Como antes se mencionó, se ensayaron cinco probetas por laminado, después de haber ensayado las 17 configuraciones propuestas, se procedió a obtener acorde con la norma ASTM D7264 el registro de la resistencia a la flexión, el porcentaje de elongación, los módulos de elasticidad y las fracciones de volumen. En la Figura 50 se observa una probeta ensayada por medio de flexión de tres puntos.

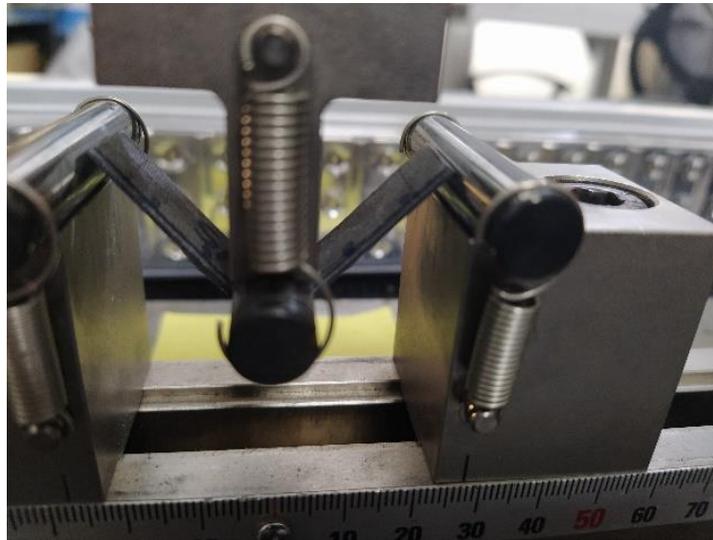


Figura 50. Flexión de tres puntos.

En la Tabla 13 se presentan los valores promedio de todas las configuraciones realizadas en esta investigación. Cada una de ellas presenta distintos valores, si bien el porcentaje de hibridación es la misma en algunas, la secuencia de apilado del material varía y provoca que cada configuración adopte distintas propiedades.

El laminado de referencia SAV correspondiente al laminado de fibra de vidrio, exhibió una resistencia a la flexión máxima de 816.920 MPa, un módulo de elasticidad de 64.807 GPa y un porcentaje de elongación de 2.444%. Por otro lado, el segundo laminado de referencia SAC correspondiente al laminado de fibra de carbono, exhibió una resistencia a la flexión de 976.570 MPa, un módulo de elasticidad de 158.851 GPa y un porcentaje de elongación de 1.129%. Como era de esperarse, el laminado de carbono exhibió una mejor resistencia a la flexión y un menor porcentaje de elongación respecto al laminado de vidrio, lo cual se debe a las propiedades individuales de cada tipo de fibra, en la Figura 51 se puede apreciar el diagrama esfuerzo-elongación de los laminados de referencia (se muestra promedio punto por punto de las cinco probetas representativas del laminado).

Tabla 13. Propiedades de las configuraciones de estudio.

Propiedades a flexión de los laminados de estudio					
Laminados	$E_f$ (Gpa)	$\sigma_{uf}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$v_f$ (%)	
SA1	114.243	784.419	1.598	0.37	$v_{fc}=28.41$ $v_{fv}=71.59$
SA2	138.699	941.086	1.322	0.40	$v_{fc}=51.41$ $v_{fv}=48.59$
SA3	169.277	999.635	1.126	0.46	$v_{fc}=70.42$ $v_{fv}=29.58$
SA4	93.705	801.741	1.635	0.40	$v_{fc}=28.41$ $v_{fv}=71.59$
SA5	112.551	949.900	1.432	0.44	$v_{fc}=51.41$ $v_{fv}=48.59$
SA6	102.513	1003.623	1.816	0.41	$v_{fc}=70.42$ $v_{fv}=29.58$
SA7	76.958	910.059	2.147	0.39	$v_{fc}=28.41$ $v_{fv}=71.59$
SA8	79.255	766.956	1.970	0.43	$v_{fc}=51.41$ $v_{fv}=48.59$
SA9	91.471	1076.580	2.229	0.43	$v_{fc}=70.42$ $v_{fv}=29.58$
SA10	69.120	812.955	2.346	0.40	$v_{fc}=28.41$ $v_{fv}=71.59$
SA11	72.621	863.952	2.331	0.46	$v_{fc}=51.41$ $v_{fv}=48.59$
SA12	125.759	770.915	1.258	0.43	$v_{fc}=70.42$ $v_{fv}=29.58$
SA13	60.793	792.197	2.361	0.42	$v_{fc}=28.41$ $v_{fv}=71.59$
SA14	125.305	833.536	1.375	0.42	$v_{fc}=51.41$ $v_{fv}=48.59$
SA15	122.183	837.358	1.500	0.46	$v_{fc}=70.42$ $v_{fv}=29.58$
SAV	64.807	816.920	2.444	0.41	$v_{fc}=0$ $v_{fv}=100$
SAC	158.852	976.570	1.130	0.49	$v_{fc}=100$ $v_{fv}=0$

$v_f$  – Fracción de volumen de fibras.

$v_{fc}$  – Fracción de volumen de fibras de carbono.

$v_{fv}$  – Fracción de volumen de fibras de vidrio.

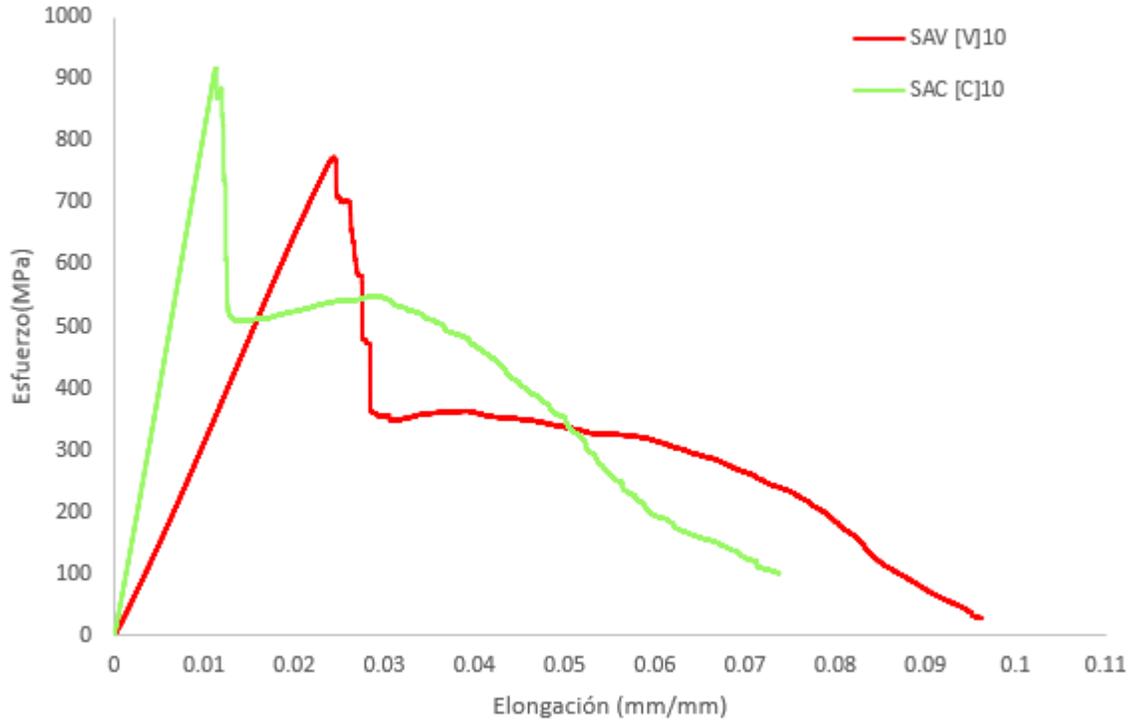


Figura 51. Curvas esfuerzo- elongación a flexión entre los laminados de referencia SAV y SAC.

Los valores de los laminados con distintas secuencias de apilado y porcentajes de hibridación, son analizados con los valores que obtuvieron los laminados de referencia (carbón y vidrio), lo cual permite cuantificar qué tanto mejoran o disminuyen las propiedades respecto a laminados de referencia. Para poder apreciar el efecto de la secuencia de apilado y la hibridación, se organizaron bloques de cinco, los cuales tienen el mismo porcentaje de hibridación, pero con distinta secuencia de apilado del material. En las Tablas 14, 15 y 16 se muestra la distribución de cada configuración ordenadas de acuerdo con su porcentaje de hibridación.

Tabla 14. Laminados con 20% de hibridación.

Laminado	Secuencia de Apilado del material	$\sigma_{uf}$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$\epsilon$ (%)
SA1	$[C/V/V/V/V]_s$	784.419	114.243	1.598
SA4	$[V/C/V/V/V]_s$	801.741	93.707	1.635
SA7	$[V/V/C/V/V]_s$	910.059	76.958	2.147
SA10	$[V/V/V/C/V]_s$	812.955	69.120	2.346
SA13	$[V/V/V/V/C]_s$	792.197	60.793	2.361
SAV	$[V]_{10}$	816.920	64.807	2.444
SAC	$[C]_{10}$	976.570	158.852	1.130

Tabla 15. Laminados con 40% de hibridación.

Laminado	Secuencia de Apilado del material	$\sigma_{uf}$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$\varepsilon$ (%)
SA2	$[C / C / V / V / V]_s$	941.086	138.699	1.322
SA5	$[V / C / C / V / V]_s$	949.900	112.551	1.432
SA8	$[V / V / C / C / V]_s$	766.956	79.255	1.970
SA11	$[V / V / V / C / C]_s$	863.952	72.621	2.331
SA14	$[C / V / C / V / V]_s$	833.536	125.305	1.375
SAV	$[V]_{10}$	816.920	64.807	2.444
SAC	$[C]_{10}$	976.570	158.852	1.130

Tabla 16. Laminados con 60% de hibridación.

Laminado	Secuencia de Apilado del material	$\sigma_{uf}$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$\varepsilon$ (%)
SA3	$[C / C / C / V / V]_s$	999.635	169.277	1.126
SA6	$[V / C / C / C / V]_s$	1003.623	102.513	1.816
SA9	$[V / V / C / C / C]_s$	1076.580	91.471	2.229
SA12	$[C / V / C / V / C]_s$	770.915	125.759	1.258
SA15	$[C / V / V / C / C]_s$	837.358	122.183	1.500
SAV	$[V]_{10}$	816.920	64.807	2.444
SAC	$[C]_{10}$	976.570	158.852	1.130

Conforme a los datos observados en la Tabla 14, el laminado SA7 presentó una mayor resistencia a la flexión respecto a los laminados SA1, SA4, SA10 y SA13. También, combina mejor la resistencia que ofrecen las capas de carbono con las capas de vidrio. Por lo tanto, la secuencia de apilado del material  $[V / V / C / V / V]_s$  que contiene seis capas de vidrio en el plano medio es la que resulta de mejor elección cuando se elige una hibridación del 20%. En la Figura 52 se puede notar cómo influye la secuencia de apilado del material en las propiedades mecánicas, al ir variando la colocación de las capas, las propiedades cambian con un mismo porcentaje de hibridación. Sin embargo, no siempre el efecto de la hibridación es positivo, un ejemplo se puede ver con el laminado SA13, el cual, al compararlo con el laminado de referencia SAV, tiene un comportamiento mecánico similar, pero la resistencia a la flexión es menor. Además, las fibras de carbono al ser dos capas, su efecto no es significativo en la resistencia por lo que podrían ser descartadas para la configuración SA13.

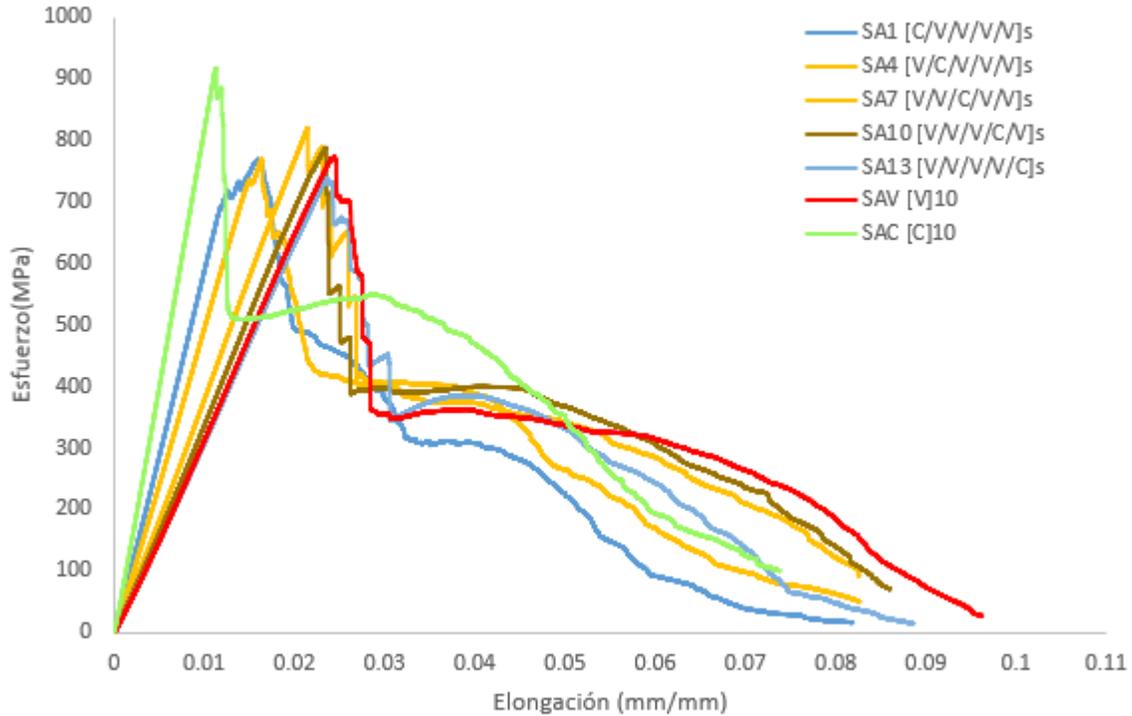


Figura 52. Curvas esfuerzo-elongación de laminados a flexión con una hibridación de 20% y laminados de referencia.

Por otra parte, con una hibridación del 40% (ver Tabla 15), el laminado SA2  $[C / C / V / V / V]_s$  fue el que presentó una resistencia máxima a flexión con 941.086 MPa superando a los laminados SA5, SA8, SA11 y SA14. Sin embargo, el efecto de las fibras de vidrio no tiene mucho impacto en el módulo de elasticidad del laminado porque su elongación es similar a la del laminado de SAC. Si bien la resistencia a la flexión del laminado SA2 se acerca a la del laminado de referencia SAC, el módulo de elasticidad no resulta ser bueno en comparación con el laminado SAV. Por otra parte, buscando un material que mejor asocie las propiedades mecánicas de los laminados de referencia SAV y SAC, el laminado SA11  $[V/V / V / C / C]_s$  es el de mejor desempeño con una resistencia a la flexión de 863.951 MPa y un módulo de elasticidad de 72.621 GPa. Sus valores de resistencia y módulo de elasticidad son los que más se aproximan a los valores de SAV y SAC. Por lo tanto, la secuencia de apilado del material para el laminado SA11 que contiene cuatro capas de fibra de carbono en el plano medio, es la que puede ser recomendable utilizar con una hibridación del 40%. El efecto híbrido es positivo en las configuraciones SA2, SA5, SA11 y SA14, excepto con la secuencia de apilado del material para el laminado SA8, la cual exhibió una resistencia baja en comparación con los laminados antes mencionados. En la Figura 53

se puede apreciar el cambio de las propiedades mecánicas al ir variando la secuencia de apilado del material con una hibridación del 40%.

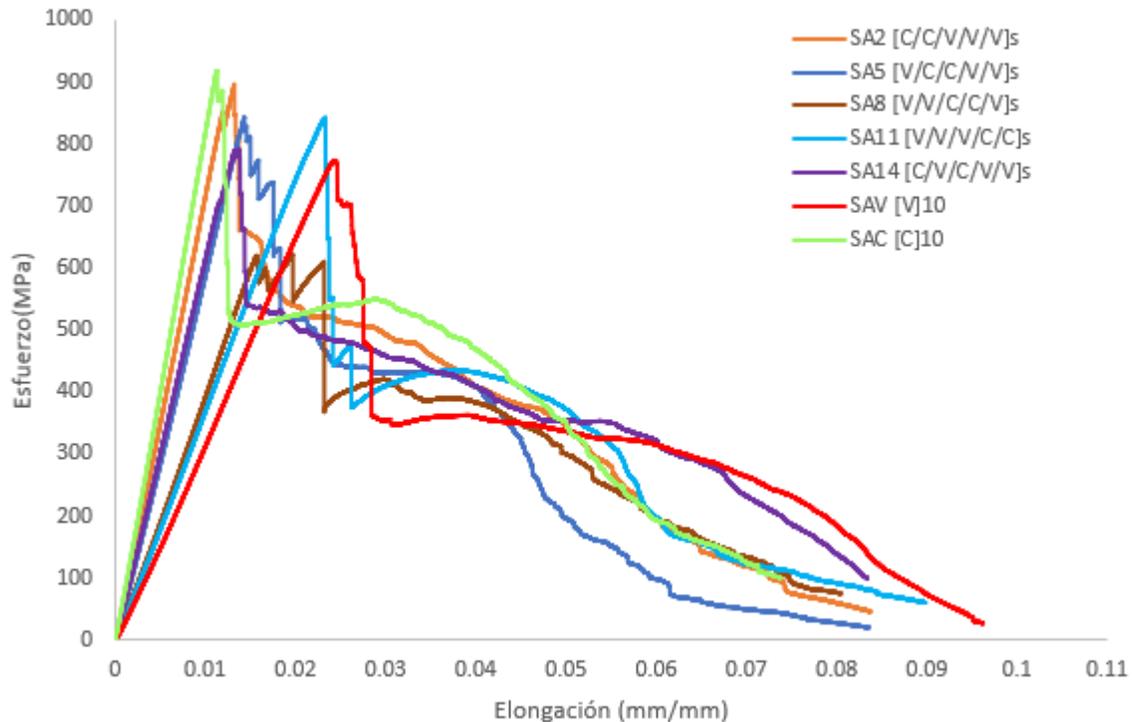


Figura 53. Curvas esfuerzo-elongación de laminados a flexión con una hibridación de 40% y laminados de referencia.

Finalmente se analizaron las configuraciones con una de hibridación del 60%. En el bloque de laminados presentados en la Tabla 16, el laminado que presentó una mejor resistencia a la flexión es el SA9  $[V/V / C / C / C]_5$  con un valor de 1076.580 MPa en comparación con los laminados SA3, SA6, SA12 y SA15. Es importante señalar que la configuración SA9 exhibió un valor de resistencia mayor que el laminado de referencia SAC (laminado de fibras de carbono) y un valor cercano de al módulo de elasticidad al laminado de referencia SAV (laminado de fibras de vidrio). Por lo tanto, el laminado SA9 que contiene seis capas de carbono en el plano medio es el de mejor desempeño cuando se tiene una hibridación del 60%. También, se observó que el laminado SA9 sigue la misma tendencia del laminado SA11, el cual presentó mejores valores con una hibridación del 40% y concentra las capas de carbono en el plano medio. Por otro lado, las configuraciones SA3 y SA6 también presentan buenas propiedades, por ejemplo, el laminado SA3 tiene valores muy parecidos, inclusive mejores que el laminado de carbono SAC. Igualmente, la resistencia a la flexión del laminado SA6 es superior a la del laminado SAC y combina de buena manera el efecto

de las fibras de vidrio para tener una elongación aceptable (ver Figura 54). De modo que, se podrían utilizar estas configuraciones para suplir fibras de carbono y ahorrar costos, ya que la fibra de vidrio es en promedio 2.5 más barata que la fibra de carbono. Es importante mencionar que la superioridad que ofrecen los laminados SA6 y SA9 respecto a la resistencia última a flexión del laminado SAC puede deberse a lo mencionado por Dong *et al* [60] y se puede explicar de la siguiente manera: cuando existen cantidades pequeñas de capas de fibra de vidrio (domina la cantidad de capas de fibra de carbono en el laminado), se colocan en lado exterior del material, del lado compresivo, donde se produce el máximo esfuerzo a compresión. Por otro lado, cuando existe mayor cantidad de capas de fibra de vidrio (domina la cantidad de capas de fibra de vidrio en el laminado), se colocan en el eje neutro, porque en esa zona se produce la reducción del esfuerzo a compresión, de modo que no es considerable. Cabe resaltar que las conclusiones presentadas por Dong *et al* [60] se obtuvieron de analizar laminados no simétricos, por lo que el fenómeno antes mencionado no se puede generalizar para los laminados simétricos de esta investigación.

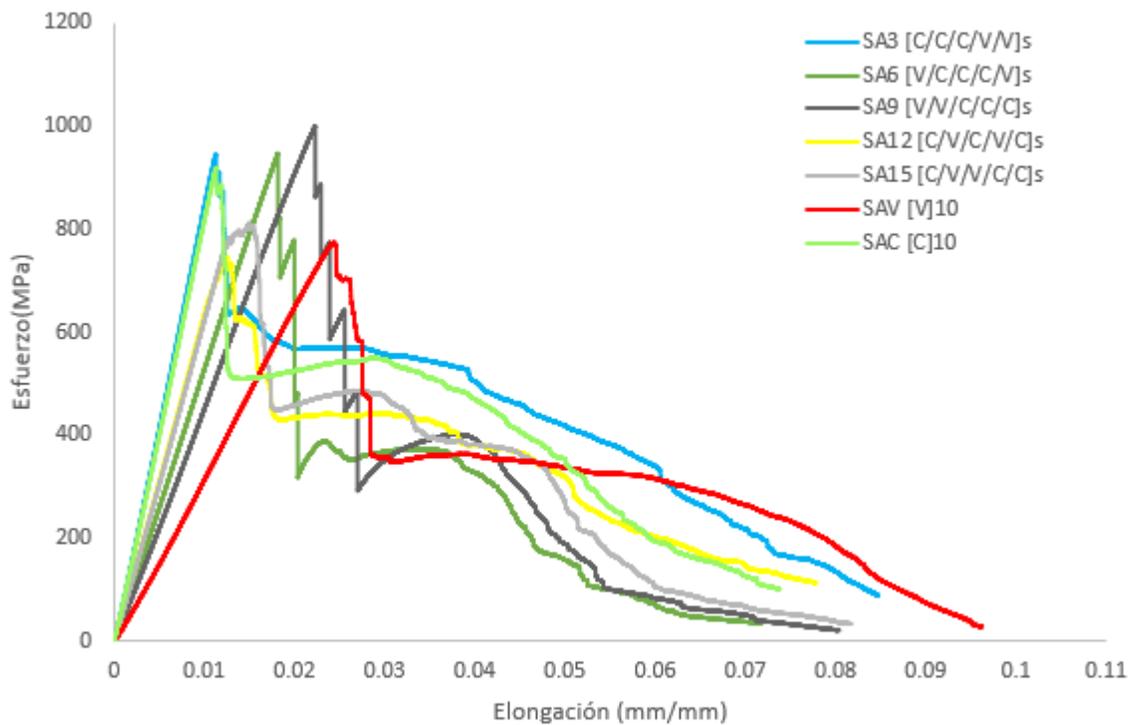


Figura 54. Curvas esfuerzo- elongación de laminados a flexión con una hibridación de 60% y laminados de referencia.

Los módulos a flexión obtenidos experimentalmente pueden ser comparados con la CLT de la misma forma que se hizo con los módulos a tensión. Como se puede ver en la Figura 55,

los módulos de flexión teóricos calculados a través de la CLT siguen la misma tendencia de los valores experimentales, por lo que la CLT fue capaz de considerar los efectos de la secuencia de apilado e hibridación. Sin embargo, los módulos experimentales y teóricos están dispersos. Este comportamiento puede atribuirse a los esfuerzos cortantes que existen en las probetas, lo que provoca desplazamientos adicionales y por lo tanto los resultados finales de los módulos de elasticidad a flexión sean más bajos. Para relaciones bajas de *span to depth* y materiales con módulos de elasticidad altos, los esfuerzos cortantes son más significativos [29], lo cual ocasiona que los resultados experimentales de los módulos de elasticidad cada vez se alejen más de los estimados.

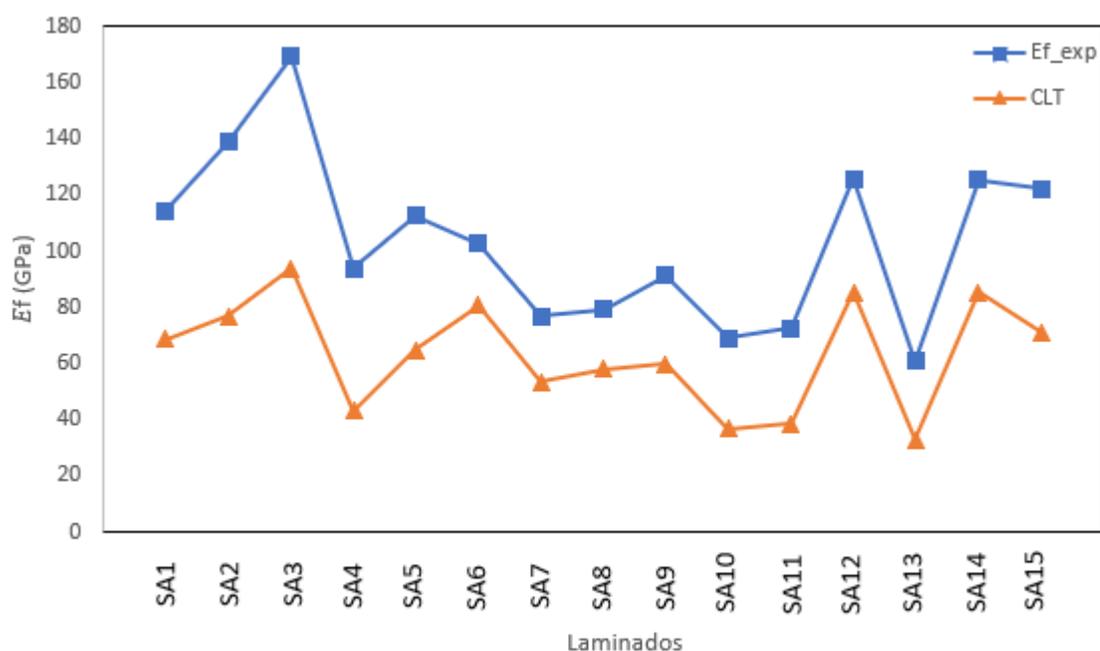


Figura 55. Comparación de los módulos elásticos a flexión experimentales y los obtenidos por la CLT.

### 5.3 Efecto híbrido a flexión

En las Tablas 17, 18 y 19 se muestran los resultados del efecto híbrido calculado como un porcentaje de incremento o decremento de la elongación, módulo de elasticidad y resistencia de los laminados híbridos de esta investigación en relación con el laminado de referencia SAC. Por otro lado, el volumen de las fibras de carbono en el laminado híbrido se calcula a través de la fracción de volumen híbrida en el laminado (ver Tabla 13).

Tabla 17. Resultados del efecto híbrido con respecto al laminado de carbono con una hibridación del 20%.

Laminado	Secuencia de apilado del material	Efecto híbrido en elongación ( $EF_{\varepsilon}$ ), (%)	Efecto híbrido en el Módulo de Elasticidad ( $EF_E$ ), (%)	Efecto híbrido en el Vol. Fibras de carbono ( $EF_{V_{fc}}$ ) (%)	Efecto híbrido en la Resistencia última a flexión ( $EF_{\sigma_{uf}}$ ), (%)
SA1	$[C / V / V / V / V]_s$	141.511	71.918	21.898	80.324
SA4	$[V / C / V / V / V]_s$	144.762	58.990	23.425	82.098
SA7	$[V / V / C / V / V]_s$	190.061	48.446	22.412	93.189
SA10	$[V / V / V / C / V]_s$	207.727	43.512	22.986	83.246
SA13	$[V / V / V / V / C]_s$	208.974	38.270	24.534	81.120
SAC	$[C]_{10}$	100%=1.13 0%	100%=158. 852 GPa	100%	100%=976.570 MPa

Tabla 18. Resultados del efecto híbrido con respecto al laminado de carbono con una hibridación del 40%.

Laminado	Secuencia de apilado del material	Efecto híbrido en elongación ( $EF_{\varepsilon}$ ), (%)	Efecto híbrido en el Módulo de Elasticidad ( $EF_E$ ), (%)	Efecto híbrido en el Vol. Fibras de carbono ( $EF_{V_{fc}}$ ) (%)	Efecto híbrido en la Resistencia última a flexión ( $EF_{\sigma_{uf}}$ ), (%)
SA2	$[C / C / V / V / V]_s$	117.006	87.313	42.258	96.366
SA5	$[V / C / C / V / V]_s$	126.818	70.853	46.712	97.269
SA8	$[V / V / C / C / V]_s$	174.381	49.893	45.503	78.535
SA11	$[V / V / V / C / C]_s$	206.379	45.716	48.583	88.468
SA14	$[C / V / C / V / V]_s$	121.688	78.882	44.461	85.353
SAC	$[C]_{10}$	100%=1.13 0%	100%=158. 852 GPa	100%	100%=976.570 MPa

Tabla 19. Resultados del efecto híbrido con respecto al laminado de carbono con una hibridación del 60%.

Laminado	Secuencia de apilado del material	Efecto híbrido en elongación ( $EF_{\varepsilon}$ ), (%)	Efecto híbrido en el Módulo de Elasticidad ( $EF_E$ ), (%)	Efecto híbrido en el Vol. Fibras de carbono ( $EF_{V_{fc}}$ ) (%)	Efecto híbrido en la Resistencia última a flexión ( $EF_{\sigma_{uf}}$ ), (%)
SA3	$[C / C / C / V / V]_s$	99.669	106.563	66.879	102.361
SA6	$[V / C / C / C / V]_s$	160.802	64.534	59.05	102.770
SA9	$[V / V / C / C / C]_s$	197.349	57.582	62.588	110.241
SA12	$[C / V / C / V / C]_s$	111.395	79.167	61.395	78.941
SA15	$[C / V / V / C / C]_s$	132.763	76.916	66.54	85.745
SAC	$[C]_{10}$	100%=1.13 0%	100%=158. 852 GPa	100%	100%=976.570 MPa

Como se puede observar en la Figura 56, la elongación en todas las configuraciones con un 20% de hibridación tiene un aumento superior al laminado SAC. Al contener más capas de fibra de vidrio, las propiedades de éstas dominan el compuesto híbrido. Por lo tanto, el efecto híbrido genera el decremento (en relación con el laminado de referencia de fibras de carbono) del módulo de elasticidad a flexión ( $E_f$ ), la resistencia última a flexión ( $\sigma_{uf}$ ) y el volumen de fibras de carbono ( $V_{fc}$ ). El laminado SA7  $[V / V / C / V / V]_5$  es el que destaca en esta hibridación, obtuvo una elongación de 190% y una resistencia última a flexión de 93% en comparación con el laminado de referencia SAC. Por tal motivo, fue el de mejor desempeño las propiedades de los laminados de referencia.

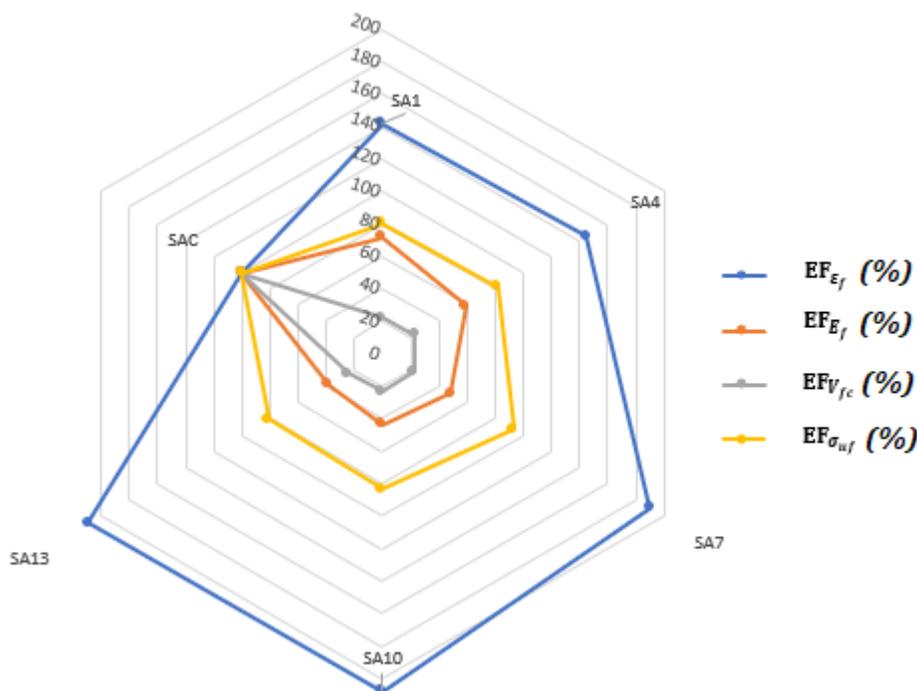


Figura 56. Porcentaje del efecto híbrido en relación al laminado SAC (20% de hibridación).

En la Figura 57 se logra ver que con un 40% de hibridación, el efecto híbrido incrementa la elongación de todas las configuraciones. Por otro lado, la resistencia a última a flexión disminuye para algunas configuraciones, por lo que el efecto híbrido se considera negativo. Sin embargo, la diferencia entre la resistencia última del laminado SAC y los laminados híbridos no supera el 16%. En esta hibridación destaca el laminado SA11  $[V / V / V / C / C]_5$ , el cual exhibió una elongación de 206.379%, el módulo de elasticidad es del 45.716% y la resistencia última es de 88.46% (todo esto en comparación con el

laminado SAC). Estas propiedades se lograron con la disminución del uso de fibras de carbono.

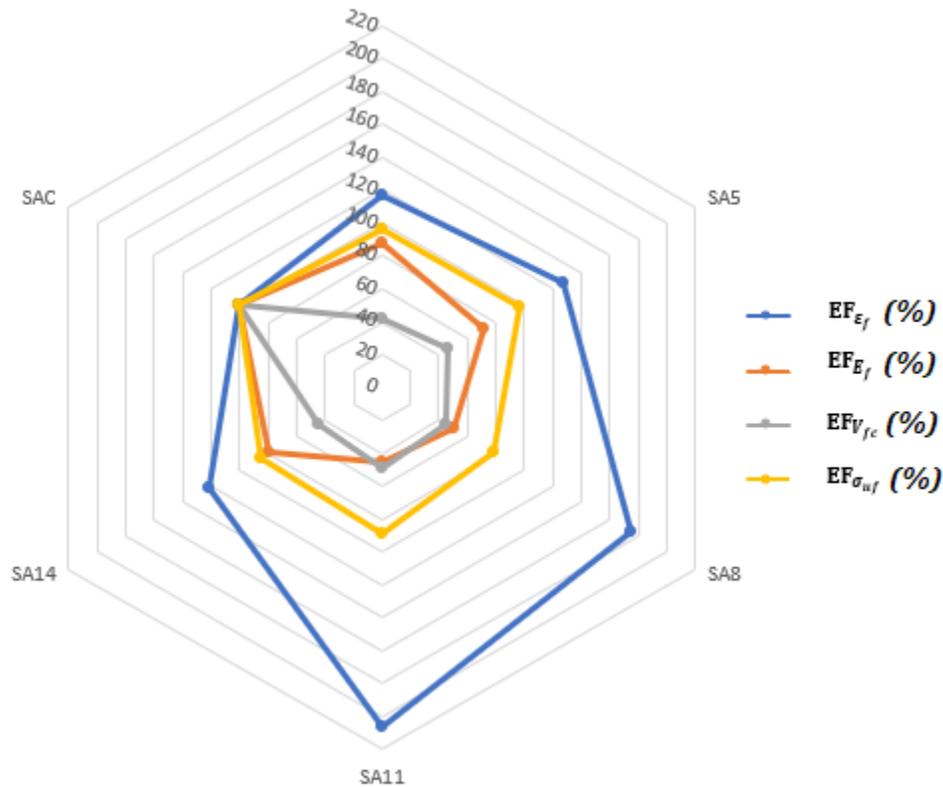


Figura 57. Porcentaje del efecto híbrido en relación al laminado SAC (40% de hibridación).

Por último, se analizó el efecto híbrido con el 60% de hibridación (ver Figura 58). Tres de las cinco configuraciones superan la resistencia a flexión que es algo muy significativo. El efecto híbrido es mejor en el laminado SA9  $[V / V / C / C / C]_s$  ya que tiene un mejor balance de propiedades, el módulo de elasticidad disminuye el 42.417% y la resistencia última a flexión es superior a al laminado de referencia SAC en un 10.24%. La hibridación del 60% de capas de fibra de carbono es el bloque donde se encuentran mejores resultados de esfuerzo último, módulo de elasticidad y elongación respecto a los bloques con 20% y 40% de hibridación.

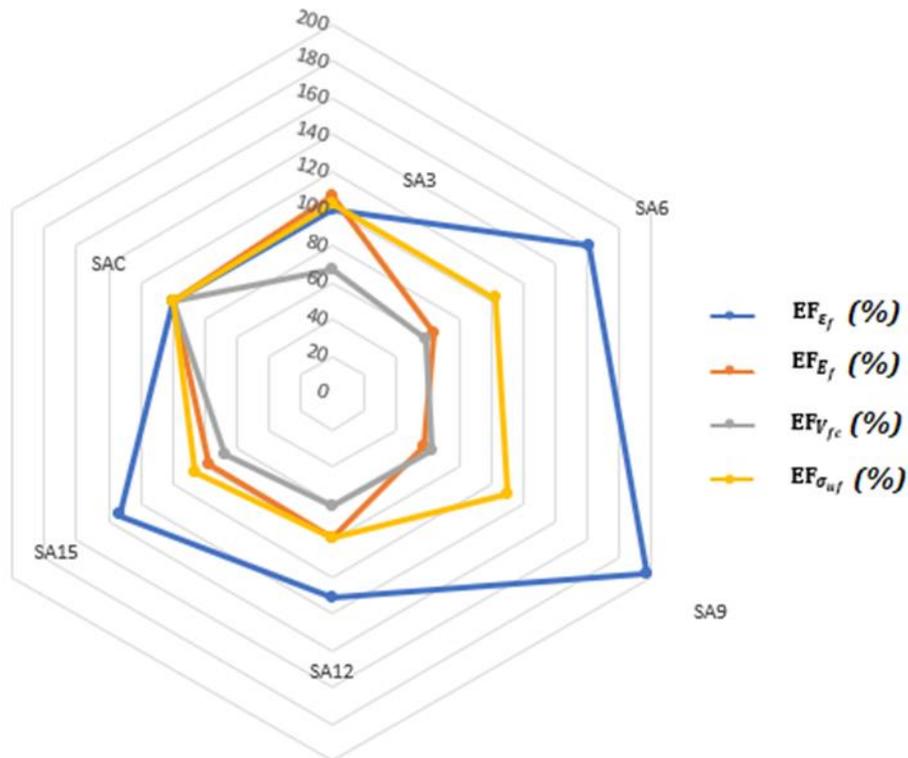


Figura 58. Porcentaje del efecto híbrido en relación al laminado SAC (60% de hibridación).

A partir de lo observado, se proponen las siguientes recomendaciones por zonas para obtener los laminados con mejor desempeño en lo que respecta al módulo de elasticidad a flexión y la resistencia a flexión. Se estableció una banda de mejor balance de propiedades mecánicas que es la misma en los tres bloques de hibridación, la cual se eligió de acuerdo a los laminados que obtienen una buena combinación de propiedades que ofrecen los laminados de carbono y vidrio. En las Figuras 59, 60 y 61 se ilustra la banda que se estableció tomando como referencia el laminado SAC.

La banda de mejor balance de propiedades mecánicas se ubica entre el 140% y 160% de elongación. Es importante mencionar que en lo que respecta a la elongación, la zona mínima es de 140%. Sin embargo, la zona máxima no se limita al 160% ya que como se observa en la Figura 59, los laminados SA7 y SA13 superan el 160% de elongación. Por lo que esta zona se considera como el porcentaje mínimo aceptable de elongación.

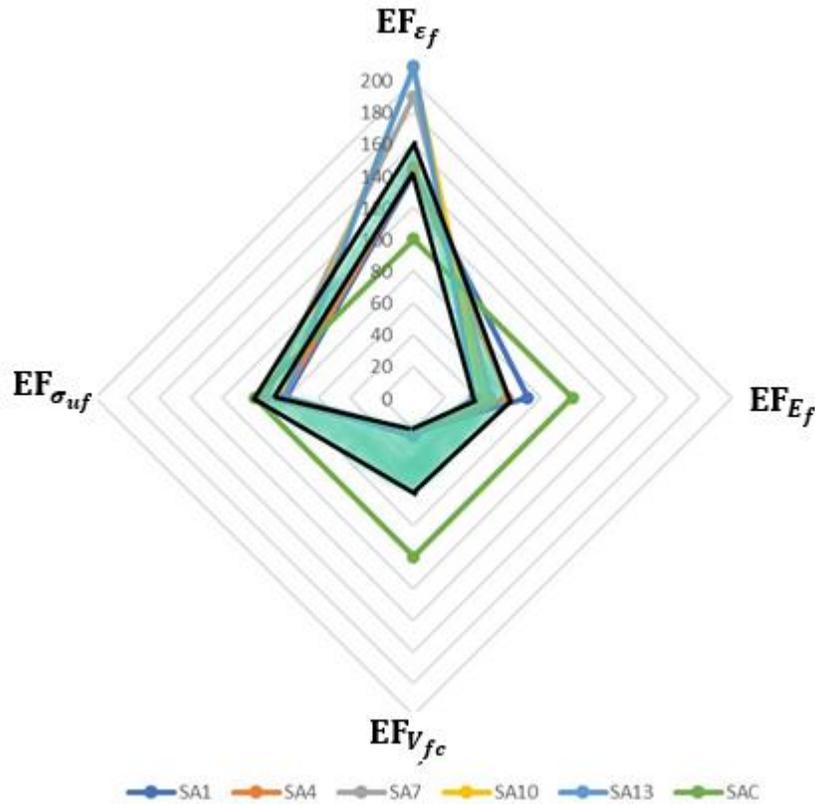


Figura 59. Banda de mejor balance de propiedades mecánicas a flexión para el 20% de hibridación.

En lo que respecta al módulo de elasticidad a flexión, la banda se ubica entre 40% y 60%. El rango se eligió considerando que, el decremento del módulo de elasticidad (tomando como referencia  $E_f$  máximo al laminado SAC) se considera mejor ya que las fibras de vidrio causan que el módulo de elasticidad del laminado híbrido disminuya. Por tal motivo, el 60% de  $E_f$  se considera como el valor mínimo considerable para tener un buen efecto híbrido ya que, si está por encima de este valor, el módulo de elasticidad a flexión del laminado sería más parecida a la del laminado SAC y se despreciaría el uso de las fibras de vidrio. En la Figura 60 se muestran los laminados híbridos que tienen cuatro capas de fibra de carbono, lo cual implica que el módulo de elasticidad a flexión aumente en comparación con los laminados de la Figura 59 y causa que tres de los cinco laminados superen los valores dentro de la banda. Los laminados SA8  $[V / V / C / C / V]_5$  y SA11  $[V / V / V / C / C]_5$  que se encuentran dentro de la banda, muestran el efecto que tiene la secuencia de apilado del material ya que debido a que las capas de vidrio protegen a las capas de carbono, el módulo de elasticidad disminuye en comparación con el módulo de elasticidad de SAC. Este efecto no sucede en

los laminados SA2 y SA14 porque en el exterior tienen capas de carbono. El laminado SA5 solo contiene una capa de vidrio y su efecto es menos significativo en comparación con los laminados que tienen más de una capa de vidrio.

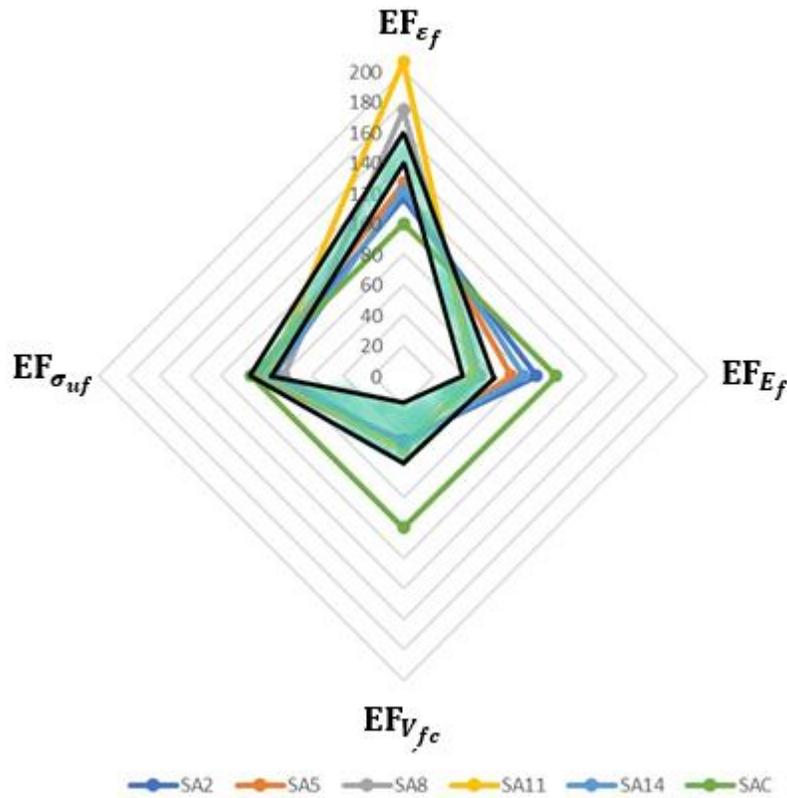


Figura 60. Banda de mejor balance de propiedades mecánicas a flexión para el 40% de hibridación.

Para el caso del porcentaje de volumen de fibra de carbono ( $\%V_{fc}$ ) se consideró una zona entre el 20% y 60% porque es el rango de porcentaje de hibridación que se trabajó en este estudio y el uso de capas de carbono disminuyó en todos los laminados híbridos. Por otro lado, para el esfuerzo último a flexión ( $\sigma_{uf}$ ) la banda se ubicó entre 90% y 100% debido a que entre más se acerquen los valores de  $\sigma_{uf}$  de los laminados híbridos al  $\sigma_{uf}$  del laminado de referencia SAC, será mejor, ya que se usará menor cantidad de fibra de carbono. En el estudio realizado, los laminados con 60% de hibridación fueron los que otorgaron mejores valores de  $\sigma_{uf}$  (ver Figura 61) en comparación con los bloques de 20% y 40% de hibridación, se debe principalmente a que contienen mayor cantidad de capas de carbono. Los laminados SA6  $[V/C/C/C/V]_s$  y SA9  $[V/V/C/C/C]_s$  son los que superan el  $\sigma_{uf}$  del laminado de referencia SAC y se caracterizan por tener capas de vidrio que protegen a las

capas de carbono, el laminado SA3 [C / C / C / V / V]<sub>s</sub> tiene en el exterior tres capas de vidrio y esto ocasiona que el  $\sigma_{uf}$  también sea alto ya que las capas logran soportar más esfuerzo en comparación con laminados que tengan dos o una capa de carbono. Por otro lado, las configuraciones SA12 y SA13 tienen un valor similar de  $\sigma_{uf}$  a configuraciones que tienen menor porcentaje de fibra de carbono (se debe principalmente a que las capas de carbono están intercaladas) por lo que la secuencia de apilado del material tiene una influencia significativa.

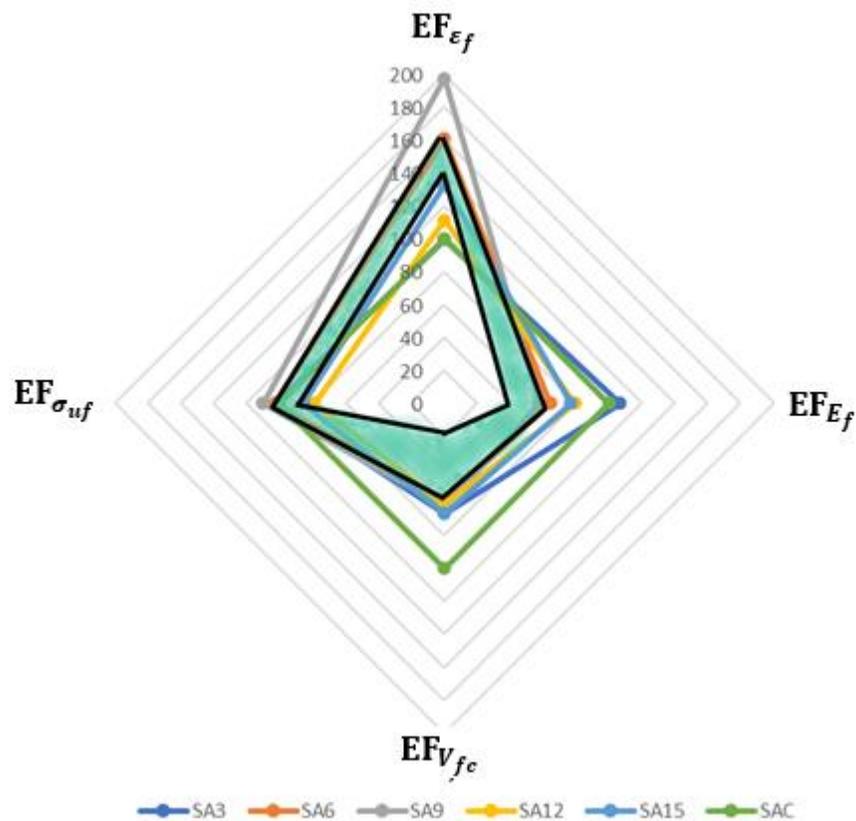


Figura 61. Banda de mejor balance de propiedades mecánicas a flexión para el 60% de hibridación.

En general, de cada bloque de porcentaje de hibridación (20%, 40% y 60%) destacan configuraciones como SA7 para el bloque de 20% de hibridación, SA11 para el bloque de 40% de hibridación y SA9 para el bloque de 60% de hibridación. Por lo tanto, no existe un bloque que supere en todas las propiedades mecánicas estudiadas (elongación, esfuerzo último y módulo de elasticidad) a los demás bloques debido al efecto que tiene la secuencia de apilado del material. Se puede hacer una selección de los mejores laminados híbridos por porcentaje de hibridación que por propiedad mecánica obtienen mejores valores respecto a

los otros laminados híbridos. Por ejemplo, en la elongación, el bloque del 20% de hibridación es el que más tiene laminados en la banda de mejor balance de propiedades mecánicas con cinco configuraciones que superan el 140% de elongación, las cuales son: SA1 con 141.511%, SA4 con 144.762%, SA7 con 190.061%, SA10 con 207.727% y SA13 con 208.974%. También, para el módulo de elasticidad a flexión, el bloque del 20% de hibridación es el que más tiene laminados en la banda de mejor balance de propiedades mecánicas con cuatro configuraciones que son menores al 60% de módulo de elasticidad a flexión, las cuales son: SA4 con 58.990%, SA7 con 48.446%, SA10 con 43.512% y SA13 con 38.270%. Por otro lado, para el caso del esfuerzo último a flexión, el bloque de 60% de hibridación es el que más tiene laminados en la banda de mejor balance de propiedades mecánicas con tres configuraciones que superan el 90% de esfuerzo último a flexión, las cuales son: SA3 con 102.361%, SA6 con 102.770% y SA9 con 110.241%. Lo mencionado anteriormente se puede ver en la Tabla 20.

Tabla 20. Laminados híbridos dentro de la banda de mejor balance de propiedades mecánicas ordenados por bloque del porcentaje de hibridación.

$\varepsilon$ (%) >140%	$E$ (%) <60%	$\sigma_{uf}$ (%) >90%
60% de Hibridación		
SA6	SA9	SA3
SA9	-	SA6
-	-	SA9
40% de Hibridación		
SA8	SA8	SA2
SA11	SA11	SA5
20% de Hibridación		
SA1	SA4	SA7
SA4	SA7	-
SA7	SA10	-
SA10	SA13	-
SA13	-	-

Como se mencionó anteriormente, los laminados híbridos SA7, SA9 y SA11 son los que destacan sobre las demás configuraciones, lo cual se puede observar en la Tabla 20. Los laminados SA7 y SA9 entran dentro de las tres propiedades mecánicas óptimas estudiadas, el laminado SA11 si bien entra en la elongación y el módulo de elasticidad a flexión, se queda

muy cerca del esfuerzo último a flexión con 88.468%. Además, las tres configuraciones se caracterizan por tener capas de vidrio colocadas en la zona exterior del laminado.

A partir de los resultados obtenidos, se dan recomendaciones de los laminados que tienen mejor desempeño en una propiedad sin que las propiedades restantes disminuyan significativamente.

- Para el módulo de elasticidad a flexión, el laminado SA7  $[V / V / C / V / V]_S$  es el que se recomienda utilizar porque tiene un efecto híbrido en el módulo de elasticidad a flexión de 48.446%. Si bien, existen laminados con mejor módulo como los laminados SA10, SA11 y SA13, en lo que respecta al esfuerzo último, el laminado SA11 los supera significativamente. Además, tiene el 20% de hibridación por lo que se ahorra el uso de las capas de carbono en comparación con los otros laminados.
- En lo que respecta a la elongación, el laminado SA11  $[V / V / V / C / C]_S$  es el que se recomienda emplear debido a que tiene un efecto híbrido en la elongación de 206.379%, lo cual lo hace superior a otras configuraciones. Aunque existen laminados como SA10 y SA13 con mejor elongación y mejor módulo de elasticidad a flexión que el laminado SA11, la diferencia no es significativa. Además, el laminado SA11 los supera con casi el 10% en lo que respecta al esfuerzo último.
- Para el esfuerzo último a flexión, el laminado SA9  $[V / V / C / C / C]_S$  es el que se recomienda utilizar ya que tiene un efecto híbrido en el esfuerzo último a flexión de 110.241%, lo cual lo hace superior a los laminados híbridos restantes, inclusive superior al laminado de referencia SAC. Por otro lado, tiene una elongación y un módulo de elasticidad que son aceptables dentro de la banda de mejor balance de propiedades mecánicas. También, se recomienda el uso del laminado SA7 porque sus propiedades no se alejan tanto de las propiedades del laminado SA9. Además, supera en las propiedades estudiadas (módulo de elasticidad, esfuerzo último y elongación) a laminados híbridos que tienen un porcentaje de hibridación mayor, lo cual significa que utiliza menor cantidad de capas de carbono, por lo tanto, su fabricación resultaría más económica.

## 5.4 Modelos fenomenológicos a flexión

De acuerdo a la sección 3.9.5 y a la ecuación 18, a partir de una regresión lineal múltiple se obtienen los coeficientes  $b_0, b_1, \dots, b_n$  los cuales pertenecen al término independiente y a los coeficientes parciales de la regresión en función de las variables: secuencia de apilado del material y porcentaje de hibridación, respectivamente.

Se realizaron dos regresiones lineales múltiples ( $M\sigma_{F1}$  y  $M\sigma_{F2}$ ) para observar el ajuste que toma cada una de ellas con dos formas de representar la secuencia de apilado del material. En la primera regresión  $M\sigma_{F1}$ , se ordenaron los laminados conforme con su resistencia máxima, al laminado con mayor resistencia máxima a flexión se le asignó el valor de uno a su respectiva secuencia de apilado del material. Con estas asignaciones, se obtuvieron los valores de las secuencias de apilado de las 15 configuraciones. En la Tabla 21, se muestra como quedó ordenado cada valor de la secuencia de apilado del material. Los valores de la hibridación (H) que se tomaron para la regresión  $M\sigma_{F1}$  y  $M\sigma_{F2}$  son los mismos, y están en función al porcentaje de hibridación de cada configuración.

Tabla 21. Valor de la secuencia de apilado del material para la regresión  $M\sigma_{F1}$ .

Laminado	$\sigma_{ut}$ (MPa)		SA <sub>1</sub>
SA9	1076.580	[V/V/C/C/C] <sub>s</sub>	1
SA6	1003.623	[V/C/C/C/V] <sub>s</sub>	0.933
SA3	999.634	[C/C/C/V/V] <sub>s</sub>	0.873
SA5	949.899	[V/C/C/V/V] <sub>s</sub>	0.813
SA2	941.086	[C/C/V/V/V] <sub>s</sub>	0.753
SA7	910.059	[V/V/C/V/V] <sub>s</sub>	0.693
SA11	863.951	[V/V/V/C/C] <sub>s</sub>	0.633
SA15	837.358	[C/V/V/C/C] <sub>s</sub>	0.573
SA14	833.536	[C/V/C/V/V] <sub>s</sub>	0.513
SA10	812.955	[V/V/V/C/V] <sub>s</sub>	0.453
SA4	801.741	[V/C/V/V/V] <sub>s</sub>	0.393
SA13	792.197	[V/V/V/V/C] <sub>s</sub>	0.333
SA1	784.418	[C/V/V/V/V] <sub>s</sub>	0.273
SA12	770.915	[C/V/C/V/C] <sub>s</sub>	0.213
SA8	766.956	[V/V/C/C/V] <sub>s</sub>	0.153

Para el caso de la segunda regresión  $M\sigma_{F2}$ , se ordenaron los laminados acordes con su hibridación, es decir 60%, 40% y 20%. De cada grupo, la configuración que exhibió la mejor resistencia máxima a flexión se le asignó el valor de uno a la secuencia de apilado del

material, como cada bloque de hibridación tiene cinco laminados, el valor de uno se dividió entre los cinco laminados. Es decir, los valores de cada bloque según su resistencia máxima a flexión son: 1, 0.8, 0.6, 0.4 y 0.2. Se observó que los valores de la secuencia de apilado del material se pueden relacionar con la colocación de las capas de carbono en el laminado híbrido. Por tal motivo más adelante se proponen recomendaciones de asignación de valores a la secuencia de apilado del material. La Tabla 22 muestra como quedaron asignados los valores para la secuencia de apilado en la regresión  $M\sigma_{F2}$ .

Tabla 22. Valor de la secuencia de apilado del material para la regresión  $M\sigma_{F2}$ .

Hibridación	Laminado	$\sigma_{ut}$ (MPa)	$SA_2$
<b>H=60%</b>	SA3	999.634	0.6
	Sa6	1003.623	0.8
	SA9	1076.580	1
	SA12	770.915	0.2
	SA15	837.358	0.4
<b>H=40%</b>	SA2	941.086	0.8
	SA5	949.899	1
	SA8	766.956	0.2
	SA11	863.951	0.6
	SA14	833.536	0.4
<b>H=20%</b>	SA1	784.418	0.2
	SA4	801.741	0.6
	SA7	910.059	1
	SA10	812.955	0.8
	SA13	792.197	0.4

Una vez asignados los valores a la secuencia de apilado del material. Se procedió a realizar las regresiones pertinentes. Cabe mencionar que no se incluyó el valor de los laminados de referencia debido a que existen valores superiores de resistencia al laminado SAC, lo cual provoca que el coeficiente de determinación  $R^2$  sea bajo, lo mismo ocurrió con la regresión  $M\sigma_{F2}$ . Los valores que exhibió la regresión  $M\sigma_{F1}$  son los siguientes (Tabla 23):

Tabla 23: Valores obtenidos de la regresión múltiple  $M\sigma_{F1}$ .

<b>Término independiente</b>	663.059
<b>Coefficiente de regresión <math>SA_1</math></b>	337.217
<b>Coefficiente de regresión <math>H</math></b>	0.494
<b>Coefficiente de determinación <math>R^2</math></b>	0.939
<b><math>R^2</math>ajustado</b>	0.929

Por lo tanto, el modelo de regresión múltiple  $M\sigma_{F1}$  queda de la siguiente forma:

$$M\sigma_{F1} = 663.059869 + 337.217444SA_1 + 0.49449727H$$

donde:

$M\sigma_{F1}$  – Es el valor esperado que debe tomar el esfuerzo máximo a flexión.

$SA_1$  – Es valor de la secuencia de apilado del material.

$H$  – Es el valor de la hibridación.

Por otro lado, los valores que exhibió la regresión  $M\sigma_{F2}$  son los siguientes (ver Tabla 24):

Tabla 24: Valores obtenidos de la regresión múltiple  $M\sigma_{F2}$ .

<b>Término independiente</b>	606.672
<b>Coefficiente de regresión <math>SA_2</math></b>	253.845
<b>Coefficiente de regresión <math>H</math></b>	2.934
<b>Coefficiente de determinación <math>R^2</math></b>	0.834
<b><math>R^2</math>ajustado</b>	0.806

Por lo tanto, el modelo de regresión múltiple  $M\sigma_{F2}$ , queda de la siguiente forma:

$$M\sigma_{F2} = 606.672339 + 253.845264SA_2 + 2.93370345H$$

$M\sigma_{F2}$  – Es el valor esperado que debe tomar el esfuerzo máximo a flexión.

$SA_2$  – Es valor de la secuencia de apilado del material.

$H$  – Es el valor de la hibridación.

$R^2$  es el porcentaje de variación en la respuesta que es explicada por el modelo y  $R^2$  ajustado es el porcentaje de la variación, ajustado para el número de predictores en el modelo relativo al número de observaciones. En la Tabla 25 se comparan los valores de los esfuerzos máximos experimentales y los esfuerzos estimados de cada regresión múltiple:

Tabla 25: Comparación de esfuerzos últimos a flexión.

Laminado	$M\sigma_{F1}$ (MPa)	$M\sigma_{F2}$ (MPa)	$\sigma_{uf}$ (MPa)
SA1	765.122	716.115	784.4189
SA2	936.877	927.097	941.086
SA3	987.233	935.002	999.635
SA4	805.589	817.653	801.741
SA5	957.110	977.867	949.900
SA6	1007.466	985.771	1003.623
SA7	906.754	919.192	910.059
SA8	734.546	774.789	766.956
SA9	1029.947	1036.540	1076.580
SA10	825.824	868.423	812.955
SA11	896.411	876.328	863.952
SA12	764.669	833.463	770.915
SA13	785.356	766.884	792.197
SA14	855.947	825.558	833.536
SA15	886.068	884.233	837.358

En las siguientes gráficas se muestra otra forma de comparar los modelos donde se ordenan los laminados conforme con su porcentaje de hibridación. En la Figura 62 se presenta la comparación de los valores experimentales y los valores obtenidos de los modelos  $M\sigma_{F1}$  y  $M\sigma_{F2}$  con una hibridación del 60%. La línea en color azul representa los esfuerzos a flexión obtenidos experimentalmente, que se comparan contra los modelos  $M\sigma_{F1}$  y  $M\sigma_{F2}$ . Los modelos exhiben un comportamiento semejante con una diferencia promedio de los laminados (es la diferencia entre los datos experimentales y los estimados de cada modelo) SA3, SA6, SA9, SA12 y SA15 del 0.036% para el modelo  $M\sigma_{F1}$  y 0.349% para el modelo  $M\sigma_{F2}$ . Por lo tanto, los valores del modelo  $M\sigma_{F1}$  se ajustan mejor que el modelo  $M\sigma_{F2}$ .

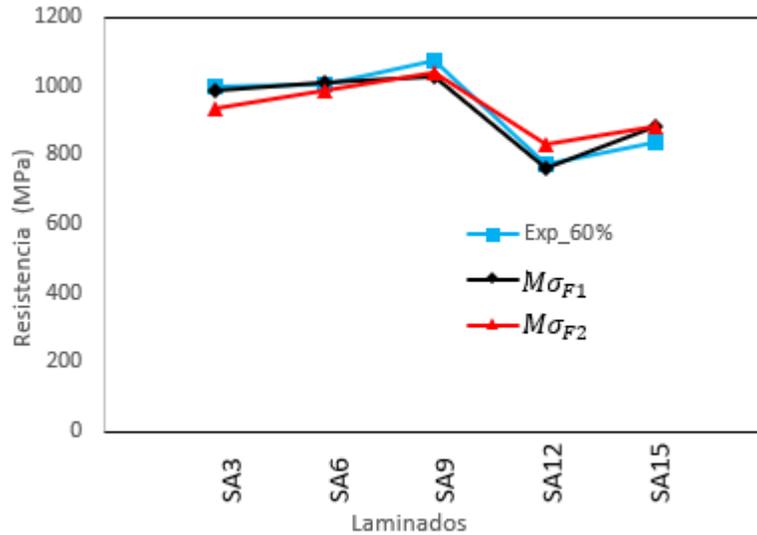


Figura 62: Comparación de esfuerzos a flexión de laminados con el 60% de hibridación.

En la Figura 63 se muestra la comparación de los valores experimentales y los valores obtenidos de los modelos  $M\sigma_{F1}$  y  $M\sigma_{F2}$  con una hibridación del 40%. El modelo  $M\sigma_{F2}$  tiene una mejor aproximación a los valores de los esfuerzos experimentales en comparación con los valores obtenidos por el modelo  $M\sigma_{F1}$ . Tienen una diferencia promedio de los laminados SA2, SA5, SA8, SA11 y SA14 del 0.506% para el modelo  $M\sigma_{F1}$  y 0.590% para el modelo  $M\sigma_{F2}$ .

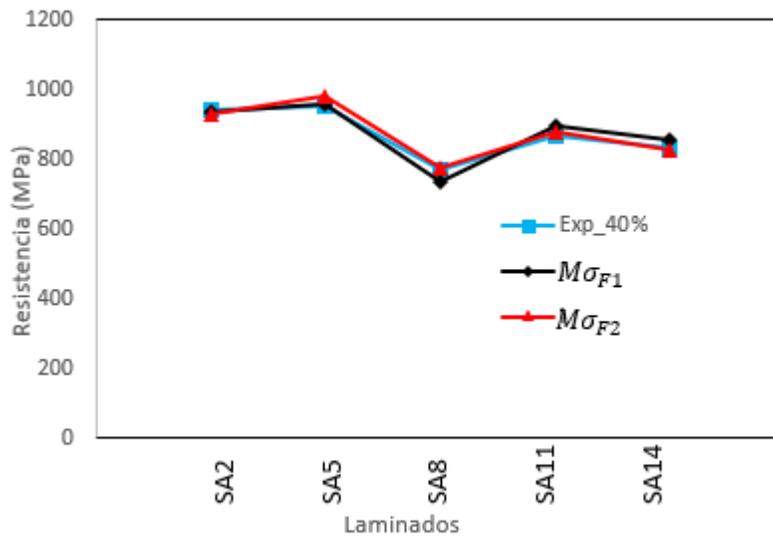


Figura 63: Comparación de esfuerzos a flexión laminados con el 40% de hibridación.

Por último, en la Figura 64 se presenta la comparación de los valores experimentales y los valores obtenidos de los modelos  $M\sigma_{F1}$  y  $M\sigma_{F2}$  con una hibridación del 20%. Para este

bloque, el modelo  $M\sigma_{F1}$  tiene una mejor estimación a los valores experimentales con una diferencia promedio (de los laminados SA1, SA4, SA7, SA10 y SA13) de 0.324%, ya que el modelo  $M\sigma_{F2}$  obtuvo una diferencia promedio de 0.418%.

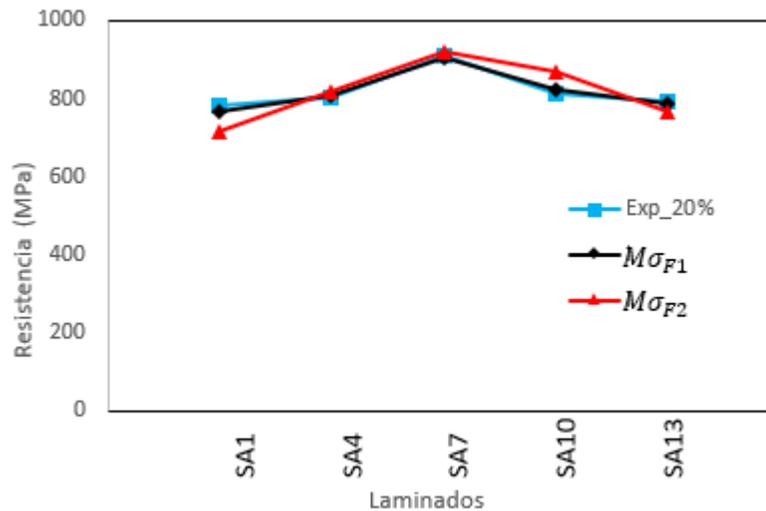


Figura 64: Comparación de esfuerzos a flexión de laminados con el 20% de hibridación.

Los modelos fenomenológicos  $M\sigma_{F1}$  y  $M\sigma_{F2}$  tienen una buena estimación de los esfuerzos últimos, con una diferencia promedio de 0.048% y 0.174% respecto a los valores experimentales. Se sustentan de los porcentajes de hibridación de cada prueba, el valor que se le asigne a la secuencia de apilado del material y de los resultados de resistencia a flexión. Funcionan con las configuraciones presentadas por lo que los valores de la secuencia de apilado del material son fundamentales. Por otro lado, se desconoce si al modificar las secuencias de apilado del material los modelos sigan funcionando.

Respecto al criterio para seleccionar el valor de la secuencia de apilado del material, se pueden realizar conforme con los bloques del porcentaje de hibridación:

- Con el 60% de hibridación, se recomienda asignar el valor mayor de secuencia de apilado del material al laminado que tenga la mitad de la cantidad de capas de carbono de un lado y del otro del plano medio; y como se vayan alejando del plano medio, ir disminuyendo el valor de la secuencia de apilado del material. Cabe señalar que el 30% de las capas deben de estar juntas y no intercaladas ya que cuando se intercalan, los valores de la secuencia de apilado del material son menores.

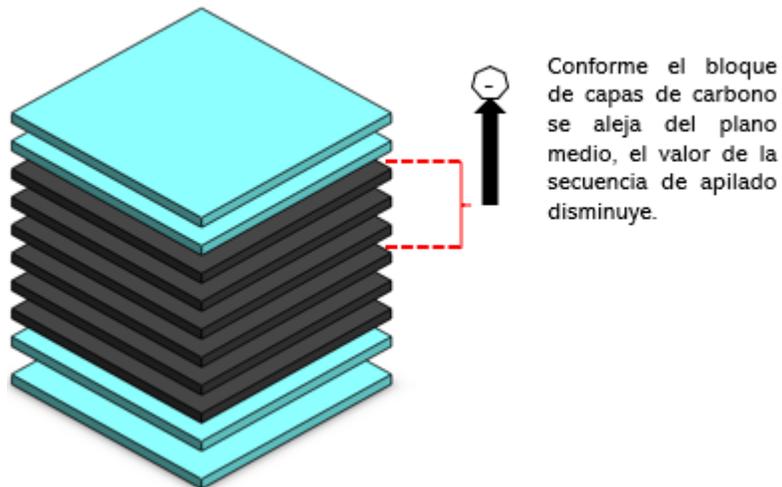


Figura 65: Asignación de valores a la secuencia de apilado del material con el 60% de hibridación.

- Con el 40% de hibridación, se recomienda asignar el valor mayor de secuencia de apilado del material al laminado que tenga el 20% de capas de carbono entre el plano medio y el exterior del compuesto (una capa de vidrio de distancia de la zona exterior). Después, seguirá el 20% de capas de carbono que se ubiquen en la zona exterior.

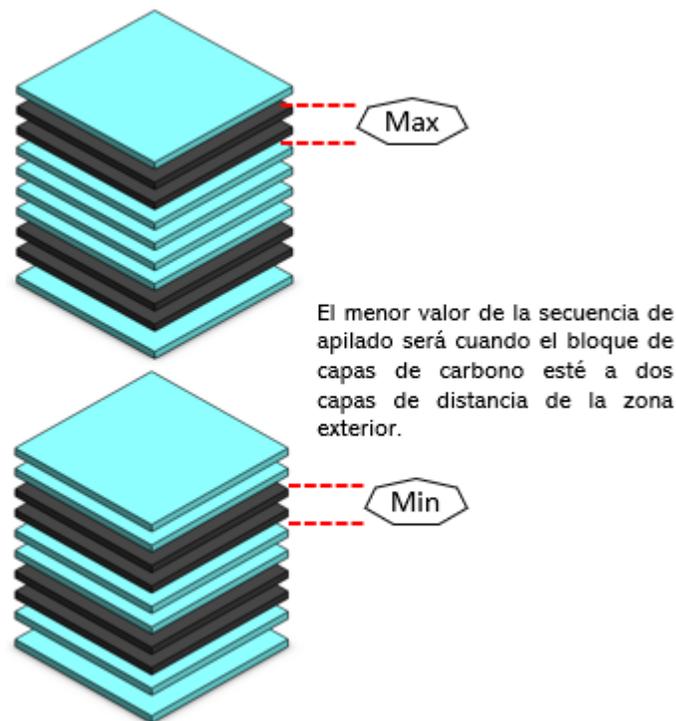


Figura 66: Asignación de valores a la secuencia de apilado del material con el 40% de hibridación.

- Con el 20% de hibridación, se recomienda asignar el valor mayor de secuencia de apilado del material al laminado que tenga el 10% de capas de carbono entre el plano medio y el exterior del compuesto. Los valores siguientes de la secuencia de apilado del material disminuirán conforme se acerque el 10% de capas de carbono, ya sea al exterior o al plano medio del compuesto.

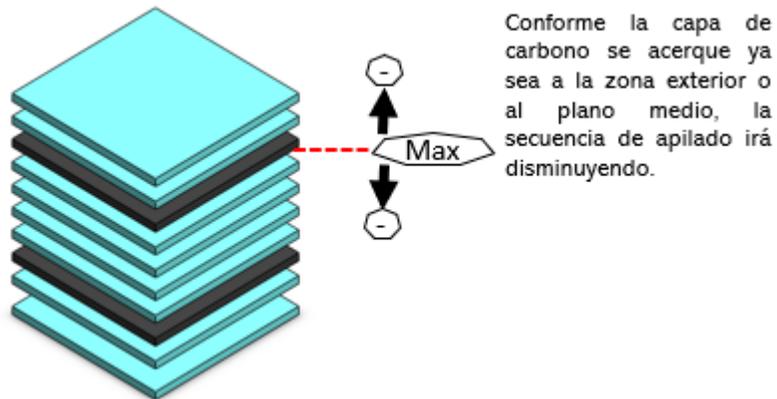


Figura 67: Asignación de valores a la secuencia de apilado del material con el 20% de hibridación.

## Conclusiones

---

En este trabajo se evaluó la influencia de la secuencia de apilado del material y los porcentajes de hibridación en las propiedades mecánicas finales (resistencia, módulo de elasticidad y elongación) de compuestos híbridos reforzados con fibras largas sometidos a cargas de tensión y flexión. El objetivo principal de esta investigación fue establecer una metodología para determinar la secuencia de apilado con el propósito de alcanzar el mejor desempeño de un compuesto laminado híbrido sometido a un esquema específico de cargas. Para el diseño experimental se consideraron las dos variables de mayor influencia en las propiedades finales de los materiales compuestos híbridos (secuencia de apilado e hibridación). Con estas dos variables se realizó un estudio paramétrico con el fin de obtener las secuencias de apilado del material, así como los porcentajes de hibridación que ofrezcan las mejores propiedades mecánicas finales. Además, se desarrollaron dos modelos matemáticos para estimar las resistencias máximas a flexión de las configuraciones propuestas en función de la secuencia de apilado del material y porcentajes de hibridación. A partir de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales realizadas, (ensayos de tensión y flexión) se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Laminados híbridos sometidos a flexión.

- El porcentaje de hibridación, es decir, la cantidad de capas de carbono en el laminado, tiene un efecto significativo en las propiedades de los polímeros reforzados con fibras.
- La secuencia de apilado del material tiene mayor impacto que el porcentaje de hibridación en las propiedades mecánicas de los laminados híbridos. Con un mismo porcentaje de hibridación, pero con distinta secuencia de apilado del material, los valores en sus propiedades del compuesto cambian de manera significativa.
- El efecto de la hibridación se ve influenciado por la secuencia de apilado del material debido a que se puede obtener un efecto híbrido negativo cuando no se elige la secuencia de apilado correcta. Sin embargo, el efecto híbrido es positivo en la mayoría de las configuraciones.
- Los laminados híbridos que tienen capas de carbono en el plano medio fueron los que obtuvieron mejores propiedades mecánicas. Esto se debe a que las fibras de vidrio se pueden deformar más y transfieren la carga a las fibras de carbono que se encuentran

en la parte central del compuesto. Sin embargo, el laminado SA13 que solo tiene dos capas de carbono en el centro, no logra mejorar la resistencia a la flexión ya que la cantidad de carbono que se encuentra en el centro del compuesto no soporta la carga transferida de las capas de vidrio.

- Con una hibridación del 20%, ir colocando las capas de carbono del exterior al interior o viceversa, mejora la resistencia a la flexión siempre y cuando no se coloquen en el plano medio.
- Si se quiere obtener una resistencia alta a flexión en el compuesto híbrido con un porcentaje de hibridación de 60%, se deben colocar las capas de carbono en la parte exterior del laminado. Sin embargo, si se quiere una combinación entre resistencia y elongación, se deben colocar las capas de carbono en el plano medio del laminado híbrido.
- Los laminados híbridos SA7, SA9 y SA11, en términos generales son los que tienen mejor desempeño en comparación con los demás laminados híbridos ya que la secuencia de apilado del material afectó cada porcentaje de hibridación (20%, 40% y 60%) y ocasionó que no exista un dominio de un bloque sobre los demás.
- La teoría clásica de laminados no predice de manera aproximada el módulo de elasticidad a flexión de los laminados híbridos debido a los desplazamientos que se ven involucrados a causa de los esfuerzos y funciona más eficazmente con los laminados sujetos a tensión. Sin embargo, la CLT es capaz de seguir la tendencia de los valores experimentales por lo que considera la influencia que existe en las propiedades mecánicas de la secuencia de apilado e hibridación.
- Los modelos fenomenológicos funcionan con los datos que se obtuvieron con los ensayos a flexión. Predicen los esfuerzos máximos que pueden obtener los laminados a partir de distintas secuencias de apilado del material y porcentajes de hibridación.

Se propusieron recomendaciones para lograr el mejor desempeño en una propiedad sin que las propiedades restantes estudiadas disminuyan en una proporción considerable. Para el módulo de elasticidad se recomienda usar el laminado SA7, para la elongación se recomienda usar el laminado SA11 y para el esfuerzo último se recomienda usar el laminado SA9 o SA7. Además, los tres laminados recomendados ahorran el uso de fibras de carbono, lo cual

significa un ahorro monetario ya que la fibra de vidrio es en promedio 2.5 más barata que la fibra de carbono.

Laminados híbridos sometidos a tensión.

- La teoría clásica de laminados es una buena manera de estimar los módulos de elasticidad ya que predice valores muy cercanos a los reales.
- La secuencia de apilado del material no tiene influencia en los módulos de elasticidad ya que, aunque se varíe la colocación de capas, los módulos son similares cuando se tiene una misma hibridación.
- Conforme la hibridación de capas de carbono aumente, los módulos de elasticidad aumentarán, esto se debe a la rigidez que ofrecen las fibras de carbono.
- Las pruebas experimentales realizadas en la máquina universal de ensayos Shimadzu AG-X plus 100kN únicamente funcionaron para obtener los módulos de elasticidad de cada laminado debido al número de capas que constituyen el compuesto híbrido y la sujeción de las probetas, lo cual ocasionó que la máquina no lograra llegar al punto de esfuerzo máximo donde las probetas empiezan a fallar. Por lo tanto, se desconoce hasta dónde puede resistir cada laminado y la influencia que tiene la secuencia de apilado del material y el porcentaje de hibridación respecto al esfuerzo último.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que los porcentajes de la hibridación y las secuencias de apilado del material mejoraron las propiedades de los laminados de referencia (carbono y vidrio), por lo que las configuraciones propuestas son una opción recomendable para ahorrar costos de fabricación con menor número de láminas de carbono y con propiedades similares o inclusive superiores a los laminados de referencia. Además, con los modelos fenomenológicos, a partir de las relaciones obtenidas experimentalmente entre la secuencia de apilado del material y los porcentajes de hibridación, se estiman los esfuerzos máximos de cada configuración. Con esto, se puede conocer las propiedades que se pueden obtener antes de realizar el proceso de hibridación de carbono y vidrio.

## Trabajos futuros

---

Los siguientes puntos tienen como objetivo principal ampliar esta investigación.

- Investigar a fondo los espesores con los que se podría trabajar en la máquina universal de ensayos Shimadzu AG-X plus 100kN, ya que con el empleo de diez capas de fibra que constituyen el laminado, no se logró alcanzar la máxima resistencia de los laminados, dado que falló el agarre antes.
- Buscar alternativas que ayuden con la sujeción de las probetas, por ejemplo: uso de otro tipo de talones usados en esta investigación o desde la fabricación de los laminados aumentar el espesor en la zona donde las mordazas de la máquina sujetan cada probeta.
- Comprobar que las zonas de recomendación donde existe el mejor desempeño respecto al módulo de elasticidad y esfuerzo último de los laminados híbridos a flexión, es la misma para los laminados cuando se someten a tensión.
- Poner más énfasis en la determinación de la secuencia de apilado como variable cuantitativa y establecer una metodología que sirva como base de trabajos futuros.

## Referencias

---

- [1] A. Besednjak and A. B. Dietrich, *Materiales compuestos*. Universidad Politècnica de Catalunya, 2005.
- [2] Y. Swolfs, I. Verpoest, and L. Gorbatikh, “Recent advances in fibre-hybrid composites: materials selection, opportunities and applications,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 64, no. 4, pp. 181–215, May 2019.
- [3] M. A. Caminero, G. P. Rodríguez, and V. Muñoz, “Effect of stacking sequence on Charpy impact and flexural damage behavior of composite laminates,” *Compos. Struct.*, vol. 136, pp. 345–357, 2016.
- [4] J. Mayén *et al.*, “Fractographic relation between progressive failure and strain measurement techniques for recently developed configuration of carbon fiber/epoxy laminate,” *Polym. Test.*, vol. 57, pp. 156–164, 2017.
- [5] M. A. Caminero, I. García-Moreno, and G. P. Rodríguez, “Damage resistance of carbon fibre reinforced epoxy laminates subjected to low velocity impact: Effects of laminate thickness and ply-stacking sequence,” *Polym. Test.*, vol. 63, pp. 530–541, 2017.
- [6] I. D. G. Ary Subagia, K. Yonjig, L. D. Tijing, C. S. Kim, and H. K. Shon, “Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 251–258, 2014.
- [7] R. Potluri, R. Syam Dheeraj, and G. V. V. N. G. Vital, “Effect of stacking sequence on the mechanical & thermal properties of hybrid laminates,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 5876–5885, 2018.
- [8] E. Selver, P. Potluri, C. Soutis, and P. Hogg, “Healing potential of hybrid materials for structural composites,” *Compos. Struct.*, vol. 122, pp. 57–66, 2015.
- [9] F. Javidrad, M. Nazari, and H. R. Javidrad, “Optimum stacking sequence design of laminates using a hybrid PSO-SA method,” *Compos. Struct.*, vol. 185, no. November 2017, pp. 607–618, 2018.
- [10] S. Keck and M. Fulland, “Effect of fibre volume fraction and fibre direction on crack paths in unidirectional flax fibre-reinforced epoxy composites under static loading,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 101, no. January, pp. 162–168, 2019.
- [11] L. S. Arias Maya and L. Vanegas Useche, “Falla de los materiales compuestos

- laminados,” *Sci. Tech.*, vol. X, no. 25, pp. 113–118, Sep. 2004.
- [12] D. K. Jesthi, P. Mandal, A. K. Rout, and R. K. Nayak, “Effect of carbon/glass fiber symmetric inter-ply sequence on mechanical properties of polymer matrix composites,” *Procedia Manuf.*, vol. 20, no. 20 18, pp. 530–535, 2018.
- [13] D. Chen, G. Sun, M. Meng, X. Jin, and Q. Li, “Flexural performance and cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 142, pp. 516–531, 2019.
- [14] A. Riccio, G. Di Felice, S. Saputo, and F. Scaramuzzino, “Stacking sequence effects on damage onset in composite laminate subjected to low velocity impact,” *Procedia Eng.*, vol. 88, pp. 222–229, 2014.
- [15] J. A. Naranjo Paredes, “Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos en la edificación: hormigón reforzado con fibra de vidrio,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2016.
- [16] E. Alcudia Zacarías, “Bases para el Diseño de Materiales Compuestos Estructurales con Enfoque en Tolerancia al Daño,” Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2016.
- [17] S. N. A. Safri, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, and K. Jayakrishna, “Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 133, pp. 112–121, 2018.
- [18] M. Kühnel and M. Sauer, “The global CF and CC market 2017,” in *International Composite Congress (ICC)*, 2017, pp. 1–31.
- [19] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Third edit. 2005.
- [20] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. Fink, and M. Sain, “Progress in Polymer Science Biocomposites reinforced with natural fibers : 2000 – 2010,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, 2012.
- [21] M. Bulut and A. Erkliğ, “The investigation of quasi-static indentation effect on laminated hybrid composite plates,” *Mech. Mater.*, vol. 117, no. November 2017, pp. 225–234, 2018.
- [22] J. Dong, A. Locquet, and D. S. Citrin, “Polarization-resolved terahertz imaging of hybrid fiber-reinforced composite laminate subject to low-velocity impact,” *2016 Conf. Lasers Electro-Optics, CLEO 2016*, vol. 92, pp. 167–174, 2016.

- [23] G. C. de Oliveira Filho, R. C. de Sousa Mota, A. C. R. da Conceicao, M. A. Leao, and O. O. de Araujo Filho, “Effects of hybridization on the mechanical properties of composites reinforced by piassava fibers tissue,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 162, no. October 2018, pp. 73–79, 2019.
- [24] M. R. Ricciardi and I. Papa, “Effect of hybridization on the impact properties of flax/basalt epoxy composites: Influence of the stacking sequence,” vol. 214, no. January, pp. 476–485, 2019.
- [25] U. Kureemun, M. Ravandi, L. Q. N. Tran, W. S. Teo, T. E. Tay, and H. P. Lee, “Effects of hybridization and hybrid fibre dispersion on the mechanical properties of woven flax-carbon epoxy at low carbon fibre volume fractions,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 134, pp. 28–38, 2018.
- [26] W. Roundi, A. El Mahi, A. El Gharad, and J. L. Rebière, “Experimental and numerical investigation of the effects of stacking sequence and stress ratio on fatigue damage of glass/epoxy composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 109, pp. 64–71, 2017.
- [27] E. Alcudia Zacarías, J. A. Jiménez-Gallegos, M. Siqueiros-Hernández, J. Delgado Hernández, Alberto Mayén Chaires, J. A. Paz-González, and A. Abúndez Pliego, “Efecto de la hibridación en las propiedades mecánicas a flexión de un laminado cross-ply carbono/vidrio,” *Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*, p. 5, 2019.
- [28] M. Kalantari, C. Dong, and I. J. Davies, “Numerical investigation of the hybridisation mechanism in fibre reinforced hybrid composites subjected to flexural load,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 102, pp. 100–111, 2016.
- [29] J. Zhang, K. Chaisombat, S. He, and C. H. Wang, “Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures,” *Mater. Des.*, vol. 36, pp. 75–80, 2012.
- [30] L. J. Nelson and R. A. Smith, “Fibre direction and stacking sequence measurement in carbon fibre composites using Radon transforms of ultrasonic data,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 118, no. April 2018, pp. 1–8, 2019.
- [31] A. Ramírez Salgado, “Bases para la optimización de la resistencia de materiales compuestos laminados,” Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2018.
- [32] K. S. Pandya, C. Veerajju, and N. K. Naik, “Hybrid composites made of carbon and

- glass woven fabrics under quasi-static loading,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 7, pp. 4094–4099, Aug. 2011.
- [33] C. A. J. . Vermeeren, “Una visión general histórica del desarrollo de laminados de fibra metálica,” 2003.
- [34] M. Sadighi, T. Pärnänen, R. C. Alderliesten, M. Sayeafabi, and R. Benedictus, “Experimental and Numerical Investigation of Metal Type and Thickness Effects on the Impact Resistance of Fiber Metal Laminates,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 19, no. 3–4, pp. 545–559, Jun. 2012.
- [35] M. A. Muflikhun, T. Yokozeeki, and T. Aoki, “The strain performance of thin CFRP-SPCC hybrid laminates for automobile structures,” *Compos. Struct.*, vol. 220, pp. 11–18, Jul. 2019.
- [36] C. Zweben, “Tensile strength of hybrid composites,” *J. Mater. Sci.*, vol. 12, no. 7, pp. 1325–1337, Jul. 1977.
- [37] J. Dipak Kumar and N. Ramesh Kumar, “Improvement of mechanical properties of hybrid composites through interply rearrangement of glass and carbon woven fabrics for marine application,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 168, no. March, pp. 467–475, 2019.
- [38] D. Kumar Jesthi and N. Ramesh Kumar, “Evaluation of mechanical properties and morphology of seawater aged carbon and glass fiber reinforced polymer hybrid composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 174, no. March, p. 106980, 2019.
- [39] E. Alcudia-Zacarías, A. Abúndez-Pliego, J. Mayén, J. Colín-Ocampo, A. Blanco-Ortega, and W. M. Alcocer-Rosado, “Experimental Assessment of Residual Integrity and Balanced Mechanical Properties of GFRP/CFRP Hybrid Laminates under Tensile and Flexural Conditions,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 27, no. 6, pp. 895–914, Dec. 2020.
- [40] A. Besednjak, *Materiales compuestos*, vol. 100. Univ. Politèc. de Catalunya, 2009.
- [41] D. Gay, *Composite Materials: Design and Applications*. Boca Raton, 2014.
- [42] F. Stupenengo, “Materiales y materias primas,” *Mater. y Mater. primas. Buenos aires sn*, 2011.
- [43] ASTM D4762, *Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials*. 2011.

- [44] ASTM D7264/D7264M, *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. 2007.
- [45] ASTM International, *D3039 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.”* 2002, p. 13.
- [46] L. E. Sanchez Balanzar, “Optimización de materiales compuestos laminados reforzados con fibra aplicando algoritmos genéticos,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [47] F. C. Campbell, *Fatigue and Fracture*. Ohio, 2012.
- [48] H. L. Avila Baray, *Introducción a la metodología de la investigación*. Cd. Cuauhtemoc, Chihuahua, México., 2006.
- [49] R. Montero Granados, “Modelos de regresión lineal múltiple,” España, 2016.
- [50] A. Rajpurohit, S. Joannès, V. Singery, P. Sanial, and L. Laiarinandrasana, “Hybrid Effect in In-Plane Loading of Carbon/Glass Fibre Based Inter- and Intraply Hybrid Composites,” *J. Compos. Sci.*, vol. 4, no. 1, p. 6, Jan. 2020.
- [51] G. Kalaprasad, S. Thomas, C. Pavithran, N. R. Neelakantan, and S. Balakrishnan, “Hybrid Effect in the Mechanical Properties of Short Sisal/Glass Hybrid Fiber Reinforced Low Density Polyethylene Composites,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 15, no. 1, pp. 48–73, Jan. 1996.
- [52] S.-Y. Fu, B. Lauke, E. Mäder, C.-Y. Yue, X. Hu, and Y.-W. Mai, “Hybrid effects on tensile properties of hybrid short-glass-fiber-and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites,” *J. Mater. Sci.*, vol. 36, no. 5, pp. 1243–1251, 2001.
- [53] M. S. Sreekala, G. Jayamol, K. M.G, and T. Sabu, “The mechanical performance of hybrid phenol-formaldehyde-based composites reinforced with glass and oil palm fibres,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 62, no. 3, pp. 339–353, Feb. 2002.
- [54] C. Dong and I. J. Davies, “Optimal design for the flexural behaviour of glass and carbon fibre reinforced polymer hybrid composites,” *Mater. Des.*, vol. 37, pp. 450–457, May 2012.
- [55] C. Dong, “Uncertainties in flexural strength of carbon/glass fibre reinforced hybrid epoxy composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 98, pp. 176–181, Aug. 2016.
- [56] S. B. Singh, H. Chawla, and R. B., “Hybrid effect of functionally graded hybrid composites of glass–carbon fibers,” *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 26, no. 14, pp.

1195–1208, Jul. 2019.

- [57] ACP Composites, “4.07 oz Uni-web unidirectional carbon fiber datasheet.” 2019.
- [58] ACP Composites, “Uni-Web S-Glass fiber datasheet.” 2019.
- [59] Axon Technologies, “EPOLAM 5015 resin.” 2020.
- [60] C. Dong, Sudarisman, and I. J. Davies, “Flexural Properties of E Glass and TR50S Carbon Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Composites,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 22, no. 1, pp. 41–49, Jan. 2013.

## Anexo 1

A continuación, se muestran las variaciones de los espesores que se obtuvieron de cada configuración estudiada.

En la figura A1.1 se muestra la variación de espesor que existió en el laminado híbrido SA1. La mayor parte del laminado obtuvo un espesor entre 1.75mm y 2mm siendo los costados donde el espesor obtuvo los valores máximos.

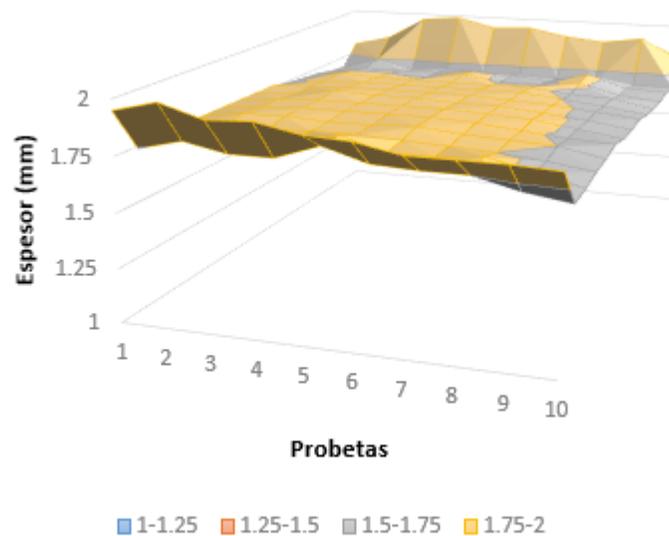


Figura A1.1. Variación de espesor del laminado híbrido SA1.

En la Figura A1.2 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA2, el cual, obtuvo los mayores valores de espesor en los costados.

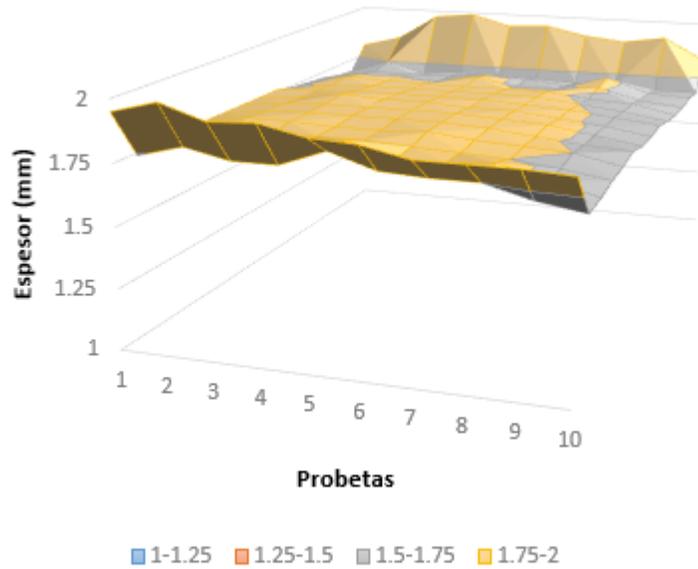


Figura A1.2. Variación de espesor del laminado híbrido SA2.

En la Figura A1.3 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA3. Obtuvo en la mayor parte del laminado un espesor entre 1.5 y 1.75.

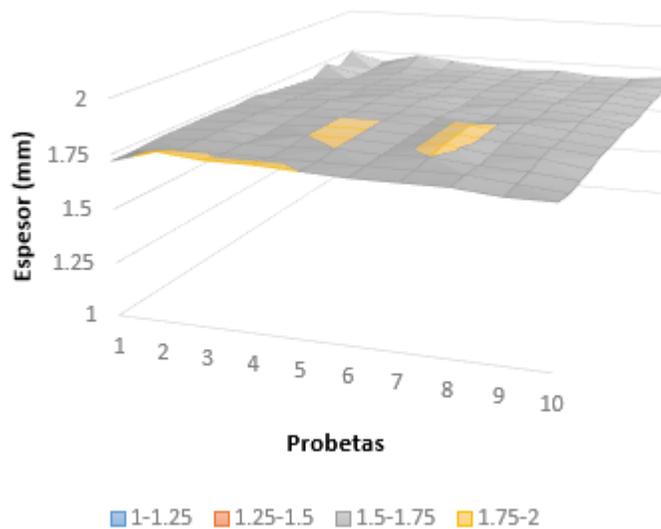


Figura A1.3. Variación de espesor del laminado híbrido SA3.

En la Figura A1.4 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA4. Obtuvo en la mayor parte del laminado un espesor entre 1.5 y 1.75. En el centro del laminado fue donde se obtuvieron los valores máximos de espesor (1.75mm y 2mm).

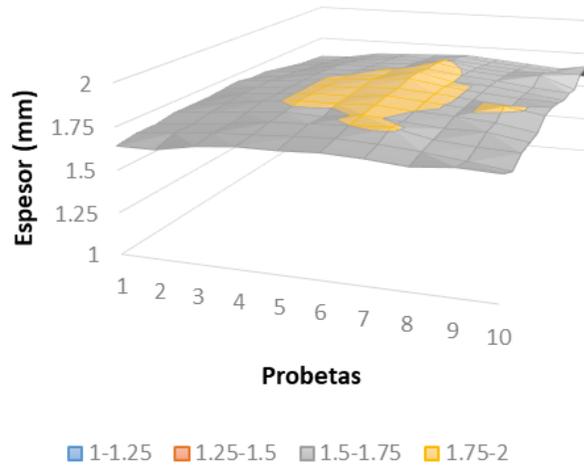


Figura A1.4. Variación de espesor del laminado híbrido SA4.

En la Figura A1.5 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA5. Los espesores que se obtuvieron fueron entre 1.5mm y 1.75mm, siendo el máximo 1.75, que se obtuvo en la probeta 10.

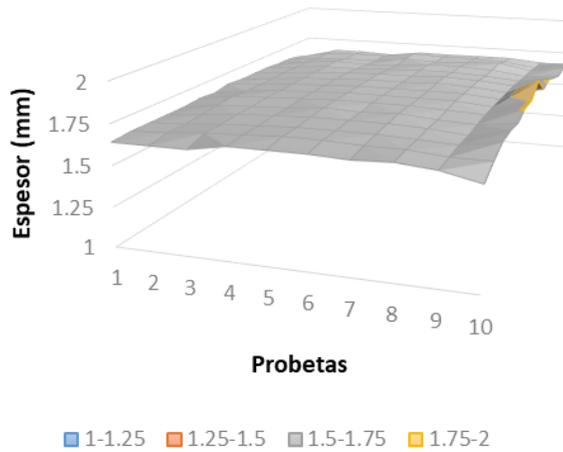


Figura A1.5. Variación de espesor del laminado híbrido SA5.

En la Figura A1.6 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA6. La zona central del laminado obtuvo espesores superiores a 2mm. Los extremos de las probetas obtuvieron los espesores máximos del laminado (de 1.75mm a 2mm).

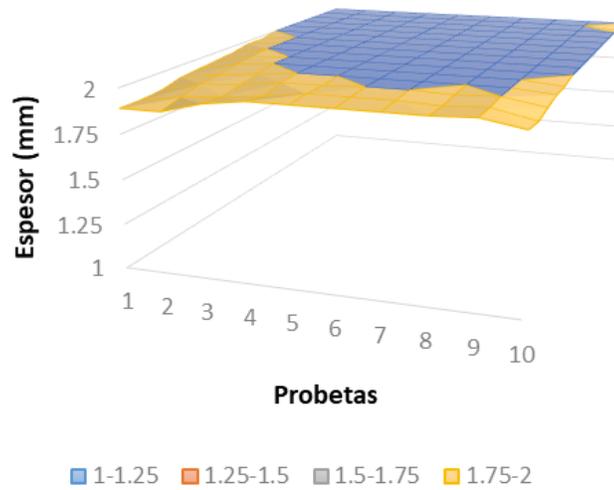


Figura A1.6. Variación de espesor del laminado híbrido SA6.

En la Figura A1.7 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA7. La zona central del laminado obtuvo espesores entre 1.75mm y 2mm. En las esquinas, los espesores rondaron entre 1.5mm y 1.75mm.

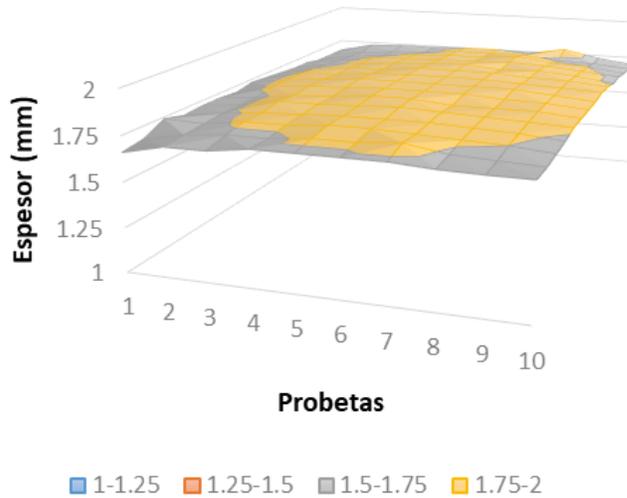


Figura A1.7. Variación de espesor del laminado híbrido SA7.

En la Figura A1.8 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA8. Este laminado obtuvo los espesores más bajos de 1.5mm a 1.75mm en las probetas uno y dos principalmente. En las probetas restantes dominaron espesores entre 1.75mm y 2mm.

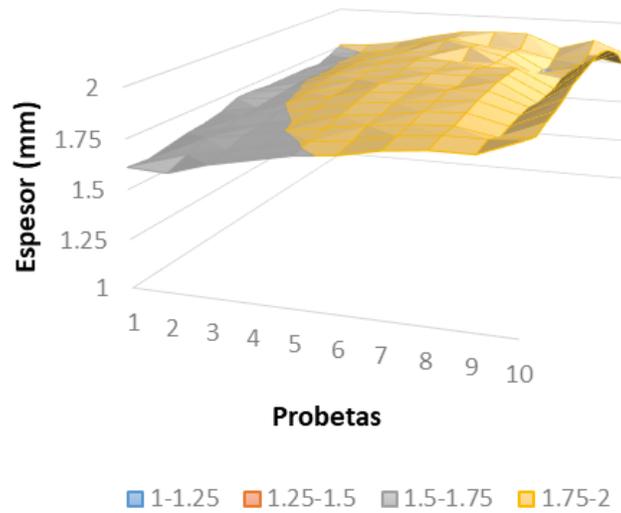


Figura A1.8. Variación de espesor del laminado híbrido SA8.

En la Figura A1.9 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA9. En términos generales el espesor en todas las probetas estuvo entre 1.75 y 2mm.

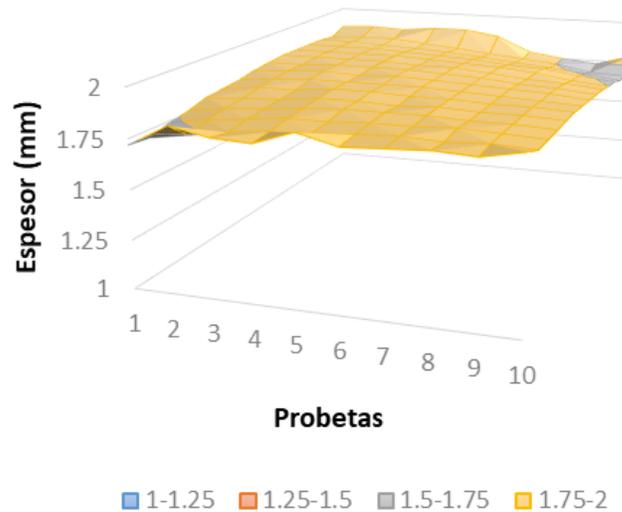


Figura A1.9. Variación de espesor del laminado híbrido SA9.

En la Figura A1.10 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA10. En este laminado el espesor en todas las probetas estuvo entre 1.5mm y 1.75mm.

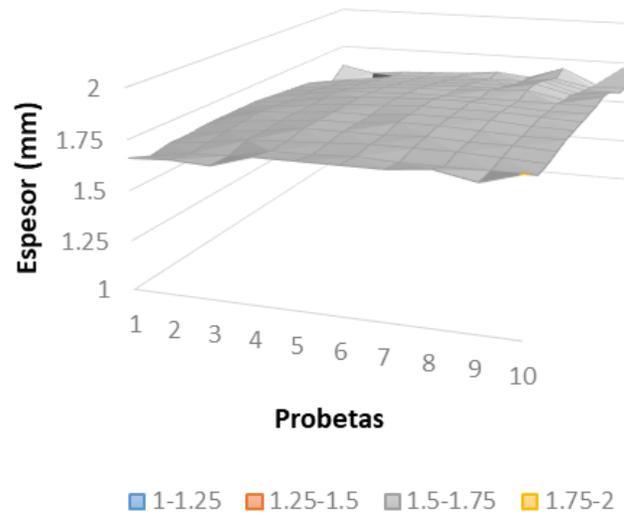


Figura A1.10. Variación de espesor del laminado híbrido SA10.

En la Figura A1.11 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA11. Los espesores del laminado fueron entre 1.5mm y 1.75mm, alcanzando los valores máximos en la probeta uno y los extremos de las probetas restantes.

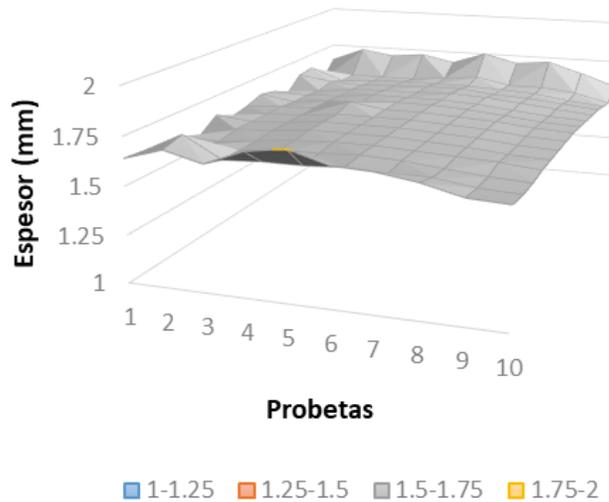


Figura A1.11. Variación de espesor del laminado híbrido SA11.

En la Figura A1.12 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA12. Todas las probetas obtuvieron espesores entre 1.75mm y 2mm.

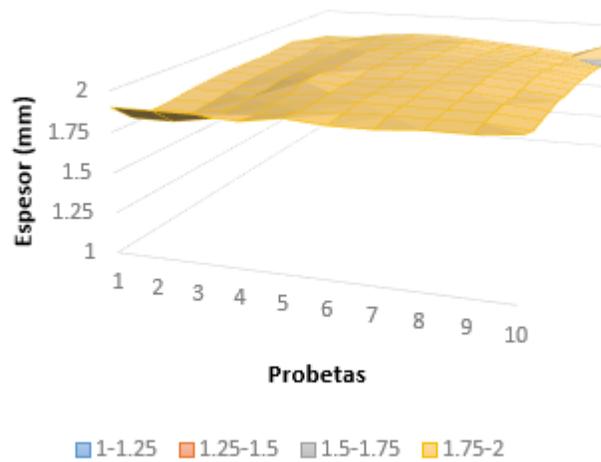


Figura A1.12. Variación de espesor del laminado híbrido SA12.

En la Figura A1.13 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA13. En general, el espesor del laminado rondó entre 1.5mm y 1.75mm, en las esquinas fue donde se obtuvieron los espesores mínimos, como por ejemplo en la probeta 10.

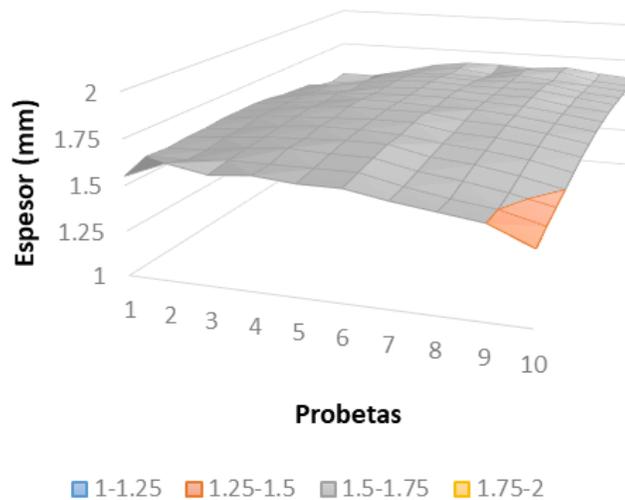


Figura A1.13. Variación de espesor del laminado híbrido SA13.

En la Figura A1.14 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA14. Obtuvo dos rangos de espesores, en el centro de laminado el rango de espesor fue de 1.5mm a 1.75mm y en los extremos el rango fue de 1.75mm a 2mm.

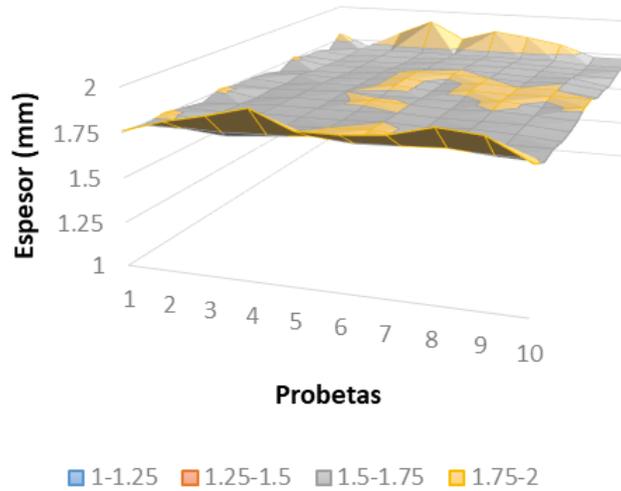


Figura A1.14. Variación de espesor del laminado híbrido SA14.

En la Figura A1.15 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SA15. La mayor parte del laminado el rango de espesor fue de 1.75mm a 2mm, solo las probetas uno, nueve y diez fueron las que obtuvieron valores de espesor entre 1.5mm y 1.75mm.

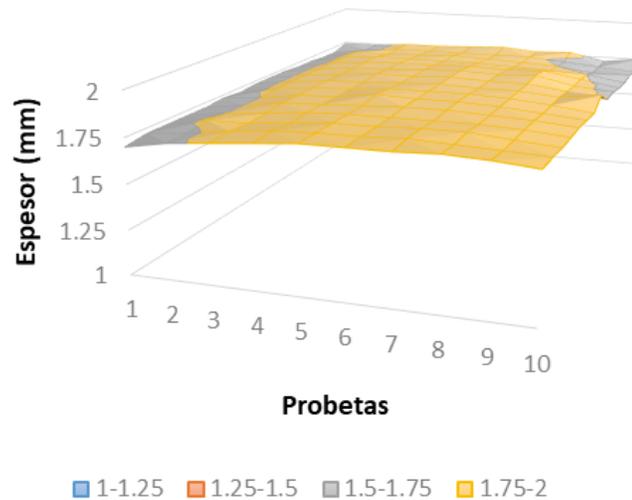


Figura A1.15. Variación de espesor del laminado híbrido SA15.

En la Figura A1.16 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SAC. La zona de mayor valor de espesor fue el centro de laminado donde se ubican las probetas cuatro, cinco y seis. La zona restante del laminado el rango de espesor fue de 1.75mm a 2mm.

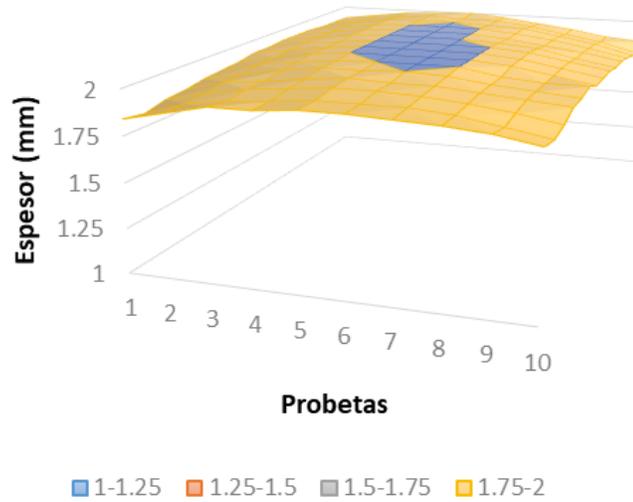


Figura A1.16. Variación de espesor del laminado híbrido SAC.

En la Figura A1.17 se muestra la variación de espesor del laminado híbrido SAV. El rango que dominó el espesor fue de 1.5mm a 1.75mm. en las esquinas del laminado se obtuvieron los espesores mínimos que rondaron entre 1.25mm y 1.5mm.

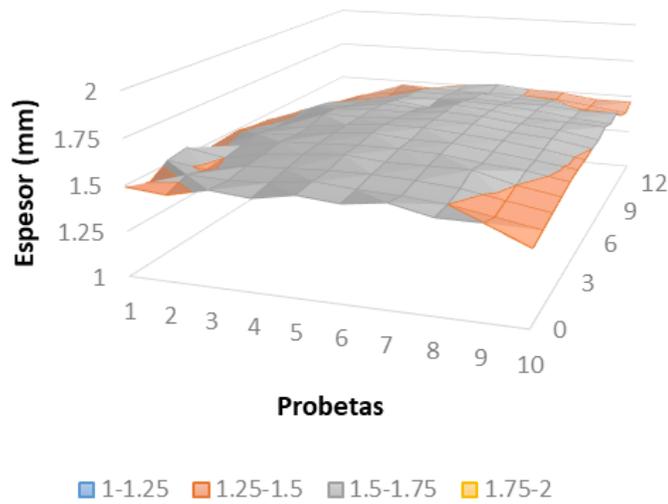


Figura A1.17. Variación de espesor del laminado híbrido SAV.

## Anexo 2

También, se muestran las geometrías, así como sus masas de cada laminado en las siguientes tablas. En la Tabla A2.1 se muestran las geometrías que obtuvieron los laminados SA1 y SA2. Se puede notar que cada probeta obtuvo diferentes valores derivados del proceso de manufactura y de corte. Cabe mencionar que estos datos son importantes para obtener los esfuerzos de cada probeta, así como la fracción de volumen de cada una de ellas y lograr obtener los valores generales de cada laminado.

Tabla A2.1. Características geométricas y de masa de los laminados SA1 y SA2.

Laminado SA1										
Probeta	SA1a	SA1b	SA1c	SA1d	SA1e	SA1f	SA1g	SA1h	SA1i	SA1j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	12.194	13.570	12.153	12.859	12.174	12.126	13.446	11.997	13.387	12.435
Espesor prom(mm)	1.758	1.791	1.790	1.793	1.797	1.786	1.774	1.771	1.748	1.718
Masa prom (gr)	4.4	5	4.4	4.8	4.4	4.4	4.8	4.4	4.8	4.2
Laminado SA2										
Probeta	SA2a	SA1b	SA2c	SA2d	SA2e	SA2f	SA2g	SA2h	SA2i	SA2j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	13.049	12.991	12.960	13.003	13.011	12.881	12.844	12.989	13.031	12.415
Espesor prom(mm)	1.758	1.791	1.790	1.793	1.797	1.786	1.774	1.771	1.748	1.718
Masa prom (gr)	4.6	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.6	4.6	4.6

En la Tabla A2.2 se muestran las geometrías que obtuvieron los laminados SA3, SA4 y SA5. Se puede notar que cada probeta obtuvo diferentes valores derivados del proceso de manufactura y de corte. La masa de cada laminado fue distinta debido al porcentaje de hibridación de cada uno de ellos.

Tabla A2.2. Características geométricas y de masa de los laminados SA3, SA4 y SA5.

Laminado SA3										
Probeta	SA3a	SA3b	SA3c	SA3d	SA3e	SA3f	SA3g	SA3h	SA3i	SA3j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	12.755	12.987	13.098	13.107	13.097	13.114	13.157	13.080	13.052	13.073
Espesor prom(mm)	1.716	1.721	1.728	1.733	1.732	1.724	1.728	1.718	1.709	1.693
Masa prom (gr)	4.4	4.4	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.4	4.4
Laminado SA4										

Probeta	SA4a	SA4b	SA4c	SA4d	SA4e	SA4f	SA4g	SA4h	SA4i	SA4j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	12.799	13.104	13.131	12.871	13.212	12.941	12.682	13.034	12.794	13.067
Espesor prom(mm)	1.659	1.681	1.709	1.726	1.732	1.754	1.731	1.709	1.700	1.685
Masa prom (gr)	4.2	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.4	4.4	4.4	4.2
<b>Laminado SA5</b>										
Probeta	SA5a	SA5b	SA5c	SA5d	SA5e	SA5f	SA5g	SA5h	SA5i	SA5j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	13.161	13.167	13.029	13.050	13.113	12.989	12.892	12.542	13.127	13.117
Espesor prom(mm)	1.648	1.672	1.687	1.694	1.708	1.708	1.709	1.704	1.683	1.721
Masa prom (gr)	4.4	4.4	4.4	4.6	4.6	4.4	4.4	4.2	4.4	4.4

En la Tabla A2.3 se muestran las geometrías que obtuvieron los laminados SA6, SA7 y SA8. Cada probeta de cada laminado obtuvo valores milimétricos distintos, así como valores de masa distintos. Se debió principalmente a proceso de manufactura, proceso de corte y porcentajes de hibridación.

Tabla A2.3. Características geométricas y de masa de los laminados SA6, SA7 y SA8.

<b>Laminado SA6</b>										
Probeta	SA6a	SA6b	SA6c	SA6d	SA6e	SA6f	SA6g	SA6h	SA6i	SA6j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	13.079	13.107	13.012	12.993	12.994	12.967	13.111	12.624	12.799	12.631
Espesor prom(mm)	1.961	1.990	2.012	2.033	2.048	2.051	2.046	2.041	2.021	1.991
Masa prom (gr)	4.8	5	5	5	5	5	5	4.8	5	4.6
<b>Laminado SA7</b>										
Probeta	SA7a	SA7b	SA7c	SA7d	SA7e	SA7f	SA7g	SA7h	SA7i	SA7j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	12.290	12.994	13.125	13.071	13.139	13.137	13.130	13.162	13.159	12.918
Espesor prom(mm)	1.703	1.736	1.757	1.768	1.780	1.781	1.780	1.771	1.758	1.739
Masa prom (gr)	4.2	4.6	4.6	4.8	4.8	4.8	4.8	4.6	4.6	4.4
<b>Laminado SA8</b>										
Probeta	SA8a	SA8b	SA8c	SA8d	SA8e	SA8f	SA8g	SA8h	SA8i	SA8j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	13.122	12.768	12.874	13.000	13.100	13.073	12.901	12.804	12.789	12.978
Espesor prom(mm)	1.679	1.713	1.760	1.800	1.837	1.845	1.854	1.834	1.817	1.910
Masa prom (gr)	4.4	4.2	4.4	4.6	4.6	4.6	4.6	4.4	4.4	4.6

En la Tabla A2.4 se muestran las geometrías que obtuvieron los laminados SA9, SA10 y SA11. Cada probeta de cada laminado obtuvo valores milimétricos distintos, así como valores de masa distintos. Se debió principalmente a proceso de manufactura, proceso de corte y porcentajes de hibridación.

Tabla A2.4. Características geométricas y de masa de los laminados SA9, SA10 y SA11.

Laminado SA9										
Probeta	SA9a	SA9b	SA9c	SA9d	SA9e	SA9f	SA9g	SA9h	SA9i	SA9j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	13.001	12.935	12.943	12.891	13.045	12.913	12.887	13.047	12.998	13.006
Espesor prom(mm)	1.808	1.827	1.829	1.833	1.836	1.825	1.813	1.801	1.789	1.782
Masa prom (gr)	4.6	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.6	4.6	4.6
Laminado SA10										
Probeta	SA10a	SA10b	SA10c	SA10d	SA10e	SA10f	SA10g	SA10h	SA10i	SA10j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	13.021	13.011	12.945	13.148	13.117	13.067	13.119	12.889	12.936	13.063
Espesor prom(mm)	1.627	1.654	1.669	1.689	1.696	1.705	1.704	1.719	1.690	1.708
Masa prom (gr)	4.4	4.6	4.4	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.4
Laminado SA11										
Probeta	SA11a	SA11b	SA11c	SA11d	SA11e	SA11f	SA11g	SA11h	SA11i	SA11j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	12.199	12.429	12.568	12.790	12.384	12.856	12.397	12.781	12.626	12.926
Espesor prom(mm)	1.615	1.633	1.627	1.648	1.649	1.653	1.637	1.627	1.601	1.582
Masa prom (gr)	3.8	4	4.2	4.2	4.2	4.4	4.2	4.2	4.2	4.2

En la Tabla A2.5 se muestran las geometrías que obtuvieron los laminados SA12, SA13 y SA14. Cada probeta de cada laminado obtuvo valores milimétricos distintos, así como valores de masa distintos. Se debió principalmente a proceso de manufactura, proceso de corte y porcentajes de hibridación.

Tabla A2.5. Características geométricas y de masa de los laminados SA12, SA13 y SA14.

Laminado SA12										
Probeta	SA12a	SA12b	SA12c	SA12d	SA12e	SA12f	SA12g	SA12h	SA12i	SA12j
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	12.949	12.949	13.023	12.840	12.865	13.075	13.117	13.165	12.953	13.049
Espesor prom(mm)	1.819	1.819	1.848	1.881	1.894	1.898	1.890	1.881	1.863	1.847

Masa prom (gr)	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	5	4.8	4.8	4.8	4.6
<b>Laminado SA13</b>										
Probeta	<b>SA13a</b>	<b>SA13b</b>	<b>SA13c</b>	<b>SA13d</b>	<b>SA13e</b>	<b>SA13f</b>	<b>SA13g</b>	<b>SA13h</b>	<b>SA13i</b>	<b>SA13j</b>
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	13.134	13.078	12.752	13.085	13.063	13.091	13.108	13.018	12.208	12.660
Espesor prom(mm)	1.575	1.599	1.635	1.659	1.665	1.660	1.645	1.632	1.599	1.560
Masa prom (gr)	4.2	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4	4
<b>Laminado SA14</b>										
Probeta	<b>SA14a</b>	<b>SA14b</b>	<b>SA14c</b>	<b>SA14d</b>	<b>SA14e</b>	<b>SA14f</b>	<b>SA14g</b>	<b>SA14h</b>	<b>SA14i</b>	<b>SA14j</b>
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	13.121	13.031	13.074	13.121	13.181	13.128	13.073	12.938	12.987	13.047
Espesor prom(mm)	1.740	1.730	1.745	1.761	1.756	1.759	1.757	1.758	1.746	1.729
Masa prom (gr)	4.4	4.6	4.6	4.6	4.6	4.8	4.6	4.6	4.6	4.6

En la Tabla A2.6 se muestran las geometrías que obtuvieron los laminados SA15, SAC y SAV. Cada probeta de cada laminado obtuvo valores milimétricos distintos, así como valores de masa distintos. Se debió principalmente a proceso de manufactura, proceso de corte y porcentajes de hibridación.

Tabla A2.6. Características geométricas y de masa de los laminados SA15, SAC y SAV.

<b>Laminado SA15</b>										
Probeta	<b>SA15a</b>	<b>SA15b</b>	<b>SA15c</b>	<b>SA15d</b>	<b>SA15e</b>	<b>SA15f</b>	<b>SA15g</b>	<b>SA15h</b>	<b>SA15i</b>	<b>SA15j</b>
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	13.083	12.953	12.823	12.739	12.891	12.806	13.107	13.137	13.003	12.880
Espesor prom(mm)	1.721	1.753	1.772	1.783	1.794	1.797	1.793	1.790	1.767	1.751
Masa prom (gr)	4.4	4.4	4.4	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.4	4.4
<b>Laminado SAC</b>										
Probeta	<b>SACa</b>	<b>SACb</b>	<b>SACc</b>	<b>SACd</b>	<b>SACe</b>	<b>SACf</b>	<b>SACg</b>	<b>SACH</b>	<b>SACi</b>	<b>SACj</b>
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	13.127	12.891	13.054	12.906	13.023	13.004	13.131	12.966	13.051	12.824
Espesor prom(mm)	1.895	1.937	1.969	1.986	1.995	1.993	1.979	1.953	1.919	1.883
Masa prom (gr)	4.6	4.8	4.8	4.8	5	4.8	4.8	4.8	4.8	4.4
<b>Laminado SAV</b>										
Probeta	<b>SAVa</b>	<b>SAVb</b>	<b>SAVc</b>	<b>SAVd</b>	<b>SAVe</b>	<b>SAVf</b>	<b>SAVg</b>	<b>SAVh</b>	<b>SAVi</b>	<b>SAVj</b>
Longitud prom(mm)	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
Ancho prom(mm)	12.813	12.941	12.419	12.563	12.493	12.802	13.113	12.969	12.856	13.031

Espe sor prom(mm)	1.437	1.484	1.523	1.543	1.553	1.561	1.553	1.533	1.505	1.472
Masa prom (gr)	3.8	4.2	4	4.2	4.2	4.2	4.4	4.2	4	4