

# TESIS DOCTORAL

2023



**OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTAS MÚLTIPLES  
(DOE/MSR) DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL  
MATERIAL HÍBRIDO DE MATRIZ EPOXI REFORZADA  
CON FIBRAS SINTÉTICAS Y NATURAL (CHAMBIRA)**

**JUAN GILBERTO PAREDES SALINAS**

**Profesor**

**Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica**

**Universidad Técnica de Ambato**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS**

**DIRECTOR: Víctor Hugo Guerrero, Ph.D.**

**TUTOR: José Luis Martínez, Ph.D.**

## RESUMEN

La necesidad de reemplazar materiales comunes, como el acero, aluminio y otras aleaciones en diversas aplicaciones industriales, como la metalmecánica, aeronáutica y de la construcción, requiere el desarrollo de nuevos materiales de buen comportamiento físico y mecánico. Esta investigación propone la optimización del proceso de diseño, caracterización y desarrollo de un compuesto híbrido de matriz epoxi reforzada con fibra natural (chambira) y fibras sintéticas (carbono, kevlar, vidrio). La optimización parte de un diseño experimental (DOE) bajo metodología de superficie de respuesta (MSR), con diseño de Box Behnken (DBB). Por condiciones de moldeo y acabado superficial, el híbrido se constituyó por tres capas. La primera siempre será carbono, kevlar o vidrio. Los factores son la orientación de la primera capa de fibra de chambira (-45°, 0°, 45°), orientación de la segunda capa de fibra de chambira (-45°, 0°, 45°) y la temperatura de curado (60°C, 90°C, 120°C). La caracterización se realizó bajo ASTM D 3039 (tracción), ASTM D 7264 (flexión) y ASTM D 5628 (impacto). Los resultados de los ensayos se tabularon y analizaron en Minitab® Statistical Software (v.21.1). Estadísticamente se comprobaron los supuestos, transformando los datos mediante Box-Cox y verificando la significancia del modelo (ANOVA) para identificar la configuración óptima del compuesto: orientación de capa 1 a 19,55°, orientación de capa 2 a 3,18°, temperatura de curado a 120 °C, capa base fibra carbono y moldeo al vacío por infusión. Los resultados incluyen un esfuerzo máximo a tracción de 118 MPa, módulo de tracción de 22692 MPa, elongación de 2,15 %, esfuerzo máximo a flexión de 71 MPa, módulo de flexión de 12843 MPa, deflexión de 6,44 mm y energía de impacto 3,83 J. Se concluye que la caracterización bajo DOE/MSR permite eliminar la subjetividad del investigador, pues se establecen casos controlados, permitiendo efectuar un análisis potente de las siete propiedades. Además, mediante la función de deseabilidad se cuantificó la variabilidad de estas propiedades en un 91%. Los factores relevantes fueron, la orientación de la segunda capa con 51% (efecto cuadrático), el tipo de fibra sintética con 14%, el tipo de moldeo y el tipo de fibra sintética con 12% (efecto de interacción), la temperatura con 5% (efecto cuadrático) y el tipo de moldeo con 5% de la variabilidad de las propiedades mecánicas. Finalmente, futuras investigaciones podrían trabajar con esta metodología en aplicaciones para diferentes industrias.

## ABSTRACT

The need to replace common materials, such as steel, aluminum and other alloys in various industrial applications, such as metalworking, aeronautics and construction, requires the development of new materials with good physical and mechanical behavior. This research proposes the optimization of the design, characterization and development of a hybrid material of epoxy matrix reinforced with natural fiber (chambira) and synthetic fibers (carbon, Kevlar or glass). The optimization starts from a design of experiments (DOE) under response surface methodology (MSR), with Box Behnken Design (DBB). Due to molding and surface finish considerations, the hybrid was constituted by three layers. The first one will always be carbon, Kevlar or glass. The factors are the orientation of the first layer of chambira fiber ( $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ), orientation of the second layer of chambira fiber ( $-45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ) and the curing temperature ( $60^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$ ,  $120^\circ\text{C}$ ). The characterization was performed under ASTM D 3039 (tension), ASTM D 7264 (flexure) and ASTM D 5628 (impact). The results obtained after the tests were tabulated and analyzed in Minitab<sup>®</sup> Statistical (v.21.1). Statistically, the assumptions were checked, transforming the data by Box-Cox and verifying the significance of the model (ANOVA) to identify the optimum configuration of the composite: orientation layer 1 at  $19.55^\circ$ , orientation layer 2 at  $3.18^\circ$ , curing temperature at  $120^\circ\text{C}$ , carbon fiber base layer and vacuum infusion molding. The results include maximum tensile stress of 118 MPa, tensile modulus of 22692 MPa, elongation of 2.15%, maximum flexural stress of 71 MPa, flexural modulus of 12843 MPa, deflection of 6.44 mm and impact energy of 3.83 J. It is concluded that the characterization under DOE/MSR allows eliminating the subjectivity of the researcher, since controlled cases are established, allowing a powerful analysis of the seven properties. In addition, by means of the desirability function, the variability of these properties was quantified in 91%. The relevant factors were the orientation of the second layer with 51% (quadratic effect), the type of synthetic fiber with 14%, the type of molding and the type of synthetic fiber with 12% (interaction effect), the temperature with 5% (quadratic effect) and the type of molding with 5% of the variability of the mechanical properties. Finally, future research could work with this methodology in specific applications for different industries.

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	iv
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Materiales compuestos ecológicos, verdes o green composites .....	2
1.1.1. Compuestos de matriz polimérica reforzada con fibras .....	5
1.1.2. Hibridación de fibras.....	6
1.2. Parámetros que influyen en las propiedades de los compuestos verdes .....	7
1.3. Híbridos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales y sintéticas ...	15
1.3.1. Moldeo o conformado al vacío.....	16
1.4. Ensayos físicos, mecánicos y dinámicos de los materiales de ingeniería.....	19
1.4.1. Propiedades de ensayos mecánicos .....	20
1.4.2. Propiedades del Análisis Dinámico Mecánico .....	21
1.5. DOE – MSR y la caracterización de compuestos.....	26
1.5.1. Diseño de experimentos (DOE) .....	26
1.5.2. Caracterización de materiales mediante diseño de experimentos.....	28
1.5.3. Metodología de superficie de respuesta (MSR).....	29
1.6. Optimización de las propiedades mecánicas de materiales compuestos .....	31
1.6.1. Técnicas de optimización.....	31

1.6.2.	Optimización múltiple .....	33
1.7.	Justificación y Objetivos.....	35
1.7.1.	Justificación .....	35
1.7.2.	Objetivos.....	36
CAPÍTULO 2.....		39
2.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
2.1.	Materiales .....	39
2.1.1.	Matriz de resina epóxica (AEROPOXI PR2032 - PH3660) .....	39
2.1.2.	Refuerzo natural: fibra de chambira (Astrocaryum) .....	39
2.1.3.	Refuerzo sintético.....	40
2.1.4.	Insumos de conformado al vacío.....	41
2.2.	Metodología experimental aplicada.....	41
2.3.	Parámetros de configuración experimental del material (matriz de diseño) .	42
2.3.1.	Diseño MSR del material híbrido.....	43
2.3.2.	Matriz de diseño (configuraciones).....	44
2.4.	Preparación del material compuesto híbrido.....	47
2.4.1.	Elaboración del material híbrido .....	47
2.4.2.	Fracciones volumétricas del material híbrido .....	48
2.4.3.	Conformado del material híbrido .....	51
2.4.4.	Obtención de probetas o réplicas para la caracterización mecánica.....	53
2.5.	Técnicas experimentales.....	53
2.5.1.	Análisis Dinámico Mecánico (DMA) del material híbrido.....	53
2.5.2.	Caracterización mecánica .....	55
2.6.	Tratamiento de datos y análisis estadístico.....	56
CAPÍTULO 3.....		59
3.	RESULTADOS .....	59

3.1.	Propiedades de las fibras individuales.....	59
3.1.1.	Determinación de propiedades de fibras del híbrido .....	59
3.1.2.	Refuerzo natural – fibra de chambira (Astrocaryum) .....	59
3.1.3.	Refuerzos sintéticos – fibra de carbono, vidrio y Kevlar .....	60
3.2.	Resultados de la caracterización mecánica del híbrido.....	61
3.3.	Análisis descriptivo de resultados por tipo de moldeo .....	64
3.4.	Análisis de resultados de la caracterización DMA .....	69
3.5.	Análisis estadístico del esfuerzo máximo a la tracción.....	73
3.5.1.	Verificación de supuestos del esfuerzo máximo a la tracción .....	73
3.5.2.	Análisis de la varianza del esfuerzo máximo a la tracción .....	74
3.5.3.	Análisis de gráficos (Pareto y efectos).....	75
3.5.4.	Optimización individual del esfuerzo máximo a la tracción.....	76
3.6.	Análisis estadístico del módulo de tracción.....	77
3.6.1.	Verificación de supuestos del módulo de tracción .....	77
3.6.2.	Análisis de la varianza del módulo de tracción .....	77
3.6.3.	Análisis de gráficos (Pareto y efectos).....	79
3.6.4.	Optimización individual del módulo de tracción.....	80
3.7.	Análisis estadístico del porcentaje de elongación (%).....	81
3.7.1.	Verificación de supuestos del porcentaje de elongación.....	81
3.7.2.	Análisis de la varianza del porcentaje de elongación.....	81
3.7.3.	Análisis de gráficos (Pareto y efectos).....	82
3.7.4.	Optimización individual del porcentaje de elongación .....	84
3.8.	Análisis estadístico del esfuerzo a flexión .....	85
3.8.1.	Verificación de supuestos del esfuerzo a flexión .....	85
3.8.2.	Análisis de la varianza del esfuerzo a flexión .....	85
3.8.3.	Análisis de gráficos (Pareto y efectos).....	87

3.8.4.	Optimización individual del esfuerzo a flexión.....	88
3.9.	Análisis estadístico del módulo de flexión.....	89
3.9.1.	Verificación de supuestos del módulo de flexión .....	89
3.9.2.	Análisis de la varianza del módulo de flexión.....	89
3.9.3.	Análisis de gráficos (Pareto y efectos).....	90
3.9.4.	Optimización individual del módulo de flexión.....	92
3.10.	Análisis estadístico de la deflexión .....	93
3.10.1.	Verificación de supuestos de la deflexión .....	93
3.10.2.	Análisis de la varianza de la deflexión .....	93
3.10.3.	Análisis de gráficos (Pareto y efectos).....	94
3.10.4.	Optimización individual de la deflexión .....	96
3.11.	Análisis estadístico de la energía de impacto .....	96
3.11.1.	Verificación de supuestos de la energía de impacto.....	96
3.11.2.	Análisis de la varianza de la energía de impacto.....	97
3.11.3.	Análisis de gráficos (Pareto y efectos).....	98
3.11.4.	Optimización individual de la energía de impacto .....	100
3.12.	Optimización global de las propiedades mecánicas del híbrido en análisis..	101
3.12.1.	Análisis de la función de deseabilidad.....	101
3.12.2.	Gráficas de contorno y de superficie.....	104
CAPÍTULO 4.....		107
4.	CONCLUSIONES .....	107
4.1.	Respecto al diseño de experimentos aplicable .....	107
4.2.	Respecto a las propiedades mecánicas .....	107
4.3.	Respecto a la optimización de resultados .....	108
4.4.	Respecto a la calidad del modelo .....	109
Referencias Bibliográficas.....		110

## ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

FRP	Fiber-reinforced polymer (polímero reforzado con fibra)
NFC	Natural fiber composite (compuestos de fibra natural)
DMA	Dynamic mechanical analysis (análisis mecánico dinámico)
VIP	Vacuum infusion process (proceso de infusión al vacío)
DOE	Design of experiments (diseño de experimentos)
MSR	Metodología de superficie de respuesta
ANOVA	Analysis of variance (Análisis de varianza)
DCC	Diseño central compuesto
DBB	Diseño de Box-Behnken
Valor F	Significancia predefinida
Valor p	Significancia calculada
$Y_{ijklmn}$	Medición respecto a cada propiedad evaluada
$\mu$	Media global
$\alpha_i$	Variabilidad atribuible a la orientación de la primera capa de fibra de chambira
$\beta_j$	Variabilidad atribuible a la orientación de la segunda capa de fibra de chambira
$\gamma_k$	Variabilidad atribuible a la temperatura
$\delta_l$	Variabilidad atribuible al tipo de fibra sintética
$\zeta_m$	Variabilidad atribuible al tipo de moldeo
$\varepsilon_{ijklmn}$	Error atribuible a la medición $Y_{ijklmn}$
$R^2$	Coefficiente de determinación



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Aprovechamiento de la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) de compuestos en ingeniería.....	2
Figura 1.2. Compuestos clasificados por el tipo de refuerzo .....	3
Figura 1.3. Compuestos clasificados por el tipo de matriz.....	4
Figura 1.4. Resistencia a la tracción (MPa) vs. densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) de los FRP.....	5
Figura 1.5. Resistencia a la tracción vs. elongación de los FRP.....	5
Figura 1.6. Criterios de selección de materiales compuestos de fibra natural (NFC).....	8
Figura 1.7. Proceso de moldeo de bolsas de vacío [70]. .....	17
Figura 1.8. Técnicas de fabricación. [70] .....	18
Figura 1.9. Diseño de experimentos para revisar la influencia de factores.....	26
Figura 1.10. Técnicas para revisar la influencia de factores [108]. .....	27
Figura 1.11. Caracterización mediante diseño de experimentos (DOE). .....	29
Figura 1.12. Diseños en la metodología de superficie de respuesta [108]. .....	30
Figura 1.13. Comparación entre técnicas de optimización, considerando varios diseños en la metodología de superficie de respuesta [119], [120]. .....	31
Figura 1.14. Optimización global de propiedades mecánicas.....	34
Figura 2.1. Refuerzos sintéticos empleados.....	40
Figura 2.2. Proceso de tratamiento y análisis de datos. ....	57
Figura 3.1. Gráficas comparativas de la caracterización mecánica y DMA. ....	70
Figura 3.2. Gráfica de la Tan(delta), los módulos elástico y viscoso para el caso S2. ....	70
Figura 3.3. Gráfica de la tan(delta), los módulos elástico y viscoso para el caso S3.....	71
Figura 3.4. Gráfica de la tan(delta), los módulos elástico y viscoso para el caso S11....	71
Figura 3.5. Gráfica de la tan(delta), los módulos elástico y viscos para el caso S13. ....	72
Figura 3.6. Gráfica de la tan(delta), los módulos elástico y viscoso para el caso S12. ....	72

Figura 3.7. Gráfica de la $\tan(\delta)$ , los módulos elástico y viscoso para el caso S14....	73
Figura 3.8. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del esfuerzo a tracción. ....	75
Figura 3.9. Gráfica de efectos principales para el esfuerzo a tracción.....	75
Figura 3.10. Gráfica de efectos principales para el esfuerzo a tracción.....	76
Figura 3.11. Diagrama de Pareto: efectos estandarizados del módulo de tracción. ....	79
Figura 3.12. Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad a tracción...	79
Figura 3.13. Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad a tracción...	80
Figura 3.14. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de la elongación. ....	83
Figura 3.15. Gráfica de efectos principales para la elongación.....	83
Figura 3.16. Gráfica de efectos principales para la elongación.....	84
Figura 3.17. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del esfuerzo a flexión ....	87
Figura 3.18. Gráfica de efectos principales para el esfuerzo a flexión.....	87
Figura 3.19. Gráfica de efectos principales para el esfuerzo a flexión.....	88
Figura 3.20. Diagrama de Pareto: efectos estandarizados del módulo de flexión. ....	91
Figura 3.21. Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad a flexión. ....	91
Figura 3.22. Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad a flexión.....	92
Figura 3.23. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de la deflexión .....	95
Figura 3.24. Gráfica de efectos principales para la deflexión. ....	95
Figura 3.25. Gráfica de efectos principales para la deflexión. ....	96
Figura 3.26. Diagrama de Pareto: efectos estandarizados de energía de impacto. ....	99
Figura 3.27. Gráfica de efectos principales para la energía media de fallo. ....	99
Figura 3.28. Gráfica de efectos principales para la energía media de fallo. ....	100
Figura 3.29. Contribución de cada fuente de variabilidad de la deseabilidad global. .	103

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.1. Parámetros de selección de un material compuesto .....	9
Tabla 1.2. Estudios de caracterización de materiales compuestos.....	23
Tabla 2.1. Parámetros de entrada para la configuración experimental. ....	42
Tabla 2.2. Matriz de diseño de Box-Behnken para tres factores. ....	43
Tabla 2.3. Matriz de diseño con los cinco factores de estudio. ....	44
Tabla 2.4. Peso de cada componente del material compuesto híbrido.....	49
Tabla 2.5. Fracciones volumétricas de los refuerzos y la matriz. ....	51
Tabla 2.6. Casos de apilamiento del material híbrido para DMA.....	54
Tabla 3.1. Determinación de la densidad del tejido de fibra de chambira. ....	59
Tabla 3.2. Determinación de propiedades mecánicas a tracción - fibra de chambira...	59
Tabla 3.3. Determinación de la densidad de la fibra de carbono. ....	60
Tabla 3.4. Determinación de la densidad de la fibra de vidrio.....	60
Tabla 3.5. Determinación de la densidad de la fibra de Kevlar. ....	61
Tabla 3.6. Medias de los resultados de los ensayos.....	61
Tabla 3.7. Estadísticos descriptivos de resultados. ....	64
Tabla 3.8. Intervalos de propiedades mecánicas, por tipo de moldeo y fibra.....	66
Tabla 3.9. Comparación entre caracterización mecánica y el DMA.....	69
Tabla 3.10. Verificación de supuestos en datos del esfuerzo máximo a la tracción.....	73
Tabla 3.11. Análisis de la varianza del esfuerzo a tracción. ....	74
Tabla 3.12. Optimización individual para el esfuerzo a tracción.....	76
Tabla 3.13. Verificación de supuestos en datos del módulo de elasticidad a tracción..	77
Tabla 3.14. Análisis de la varianza del módulo de elasticidad a tracción.....	78
Tabla 3.15. Optimización individual para el módulo de elasticidad a tracción.....	80

Tabla 3.16. Verificación de supuestos en datos de la elongación.....	81
Tabla 3.17. Análisis de la varianza de la elongación.....	82
Tabla 3.18. Optimización individual para la elongación.....	84
Tabla 3.19. Verificación de supuestos en datos del esfuerzo máximo a la tracción.....	85
Tabla 3.20. Análisis de la varianza del esfuerzo a flexión.....	86
Tabla 3.21. Optimización individual para el esfuerzo a flexión.....	88
Tabla 3.22. Verificación de supuestos en datos del esfuerzo máximo a la tracción.....	89
Tabla 3.23. Análisis de la varianza del módulo de elasticidad a flexión.....	90
Tabla 3.24. Optimización individual para el módulo de elasticidad a flexión.....	92
Tabla 3.25. Verificación de supuestos en datos de la deflexión. ....	93
Tabla 3.26. Análisis de la varianza de la deflexión. ....	94
Tabla 3.27. Optimización individual para la deflexión. ....	96
Tabla 3.28. Verificación de supuestos en datos de la energía de impacto. ....	97
Tabla 3.29. Análisis de la varianza de la energía media de fallo. ....	97
Tabla 3.30. Optimización individual para la energía media de fallo. ....	100
Tabla 3.31. Optimización global. ....	101
Tabla 3.32. Análisis de la varianza de la deseabilidad global. ....	102
Tabla 3.33. Gráficas de contorno y de superficie de la deseabilidad global.....	105

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Actualmente las investigaciones de nuevos materiales de ingeniería se encuentran en constante desarrollo, debido a que, las diferentes industrias han evolucionado en el diseño, manufactura, tratamientos internos y superficiales de los productos. Por ello, ha sido necesario responder a estas necesidades desafiando a la academia y sus investigadores, quienes han tomado el camino para desarrollar modelos matemáticos y estadísticos. Además, se ha promovido la formulación de métodos que permitan generar nuevas formas de obtención, fabricación y optimización de nuevos materiales. Otro factor importante que ha impulsado el estudio de nuevas formas de desarrollo de materiales, es la demanda de mejores características o propiedades físicas y mecánicas, es decir productos de alta calidad, bajo peso y menor costo [1].

La industria ha conseguido mediante el desarrollo de nuevos materiales, sustituir a materiales tradicionales como el acero, bronce, aluminio, entre los más comunes. Todos ellos de gran importancia, pero con limitantes como alto costo, peso y complejo proceso de obtención. La búsqueda de nuevos materiales, parte en proponer la combinación de dos o más materiales, conocidos comúnmente como material compuesto [2]. Los materiales compuestos pueden tener excelentes propiedades mecánicas como alta resistencia específica, alta rigidez y alta estabilidad dimensional, por lo que son ampliamente utilizados en las industrias aeroespacial, automotriz, de la construcción [3]. Grandes industrias como la aeroespacial, automotriz, estructural, carrocería, deportiva, entre otras, han enmarcado su producción con materiales compuestos avanzados [2], [4] de matriz polimérica y reforzados con fibras sintéticas y naturales.

Las primeras aplicaciones de estructuras compuestas que se investigaron buscaban mejorar el rendimiento de fractura de estructuras laminadas, y se aplicaron en la industria aeronáutica. Posteriormente, estas investigaciones se ampliaron a muchos otros campos, como el automotriz y de la construcción [5]. En los últimos tiempos, los materiales compuestos también se han utilizado para aplicaciones cotidianas y juegan un papel

importante en la fabricación de maquinaria avanzada. Los compuestos tienen muchas ventajas sobre los materiales convencionales y, a menudo, incluyen materiales similares, simples, rentables que facilitan el aligeramiento de los mismos como se muestra en la Figura 1.1 [6].

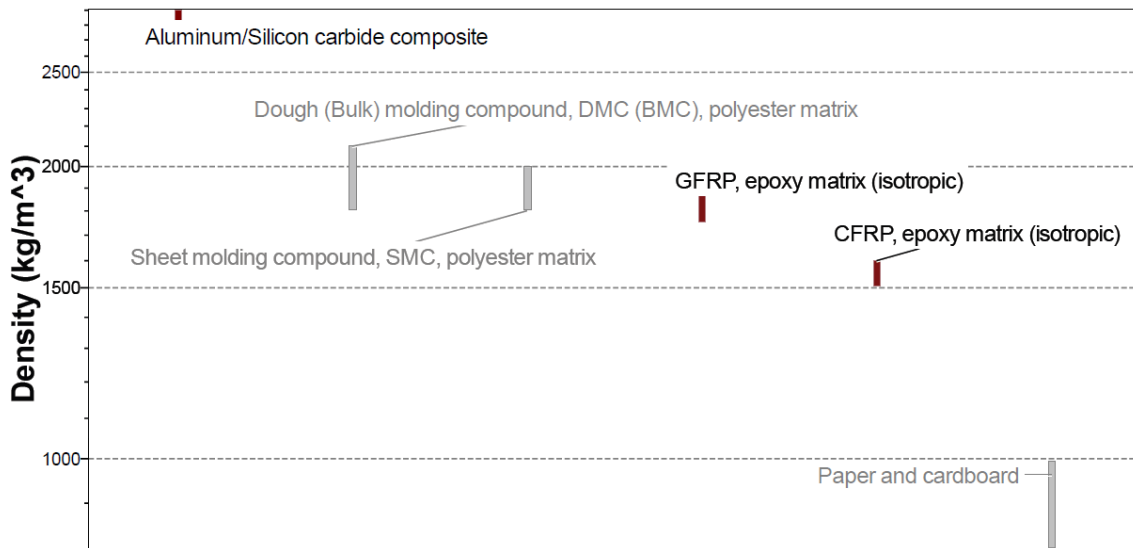


Figura 1.1. Aprovechamiento de la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) de compuestos en ingeniería.

Cabe mencionar que existen otras aplicaciones en la industria de materiales compuestos, en función del tipo de refuerzo. Así, por ejemplo, compuestos reforzados con partículas, en los que se busca establecer la resistencia al impacto del material y mejorar su comportamiento con la adición de partículas [7]; así como también la reducción de fallas por fatiga [8]. Como se puede evidenciar, una de las particularidades que se perciben en las investigaciones, es el tipo de refuerzo empleado; ya que, tanto los refuerzos de fibra como los refuerzos particulados, pueden sustentar requerimientos del material en aplicaciones de ingeniería.

### 1.1. Materiales compuestos ecológicos, verdes o green composites

El material compuesto es una combinación de dos o más materiales en escala macroscópica, sin reacción química. Esta combinación tiene propiedades mejores o incluso nuevas que las de los constituyentes individuales. Los composites son de dos fases, una de ellas se conoce como refuerzo y la otra fase es la matriz [9].

Investigadores de materiales compuestos e híbridos están tratando de integrar materiales amigables con el medio ambiente para una aplicación avanzada con la necesidad de proyectar positivamente la conciencia de los materiales ecológicos con un mejor rendimiento del ciclo

de vida [10]. En este sentido, las fibras naturales en los compuestos se están convirtiendo en una alternativa a muchas de las fibras sintetizadas químicamente dominantes desde la década de 1990. En las Figura 1.2 y 1.3, se muestra la clasificación de los compuestos, y se evidencia dos grupos, el tipo de refuerzo y el tipo de matriz. De acuerdo con el tipo de refuerzo, los compuestos se clasifican como se esquematiza en la Figura 1.2.

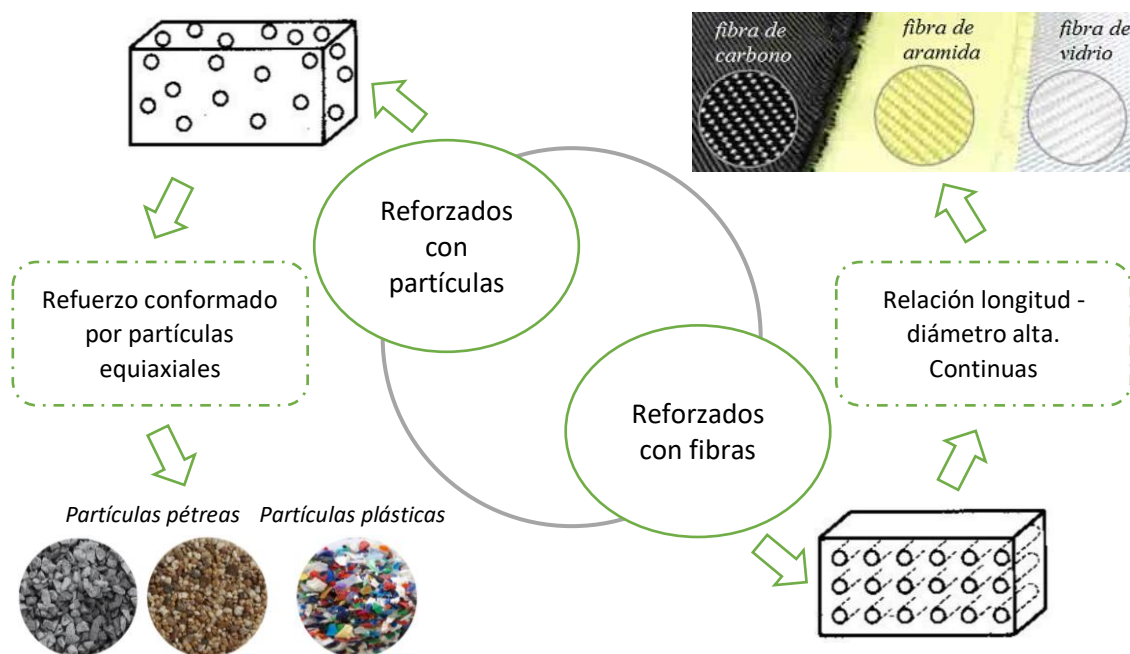


Figura 1.2. Compuestos clasificados por el tipo de refuerzo

Por otro lado, se tienen investigaciones como la de Cerbu en la que se estudian compuestos híbridos reforzados con fibras vegetales y de vidrio. Allí se enfatiza los efectos de la temperatura en las propiedades de tracción de cinco tipos de compuestos del material en mención [11]. Además, se revisa otras propiedades como el coeficiente de amortiguamiento de un material compuesto de fibras no tejidas de lino, cáñamo, kenaf y polipropileno [12].

En base al tipo de matriz, los compuestos se clasifican como se indica en la Figura 1.3. La combinación con polímeros produce buenos componentes, ya que pueden procesarse convenientemente. Los compuestos de matriz polimérica ofrecen una amplia variedad de propiedades, tales como una alta resistencia, excelente energía de absorción al impacto, resistencia a compresión, propiedades de fatiga, procesos rentables de producción, excelente resistencia química y corrosión, bajo costo y buenas propiedades mecánicas [13]. Por otra parte, los compuestos de matriz metálica, llegan a ser sustituto perfecto de costosas

aleaciones convencionales utilizadas tanto para aplicaciones estructurales y funcionales, debido a sus propiedades mecánicas sobresalientes [13]. Los compuestos de matriz cerámica tienen como principal inconveniente las fallas ante un bajo esfuerzo, lo que restringe el esfuerzo en la fibra a niveles más bajos. Tienen un módulo razonablemente alto y una ductilidad más baja que protege contra el ajuste de los esfuerzos térmicos de cualquier tipo de variación en la expansión térmica [14].

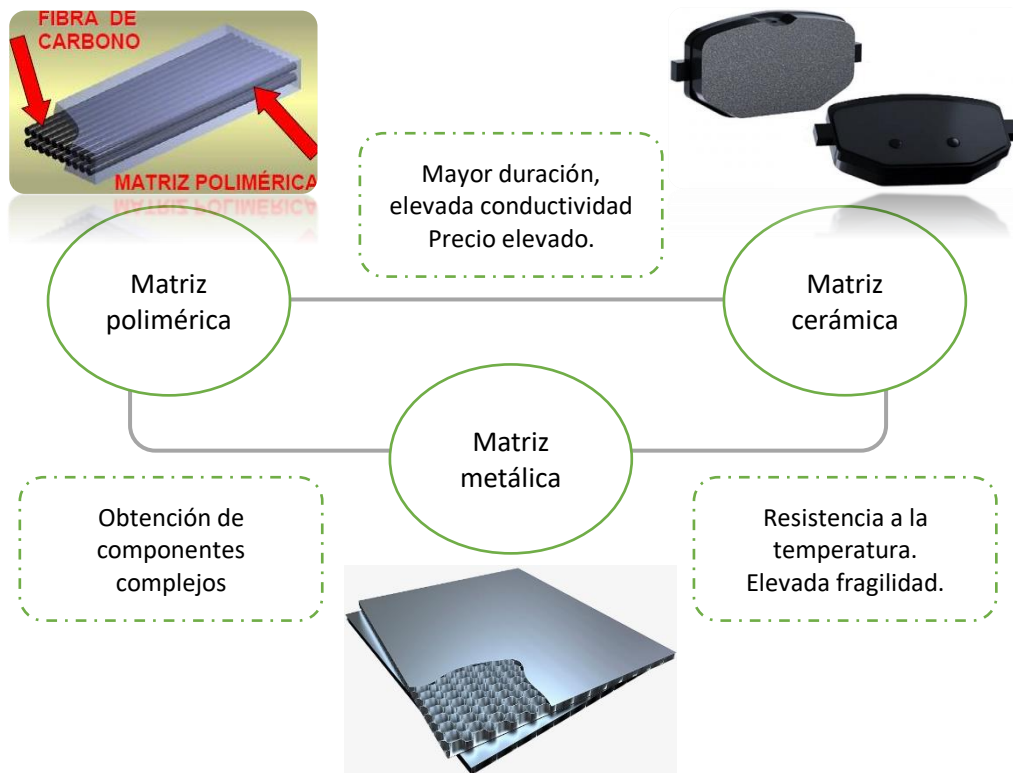


Figura 1.3. Compuestos clasificados por el tipo de matriz.

Entre los compuestos de mayor aplicación están los polímeros reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés). Por su diseño, rendimiento y durabilidad, los FRP se enmarcan en un contexto de construcción sostenible [15]. Adicionalmente, la matriz polimérica hace que estos materiales sean ampliamente combinables con distintos tipos de fibras. Revisando la información de las Figuras 1.4 y 1.5, se puede corroborar lo antes descrito. El amplio uso de los FRP está ligado a la versatilidad de los materiales compuestos, ya que estos abarcan rangos amplios de resistencia, de densidad y de elongación.



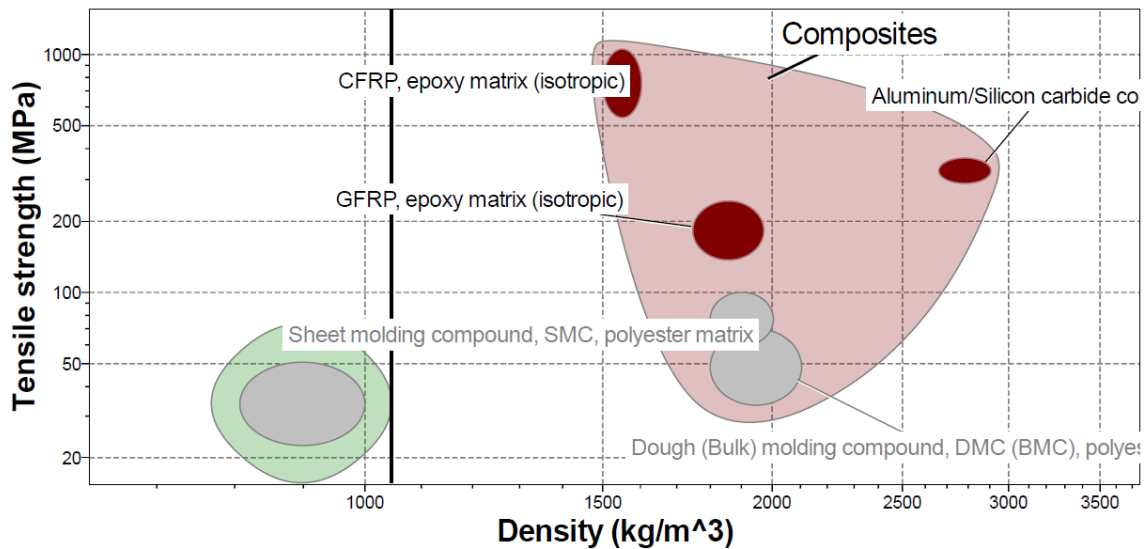


Figura 1.4. Resistencia a la tracción (MPa) vs. densidad (kg/m<sup>3</sup>) de los FRP.

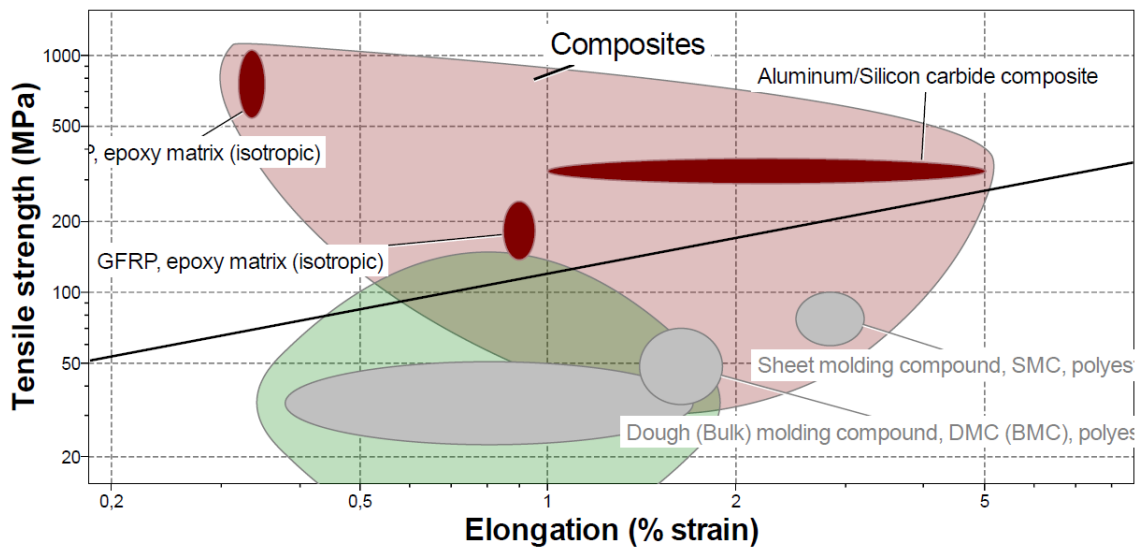


Figura 1.5. Resistencia a la tracción vs. elongación de los FRP.

### 1.1.1. Compuestos de matriz polimérica reforzada con fibras

En estos materiales, la matriz mantiene las fibras en el lugar adecuado y les transfiere las cargas. La matriz también protege la fibra del medio ambiente y del daño debido a la manipulación. Los polímeros reforzados con fibras son capaces de alcanzar una resistencia similar y hasta superior a la de los materiales base. Estos compuestos se clasifican en dos tipos, de fibra continua (larga) y de fibra discontinua (corta). Estos son más rígidos y resistentes en comparación con la matriz. Se subdivide en dos categorías importantes: (i) refuerzo unidireccional y (ii) refuerzo bidireccional [16].

El desarrollo reciente de materiales ha traído consigo un crecimiento en el uso de fibras naturales como refuerzo en matrices termoestables y termoplásticos, debido a propiedades tales como resistencia, rigidez específica y buen rendimiento de fatiga. Los compuestos poliméricos reforzados con fibra tienen más aplicaciones en áreas estructurales y no estructurales. El uso de fibras naturales ha concitado más interés entre los investigadores debido a su fácil disponibilidad y su naturaleza ecológica [17].

Los productos finales elaborados a partir de compuestos de fibra natural (NFC, por sus siglas en inglés) son fabricados para satisfacer las características deseadas siempre y cuando se mejoren las propiedades físicas de los productos a través de un proceso eficaz de selección de materiales. Teniendo en cuenta la preocupación por los problemas de impacto ambiental, la necesidad de producir productos ambientalmente útiles y la escalada de los precios del petróleo. Esto integrado con el tema de la sostenibilidad industrial y la producción limpia, la sinergia entre los recursos naturales disponibles, así como los desechos y la industria sostenible, actualmente es un tema de análisis e investigación mundial [18]. Esto ha llevado a un uso cada vez mayor de NFC en industrias tales como la automotriz, la construcción de edificios y la industria del mueble. Además, los NFC tienen atributos como la disponibilidad de producirlos en los campos desde la industria agroindustrial a un costo favorable [18].

### **1.1.2. Hibridación de fibras**

Se entiende por hibridación a la incorporación de más de un tipo de fibra individual con el fin de obtener propiedades o características mejoradas, que lleguen a superar a las propiedades de las fibras base (natural o sintética). Así, por ejemplo, la combinación de fibras naturales, tales como sisal y yute, con fibra de vidrio, mejora las propiedades de tracción y flexión. Además, el compuesto híbrido tiene un mejor desempeño comparado con compuestos reforzados únicamente con fibras naturales [19]. Se entiende que el compuesto híbrido aumenta la resistencia mecánica y también aumenta la capacidad de resistencia a la humedad de la fibra.

Algunas de las aplicaciones más relevantes de los materiales compuestos híbridos están en la aeronáutica, generación de energía eólica, en el área de la construcción, compuestos híbridos de memoria inteligente, aplicaciones marinas, aplicaciones termoplásticas híbridas y

aplicaciones de vehículos y aeronaves comerciales [2], [12]. A manera de ejemplo, las aeronaves requieren una mayor presión sobre la seguridad y el peso, lo que podría lograrse mediante el uso de materiales híbridos con elevadas propiedades específicas [17]. Propiedades obtenidas de la combinación de fibras y materiales base que por sí solos no logran ciertas características.

## **1.2. Parámetros que influyen en las propiedades de los compuestos verdes**

La facilidad de adquisición, así como la variedad de fuentes de fibras naturales, marcan notables diferencias en las características de las fibras. Esto afecta en la selección para diversas aplicaciones industriales [18]. Además, el rendimiento de los productos fabricados con NFC depende de muchos factores internos y externos, comenzando por las características de sus componentes y su compatibilidad, pasando por criterios económicos y ambientales integrados. A pesar de eso, la selección de fibras naturales y polímeros para los compuestos de fibras naturales todavía depende de formas de selección vinculados netamente a juicios personales. Estos criterios de evaluaciones son limitados, como el costo, la disponibilidad, las propiedades mecánicas de las fibras, la resistencia química, las propiedades mecánicas, el costo y facilidad de fabricación de los polímeros [18].

El enfoque tradicional en el campo de los NFC es desarrollar algunos compuestos y luego investigar experimentalmente su comportamiento mecánico, físico y de otro tipo para determinar su idoneidad en una industria en particular [18]. Existe una necesidad real de realizar estudios de comparación de las NFC en función de diferentes criterios que influyan en su proceso de selección adecuado para una aplicación en particular. Los estudios comparativos existentes se realizaron en base a criterios limitados (centrándose únicamente en las propiedades mecánicas y el costo) y no se realizaron de manera exhaustiva.

El rendimiento de los productos fabricados con NFC está influenciado por varios factores y criterios internos y externos. Por ello, es preciso revisar la clasificación sistemática de los factores que afectan al proceso de selección de materiales para NFC [20].



Figura 1.6. Criterios de selección de materiales compuestos de fibra natural (NFC).

Es importante determinar las diferentes propiedades de los NFC para que puedan ser considerados candidatos para una aplicación específica mediante el estudio de las propiedades de las matrices poliméricas y las fibras naturales. Así también sus condiciones de procesamiento, como se indican en la Tabla 1.1, donde se revisan los criterios más importantes para la selección de compuestos en general [18].

Se revisaron los parámetros del proceso (por ejemplo, la presión aplicada, la temperatura y el tiempo) en el movimiento de las burbujas durante el avance del grado de impregnación desde la colocación inicial de la resina en preimpregnados y parcialmente impregnados. Esto para hacer que las burbujas de aire alcancen a unirse y fusionarse con las vías de aire disponibles para escapar del laminado [21]. Lo cual está íntimamente relacionado con los vacíos que se forman en el material compuesto, que afecta significativamente las propiedades del material.

Tabla 1.1. Parámetros de selección de un material compuesto

Categoría	Propiedades / características	Criterios	Estudio	Referencia
Propiedades de la fibra natural	Físicas	Densidad, textura, forma y geometría, topología superficial, coeficiente de expansión térmica, calor específico, conductividad térmica, conductividad eléctrica, coeficiente de absorción acústica	Temperatura de trabajo, humedad de la fibra de banano	Laxshaman Rao et al. [22]
			Geometría de la fibra de nuez de betel	Borah & Dutta [23]
			Estabilidad térmica de la fibra celulósica híbrida	Krishnasamy et al. [24]
	Químicas y Biológicas	Calidad del lote, composición química, disponibilidad, escasez de recursos, emisión extraña, consistencia de la calidad del lote, limitaciones de plantación, velocidad de combustión	Composición química de fibras naturales	Karimah et al. [25]
			Constituciones químicas, contenido de celulosa en fibras de Acacia arabica	Manimaran et al. [26]
			Contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina en la combustión de fibras naturales	Dorez et al. [27]
	Mecánicas	Límite elástico, módulo de elasticidad específico, módulo elástico, módulo de corte, relación de Poisson, límite elástico	Capacidad de tracción de fibras naturales y sintéticas de refuerzo	Ahmad et al. [28]

<b>Categoría</b>	<b>Propiedades / características</b>	<b>Criterios</b>	<b>Estudio</b>	<b>Referencia</b>
		específico, alargamiento hasta la rotura, módulo de corte específico.	Propiedades mecánicas de fibras de banyan y fibras de banano	Prabhakar et al. [29]
			Comportamiento ante la vibración en fibras naturales	Pawar & Joshi [30]
	Técnicas	Consumo de energía de procesamiento, conocimiento y tiempo de procesamiento, procesamiento amigable, costos asociados a la fibra.	Extracción, costo de fibras naturales como el yute, el sisal, el plátano, etc.	Jaiswal et al. [31]
			Costos para la fabricación fibras naturales y sintéticas	Shahinur [32]
	Ambientales	Biodegradabilidad, ecológico, apoyo gubernamental, socialmente positiva	Contaminación ambiental de fibras naturales	Redd et al. [33]
			Biodegradación de telas vegetales	Marczak et al. [34]
			Impacto ambiental de fibras vegetales	Al-Maharma et al. [35]
Propiedades del polímero base	Físicas	Calor específico, conductividad eléctrica, conductividad térmica, coeficiente de calor expansión, reflectividad, opaco.	Estudio de la conductividad eléctrica y térmica de materiales de base termoplástica	Kumar [36]

Categoría	Propiedades / características	Criterios	Estudio	Referencia
			Transferencia de calor de materiales de matrices poliméricas	Fang et al. [37]
	Químicas	Estabilidad térmica, densidad, inflamabilidad, peso molecular (longitud de la cadena)	Comportamiento viscoelástico ante una matriz polimérica	Spiesschaert et al. [38]
			Influencia del peso molecular de la matriz polimérica en las propiedades eléctricas	Al-Abbas et al. [39]
	Mecánicas	Módulo de corte, tenacidad a la fractura, límite elástico, módulo elástico, relación de Poisson, alargamiento a la rotura, dureza	Estudio de dureza y la resistencia a la tracción de una matriz metálica	Kumar & Ruban [40]
			Propiedades mecánicas y análisis microestructural de matriz de carburo de silicio.	Mhaske & Shirsat [41]
	Ambientales	Contenido de energía, resistencia a la intemperie, temperatura de servicio, comportamiento térmico (fusión o degradación)	Estudio del transporte de calor y los puntos de fusión en parafina	Li et al. [42]
	Otras	Toxicidad, propiedades de aditivos y modificadores, precio, comportamiento	Matriz de biopolímero con refuerzos de nanoarcilla para alimentos	Dharini et al. [43]

<b>Categoría</b>	<b>Propiedades / características</b>	<b>Criterios</b>	<b>Estudio</b>	<b>Referencia</b>
		termoestable o termoplástico, atributos estéticos, abrasión	Resistencia a la abrasión del hormigón	Li et al. [44]
	Físicas	Topología de la superficie, rugosidad de la superficie, densidad total, textura, color y estética, coeficiente de expansión térmica, conductividad eléctrica, opacidad y translucidez, calor específico, índice de reflexión	Análisis de translucidez y potencial de curado de matriz de resina para bloques	Eiras Pereira et al. [45]
Características del compuesto	Químicas y Biológicas	Comportamiento de biodegradabilidad, toxicidad, reciclabilidad, almacenamiento, bioestabilidad, vida útil	Desafíos y oportunidades en el reciclaje de compuestos de polímeros y fibras naturales	Zhao et al. [46]
		tiempo de ciclo, resistencia a la intemperie, resistente a la luz solar y a los rayos UV, comportamiento de absorción de agua, posibilidad de reciclaje térmico	Absorbencia de agua y la degradabilidad de un compuesto de almidón de maíz y alcohol polivinílico y fibra de coco	Afzal et al. [47]
	Mecánicas/ Estructurales	Relación de Poisson, módulo elástico, resistencia al impacto, límite elástico, resistencia a la compresión, módulo de corte, resistencia a la fatiga, módulo de flexión, alargamiento, tenacidad, resistencia a la fluencia, dureza	Propiedades mecánicas de los compuestos híbridos epoxi con fibra de plátano y sisal Características a tracción y flexión de un compuesto verde de ácido láctico y	Ramanan et al. [48] Ketata et al. [49]



Categoría	Propiedades / características	Criterios	Estudio	Referencia
			succinato de butileno, con fibras largas de lino	
	Técnicas	Conocimiento, costos, tiempo de fabricación, reproducibilidad, calidad del producto, estabilidad térmica, empaque, parámetros del proceso, secundaria procesabilidad, nivel de automatización	Técnicas de producción para mejorar las propiedades de compuesto a base de fibras y matriz polimérica	Melese et al. [50]
			Evaluación del ciclo de vida y análisis de costos en materiales compuesto de fibra de vidrio	Akhshik et al. [51]
		Comportamiento de contracción, biodegradación comportamiento, ciclo de vida, comportamiento al fuego, propiedad de aislamiento, orientación de la fibra, estabilidad dimensional, contenido de volumen de fibra, comportamiento de amortiguación, fuerza de adhesión mejora (entre fibra y matriz), ruido de contacto, facilidad de manejo, resistencia a microorganismos, unión, facilidad de construcción en campo, calidad de rugosidad superficial, maquinabilidad	Evaluación adhesión interfacial de un compuesto de fibras de carbono recubiertas de termoplástico	Su et al. [52]
Rendimiento general	Mecánicas		Mejora de la adhesión interfacial del compuesto de fibras de basalto	Preda et al. [53]

<b>Categoría</b>	<b>Propiedades / características</b>	<b>Criterios</b>	<b>Estudio</b>	<b>Referencia</b>
	Ambiental	Posibilidad de mejorar rendimiento a través de modificaciones de propiedades, durabilidad, emisiones de CO <sub>2</sub> , comportamiento de absorción de agua, abrasión, tendencia a reventar, empañamiento, efectos de temperatura, aprobación para uso con alimentos.	Diseño óptimo considerando la mínima emisión de CO <sub>2</sub> y el calor de hidratación, y la máxima resistividad	Lin et al. [54]
			Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero con compuestos de nanotubos de carbono	Licht et al. [55]
Rendimiento específico	Requisitos específicos basados en la función aplicación deseada	Propiedades de aislamiento térmico, facilidad de mantenimiento, peso total, propiedades de aislamiento acústico, salud y seguridad ocupacional, o comportamiento de colisión, impacto social, buena resistencia a las microfisuras, baja rasgadura, resistencia al manchado.	Aislamiento térmico de un material compuesto de racimo vacío de palma aceitera y fibras de bagazo de caña de azúcar	Ramlee et al. [56]
			Estudio del aislamiento acústico en compuestos a base de textiles reciclados.	Islam & Bhat [57]

### **1.3. Híbridos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales y sintéticas**

Las fibras de carbono son comúnmente utilizadas para la preparación de compuestos poliméricos, los cuales presentan ventajas excepcionales en relación resistencia-peso y afectan a las propiedades mecánicas a través de su forma, orientación, variación de contenido, etc. Estos materiales son ampliamente empleados en los campos de defensa nacional, la industria aeronáutica, así como en áreas civiles, automóviles, estructural, información electrónica y maquinaria de alta velocidad [58], [59].

A medida que aumenta el contenido de fibra, mejoran las propiedades mecánicas. La resistencia depende de la unión fibra-matriz, las propiedades de cada fibra, la cantidad de microporos y el proceso de fabricación, entre otros [58]. Según Muralidhara et al., en compuestos bidireccionales de fibra de carbono/epoxi, variando el tipo de moldeo y/o conformado manual y al vacío, muestra un efecto importante de la arquitectura o tipo de tejido de la fibra en las propiedades mecánicas, dando muy buen efecto de mejora tanto en la carga de tracción como en la de flexión, no así con la densidad [58].

Se recurre a la hibridación de materiales debido a que la combinación de dos o más materiales constituyentes con propiedades físicas y químicas significativamente diferentes permite realizar una tarea que ninguno de los constituyentes puede lograr por sí solo [60]. Tal es el caso que, la fibra natural tiene potencial para ser utilizada en aplicaciones de exterior mediante hibridación para mejorar sus propiedades [9]. Además, son materiales que tienen la característica de ser biodegradables [61]. También, dentro del desarrollo de materiales en los que se aprovechen las propiedades mecánicas y el costo del producto mediante la optimización de la composición, el método de procesamiento y los tratamientos [62], se ha observado que las propiedades mecánicas aumentan al hibridar el vidrio y una fibra natural [63]. Además, la hibridación de fibra de vidrio con fibra de carbono mejora la resistencia a la flexión, el módulo de flexión y las propiedades específicas al desgaste, en comparación con el compuesto de fibra de vidrio simple [64].

Se tiene que, trabajando con termoplásticos reforzados con fibra de lino para astilleros navales, se determinó que los mejores parámetros de temperatura y tiempo se

encuentran a 180 °C durante 45 min, resultando una fracción de volumen de fibra de  $42,2\pm 1,5\%$ , esto entre  $1,9\pm 0,7\%$  y  $8,2\pm 1,8\%$  de porosidad [65]. Se entiende que una variación de temperatura y de tiempo de curado es relevante para materiales que emplean fibras naturales, en este caso de lino.

El desarrollo de materiales híbridos abarca muchas aplicaciones y da paso a estudios en distintos campos. Tal es el caso de la investigación en la que se genera un compuesto de polipropileno reforzado con fibra de lino, en el que se varía la orientación de la fibra para evaluar los distintos niveles de amortiguación de las vibraciones. En este trabajo se encontró una variación significativa en las orientaciones de 45°, 60° y 90° de la fibra de lino [66]. En otra investigación en la que, al igual que el trabajo anterior, se varía la orientación del refuerzo en una muestra, pero esta vez con el objetivo de evaluar el comportamiento a tracción del material. Se señala que, tras evaluar el compuesto de carbono/epoxi a [+45/-45], [0/90] y [0/90 combinación 45/-45], se evidencia una mejora en la resistencia a la tracción [67].

Contrastando el comportamiento de un material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica, se revisa un artículo en el que describen que la resistencia a la tracción del material de carbono-epoxi coincide aproximadamente con la resistencia del acero empleado en resortes. Es así que, el resorte elaborado con el material de carbono-epoxi, posee propiedades mecánicas compatibles con el acero para resortes, sin embargo el primero mantiene un peso menor [68]. Los resultados obtenidos con la investigación evidencian una de las ventajas de los compuestos sobre materiales usualmente usados como el acero. Otro punto a considerar respecto a los materiales híbridos, es que, se invierte una cantidad considerablemente menor de energía para procesar un compuesto de fibra de lino, alrededor del 75%, respecto a un compuesto reforzado con fibra de vidrio [69].

### **1.3.1. Moldeo o conformado al vacío**

El moldeo usando bolsas de vacío consiste en crear presión sobre un laminado durante el ciclo de curado. La presurización del laminado cumple varias funciones, tales como remover el aire atrapado entre las capas, compactar el refuerzo por transmisión de

fuerzas, evita que la orientación del laminado se modifique, reducir la humedad y optimizar las relaciones refuerzo/matriz en los compuestos. La idea global es colocar una película delgada y flexible de nailon, PVA o polietileno sobre la capa de fibra sintética o natural previamente humectada, como se muestra en la Figura 1.4. En la práctica se ubica el refuerzo, se sellan los bordes y se monta la bolsa de vacío en un molde [70]. Detallando de mejor manera, en este método de conformado se controla parámetros tales como la presión, el número de capas y el tipo de resina [71]. Se prevé además un control de porosidad, zonas secas o ricas en resina o arrugamiento de la fibra para homogeneizar el espesor del compuesto [72]. Uno de los parámetros de mayor control dentro del proceso de moldeo en bolsas de vacío es la deformación del compuesto, debido a un fenómeno denominado fuga térmica, lo que adicionalmente puede provocar degradación de la matriz polimérica y de la interfaz fibra - matriz [73], [74].

Una de las ventajas evidentes de emplear métodos de conformado al vacío es la de evitar vacíos en las estructuras finas. Esto se debe a que la resina y el agente de curado mezclados con una proporción específica se infunden en el molde con la ayuda de la bomba de vacío [75]. En comparación con el laminado manual, el embolsado al vacío mostró mejoras en la resistencia a la tracción en un 6%, módulo de tracción/flexión en un 15%, ILSS en un 6%, resistencia al impacto en un 20% y dureza en un 3% [58].

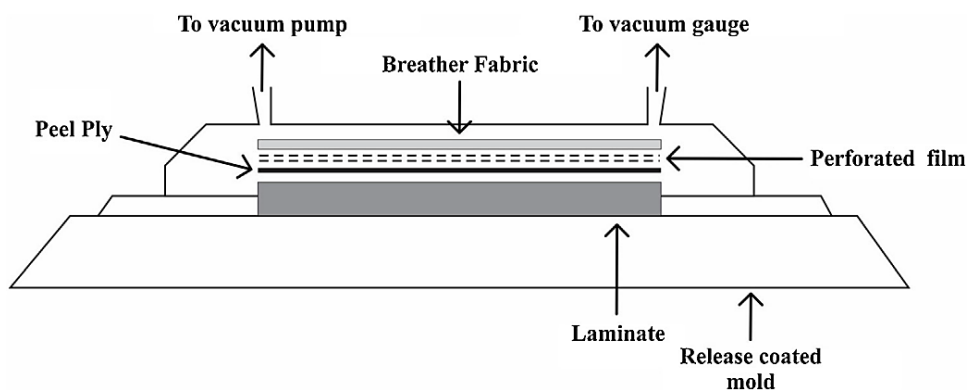


Figura 1.7. Proceso de moldeo de bolsas de vacío [70].

En la investigación de Moreira Arouche se puede constatar que el proceso de fabricación afectó el desempeño de los especímenes, la técnica de conformado al vacío produjo una mejor compactación de fibra/matriz [5]. Reddy et al., aseguran que la tecnología de embolsado al vacío mejora las características de los materiales compuestos en

comparación con el laminado manual [76]. Estos autores emplearon en la matriz del compuesto polimérico una mezcla epoxi Lapox L-12 y endurecedor H6 en peso de 10:1.

El contenido de vacíos se evaluó en muestras para ensayos de flexión de 3 puntos y se correlacionó con los resultados de la prueba. La resistencia a la fatiga aumenta con la disminución del contenido de vacíos [77]. Debido a la calidad del material y la geometría, hubo una buena respuesta mecánica en la fabricación y los experimentos realizados. El conformado al vacío proporciona compuestos sin porosidad y sin defectos, de alta calidad cuando se utilizan vías de espesor total y formato preimpregnado [78].

Se ha realizado muy poco trabajo experimental en compuestos de carbono/epoxi considerando varios grados de tejido de fibra de carbono utilizando laminado manual seguido de moldeo con bolsa de vacío. Hay muchas posibilidades de mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos utilizando varias estructuras de tejido de sarga [58]. En la Figura 1.8 se evidencian distintas técnicas de fabricación.

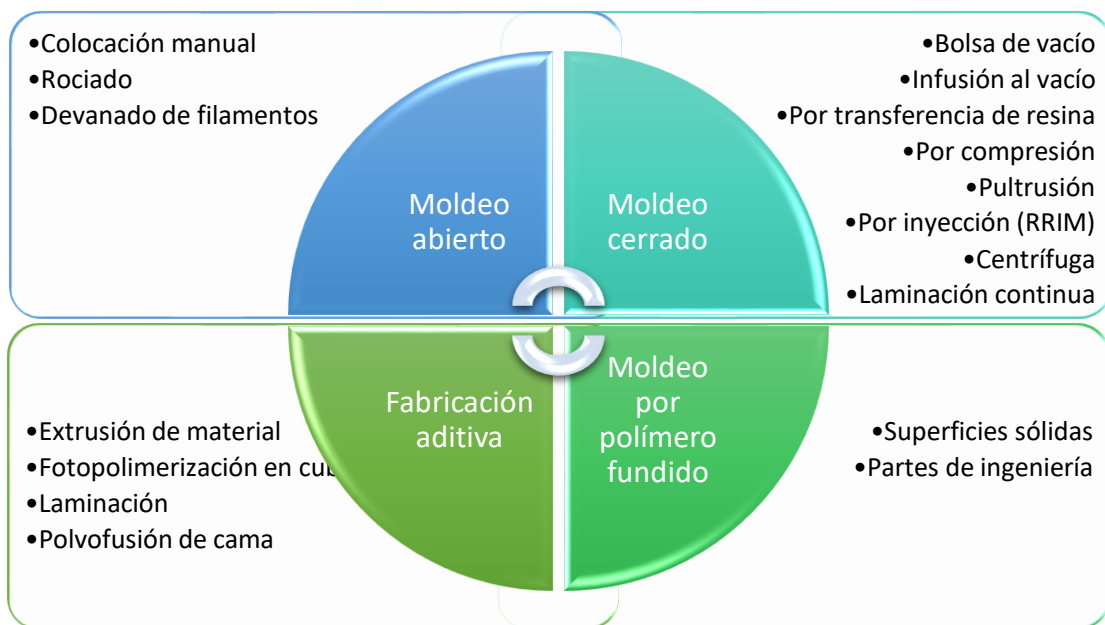


Figura 1.8. Técnicas de fabricación. [70]

Una de las innovaciones en el método de embolsado al vacío es llevar a cabo el proceso al horno. Este es un proceso emergente para fabricar piezas tanto termoplásticas como termoestables de alta calidad con reducción de vacíos utilizando solo consolidación por vacío. El proceso se basa en la eliminación de aire vacío como una combinación de difusión de gas a través del espesor y flujo de aire en el plano a través de la región de la

capa intermedia para una placa plana de dimensiones finitas en el plano que consta de un número arbitrario de capas [79].

Park et al., destacan que los vacíos y la porosidad de la superficie dependían claramente del estado de viscosidad de la resina en una etapa de permanencia intermedia del proceso de curado. Por esto, la mejora del flujo de resina podría llevar a lograr piezas de alta calidad con un contenido mínimo de vacíos [80].

Así mismo, el proceso de infusión al vacío es un tipo de proceso de moldeo por compactación líquida utilizado para la fabricación de piezas compuestas. Este proceso es una tecnología de fabricación muy avanzada y rentable y juega un papel insustituible en la fabricación de compuestos con estructura compleja y alta precisión dimensional. Hay cuatro pasos dentro de este proceso: (i) el laminado reforzado en seco se coloca en un molde y se tapa herméticamente con grifos selladores; (ii) la resina se succiona a un molde cerrado bajo presión de vacío; (iii) la resina se cura en el orificio de la pieza del molde, y (iv) la pieza compuesta se desmoldea [71]. El moldeo por infusión ha sido empleado para fabricar laminados compuestos de alta calidad con una alta fracción volumétrica de fibra [81]. En comparación con otros métodos, permite la fabricación de laminados casi sin vacíos [81].

#### **1.4. Ensayos físicos, mecánicos y dinámicos de los materiales de ingeniería**

Los sistemas compuestos se componen de dos o más materiales que son mecánicamente separables y que tienen propiedades físicas considerablemente distintas [82]. Se observaron propiedades mecánicas y físicas mejoradas de compuestos de polímeros híbridos y compuestos de polímeros impregnados con fibras. Sin embargo, la impregnación de fibras naturales y subproductos de fabricación como materiales estructurales en compuestos poliméricos ofrece ventajas tales como: uso de material excedente, no tóxico y descomponible, bajos costos de refuerzo y fuerte comportamiento de resistencia variable [83].

#### **1.4.1. Propiedades de ensayos mecánicos**

El estudio de la interacción fibra-matriz revela una mejora en las propiedades [82] como la resistencia a la tracción y flexión, que aumentan con las proporciones de las fibras sin afectar la elongación del compuesto [3], [17]. Así mismo, se mejora la resistencia al impacto y dureza [58]. Entre los híbridos de fibras naturales se evidencia mejores propiedades entre uno u otro, asociado a la disposición de las capas [84]. Una de las particularidades del comportamiento del material compuesto es atribuible a las propiedades de las fibras que lo componen, tal es el caso de un incremento en la resistencia al impacto de un compuesto híbrido, debido a la alta elongación de la fibra de vidrio y yute en el centro del compuesto [63]. Arpitha señala que los compuestos reforzados con fibra natural pura muestran la peor unión interfacial entre la matriz y las fibras. Sin embargo, los compuestos híbridos muestran menos vacíos [85], lo que mejora significativamente sus propiedades. Uno de los parámetros relevantes que afecta directamente a las propiedades del compuesto es el volumen de fibra, ya que este tiene una influencia significativa afectando la resistencia a la flexión en un 46,90% [86].

Un parámetro relevante dentro de la fabricación de materiales compuestos es el uso de tejidos industriales de fibras naturales. El empleo de mejores procesos o tratamientos, en reemplazo de tejidos artesanales, permite un aumento en las propiedades mecánicas de los compuestos. Así, se puede confirmar que un tejido elaborado de forma industrial podría mejorar aún más sus propiedades mecánicas por su homogeneidad y quizás mejores que las fibras del cáñamo o el lino que se lo tratan de forma artesanal [87].

Investigaciones indican que la resistencia a la tracción y el módulo de Young aumentan cuando aumenta el porcentaje en peso de Kevlar para el material reforzado de cada compuesto. El rendimiento general de Kevlar/epoxi es superior en comparación con el kenaf/epoxi, lo que se esperaba debido a las malas propiedades mecánicas de Kenaf en comparación con Kevlar [88]. Esto demuestra la variabilidad de los distintos tipos de fibras que sirven de refuerzo.

Referente a la adición de fibra de vidrio, en la investigación de Kahraman, los especímenes que contenían refuerzo de fibra de vidrio tenían resistencias a la tracción



que eran hasta cuatro veces mayores que las de los especímenes sin refuerzo de fibra de vidrio [89].

Para la caracterización de propiedades a tracción, se puede efectuar el ensayo en una máquina Instron 8802, utilizando un extensómetro biaxial 2620-614 con base de medida longitudinal y transversal, la velocidad de deformación fue de 10 mm/min, el material está compuesto por hilos completos de fibra de vidrio y la resina epoxi KDA-HI [90]. Para la caracterización mecánica de compuestos de matriz epoxi y fibra de vidrio, se emplea máquinas de ensayos universal, tales como la máquina UTM-WDW-30 JINAN, los especímenes utilizados para la prueba de tracción fueron de dimensiones de  $(25 \times 2,5 \text{ mm} \times (1,49 - 1,52) \text{ mm})$  y la prueba se realizó según la norma ASTM D3039; se aplicó la velocidad de deformación de 1 mm/min [91].

Dentro de la caracterización de propiedades a flexión, en el estudio revisado, las pruebas se realizan de acuerdo con la norma ASTM D790. Las dimensiones de la muestra talladas en los materiales compuestos fueron  $(50,6 \times 12,3) \text{ mm}$  mientras que la velocidad de deformación fue de 0,1 mm/min [91].

En esta investigación se realizaron ensayos mecánicos estandarizados mediante normas internacionales ASTM. Tracción con ASTM D3039, flexión con ASTM D7264 e impacto bajo ASTM 5628, los mismos que se determinaron por ser los esfuerzos más comunes a los que están sometidos, diferentes potenciales componentes en distintas aplicaciones industriales, como la aeronáutica, metalmecánica, marina, automotriz y estructural [92].

#### **1.4.2. Propiedades del Análisis Dinámico Mecánico**

Muchos de los polímeros describen un comportamiento viscoelástico. El aspecto elástico del material proporciona resistencia, rigidez y la capacidad de un elemento para recuperarse de una carga aplicada que lo deforme. Por otro lado, el aspecto viscoso proporciona propiedades como la ductilidad y la amortiguación de las vibraciones. Para comprender realmente el comportamiento de un material, es necesario cuantificar la contribución de ambos tipos de comportamiento [93]. El análisis mecánico dinámico (DMA, por sus siglas en inglés) separa el módulo tradicional (módulo complejo) en sus componentes. Es así que se tienen el módulo de almacenamiento, conocido más

formalmente como el módulo elástico  $y$ , el módulo de pérdida, conocido como el módulo viscoso. DMA es una técnica que se utiliza ampliamente para caracterizar la variación de las propiedades dinámicas (módulo de almacenamiento, módulo de pérdida y  $\tan \delta$ ) con respecto al tiempo y la temperatura [94].

Hay estudios que revisan la flexión y el DMA de un material compuesto esforzado con fibra de sisal recubiertas de PLA en resina de poliéster fabricados. Los análisis de flexión se realizaron en términos de fuerza de rotura, alargamiento (%), resistencia a la flexión y módulo, mientras que los de DMA se realizaron en términos de módulo de almacenamiento ( $E'$ ), amortiguación ( $\tan \delta$ ). Con el DMA, Gupta & Singh indicaron que las propiedades mecánicas dinámicas aumentaron con la incorporación de fibras de sisal recubiertas de PLA. Además, se logró identificar la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) [95]. Se puede entender que, en la investigación de Khurana et al., la orientación de la fibra desempeñó un papel crucial en la determinación del módulo de almacenamiento. Se observó que el módulo de almacenamiento para una orientación de  $45^\circ$  era mayor que para una orientación de  $0^\circ$  y se concluyó además que la temperatura de transición vítrea influía en el desplazamiento estático [94]. En otra investigación, los resultados del análisis mecánico dinámico (DMA) muestran que los compuestos híbridos tratados con NaOH tienen el módulo de almacenamiento (rigidez y energía de adsorción) más alto y el factor de amortiguación ( $\tan \delta$ ) más bajo en comparación con el híbrido no tratado y formado por la combinación de fibras naturales (piña, seda, lino, etc.) y fibras sintéticas (vidrio) reforzadas con polímeros [96]

Tabla 1.2. Estudios de caracterización de materiales compuestos.

Refuerzo	Matriz	Esfuerzo de tracción (MPa)	Módulo tracción (GPa)	Elongac. (%)	Esfuerzo de flexión (MPa)	Módulo de flexión (GPa)	Deflexión (mm)	Energía de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Referencia
<b>Sisal + Vidrio</b>	Epóxica	68,55	-	-	0,92 kN	-	7,43	-	[19]
<b>Yute + Vidrio</b>	Epóxica	62,99	-	-	1,03 kN	-	6,16	-	
<b>Vidrio (20% vol)</b>	-	85	1,719	-	175,9	7,74	-	60,8	[1]
<b>Cáñamo (20% vol)</b>	-	32,9	1,421	-	54	5,02	-	4,8	
<b>Cáñamo (35% vol)</b>	-	60,2	1,736	-	112,9	6,38	-	14,2	
<b>Yute + Vidrio + Yute</b>	-	13,006	-	1,08	-	-	-	-	[84]
<b>Vidrio + Yute + Vidrio</b>	-	23,844	-	3,44	-	-	-	-	
<b>Coco (20%, 30 mm)</b>	Vinilo (60%)	-	28,6	-	-	23,2	-	46,2	[82]
<b>Coco (20%, 50 mm)</b>	Vinilo (60%)	-	27,2	-	-	28,4	-	40,6	
<b>Sansevieria Trifasciata (0%)</b>	Carbono (100%)	-	344,6	-	-	564	-	-	[17]
<b>Sansevieria Trifasciata (10%)</b>	Carbono (90%)	-	230,35	-	-	505,28	-	-	
<b>Sansevieria Trifasciata (20%)</b>	Carbono (80%)	-	157,61	-	-	443,33	-	-	

Refuerzo	Matriz	Esfuerzo de tracción (MPa)	Módulo tracción (GPa)	Elongac. (%)	Esfuerzo de flexión (MPa)	Módulo de flexión (GPa)	Deflexión (mm)	Energía de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Referencia
<b>Sansevieria Trifasciata (30%)</b>	Carbono (70%)	-	150,01	-	295,66	-	-	-	
<b>Sansevieria Trifasciata (40%)</b>	Carbono (60%)	-	144,83	-	447,66	-	-	-	
	Poliéster	26,7	420	-	57,69	45,54	-	73,2	
<b>Residuos textiles (20%)</b>	Poliéster	35,0	581	-	78,85	44,31	-	111,91	
<b>Residuos textiles (15%)</b>	Fibra de vidrio (10%)	Poliéster	64,0	1011,1	-	131,91	48,37	100,0	[97]
<b>Residuos textiles (10%)</b>	Fibra de vidrio (15%)	Poliéster	52,33	929,5	-	173,1	32,63	91,1	
	Fibra de vidrio (20%)	Poliéster	164,0	476	-	183,36	61,85	88,5	
<b>Multicapas de fibra de vidrio (0°, 45°, 90°)</b>	Epóxica	211,18	11,79	2,41	261,65	10,69	3,02	-	[98]
<b>Fibra de vidrio pura</b>	Epóxica	96,89	-	-	165,5	-	-	-	
<b>Fibra de vidrio (50%)</b>	Fibra de plátano falso (50%)	Epóxica	134,38	-	201,357	-	-	-	[99]

Refuerzo	Matriz	Esfuerzo de tracción (MPa)	Módulo tracción (GPa)	Elongac. (%)	Esfuerzo de flexión (MPa)	Módulo de flexión (GPa)	Deflexión (mm)	Energía de Impacto (kJ/m <sup>2</sup> )	Referencia
Fibra de vidrio (0%)	Nylon 66	Epóxica	82,00	-	-	95,00	-	-	
Fibra de vidrio (10%)	Nylon 66	-	423,80	-	-	115,30	-	-	[100]
Fibra de vidrio (20%)	Nylon 66	-	756,60	-	-	135,60	-	-	
Fibra de vidrio (30%)	Nylon 66	-	1107,40	-	-	155,90	-	-	

## 1.5. DOE – MSR y la caracterización de compuestos

### 1.5.1. Diseño de experimentos (DOE)

El diseño de experimentos y los modelos matemáticos se utilizan con frecuencia para predecir las mejores condiciones de un proceso. El diseño de experimentos (DOE) es una metodología de diseño robusta que se puede utilizar para resolver varios problemas de ingeniería. El trabajo experimental comúnmente usado requiere un número considerable de corridas experimentales en cada etapa para sacar conclusiones precisas y optimizar los parámetros involucrados [101]. Por ello, como lo comentan Lee et al., el objetivo principal de los diseños de experimentos es obtener los máximos resultados de los datos, mientras minimiza las entradas, en términos de experimentos requeridos [102]. Se entiende que el diseño de experimentos permite explorar el impacto de los parámetros de entrada en la respuesta experimental de salida [103], tal como se esquematiza en la Figura 1.9.

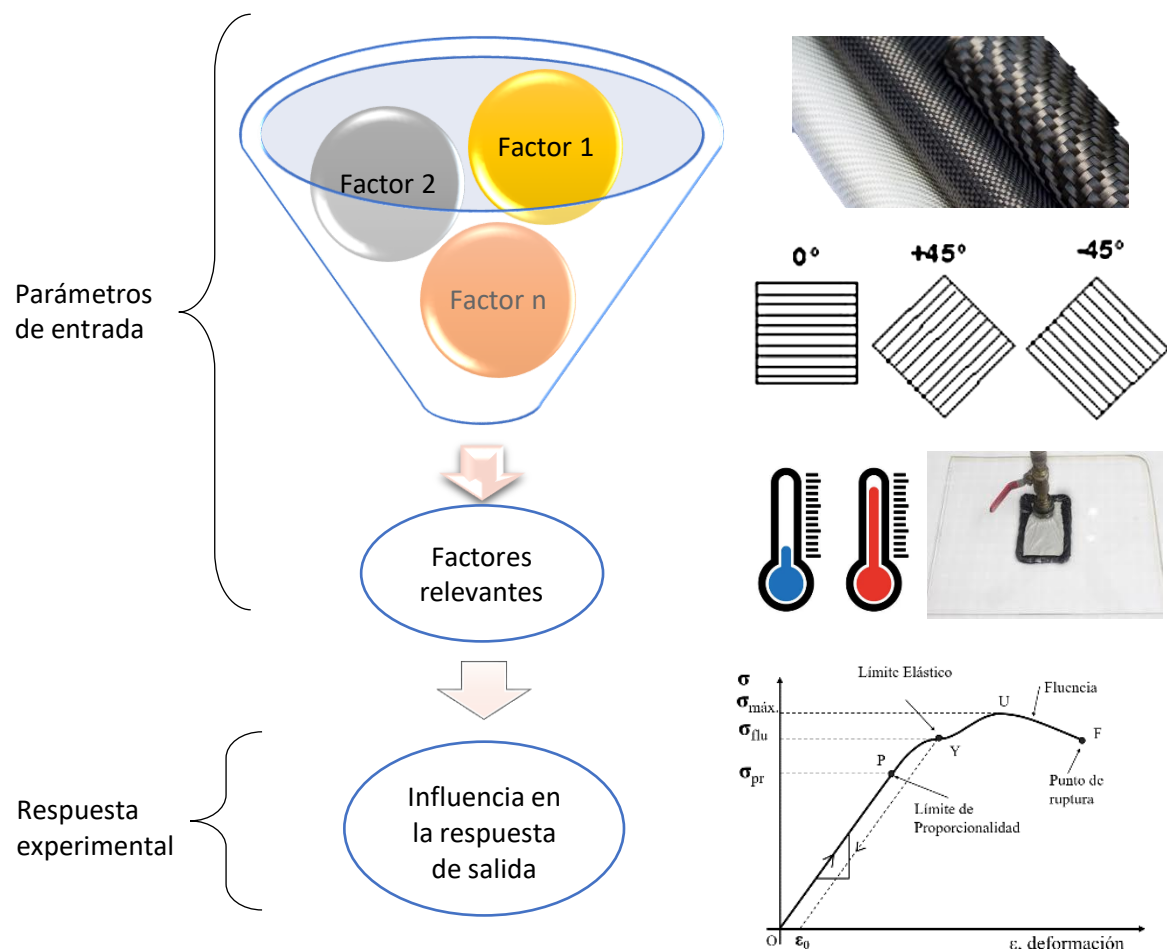


Figura 1.9. Diseño de experimentos para revisar la influencia de factores.

Los resultados de los estudios desarrollados para analizar parámetros de fabricación señalan la versatilidad y el bajo costo que conlleva el aplicar un diseño de experimentos para el análisis. Por ejemplo, se han empleado resultados de experimentos de mecanizado para caracterizar los factores que afectan la rugosidad de la superficie mediante el método Taguchi [104]. Es así que, los resultados del DOE se examinan usando análisis de varianza (ANOVA) [105]. Además, se emplea la gráfica de efecto principal para estudiar el impacto de los parámetros de entrada en la salida, que se resolvió utilizando el análisis de varianza [103].

El diseño de experimentos ayuda a discernir de un total de factores estudiados, los que influyen significativamente sobre la variable respuesta. Para entender la importancia y la aplicabilidad del diseño de experimentos (DOE), se revisó un artículo en el que se estudian los parámetros del proceso de extrusión. En dicho trabajo, tras la aplicación del diseño experimental, se sabe que solo cuatro de los once factores de entrada son relevantes en el proceso de extrusión [106]. También se analizó un trabajo en el que, a través de la aplicación de un diseño de experimentos  $2^k$  se señalan como significativos cinco de los dieciséis componentes evaluados en la elaboración de materiales de fricción [107].

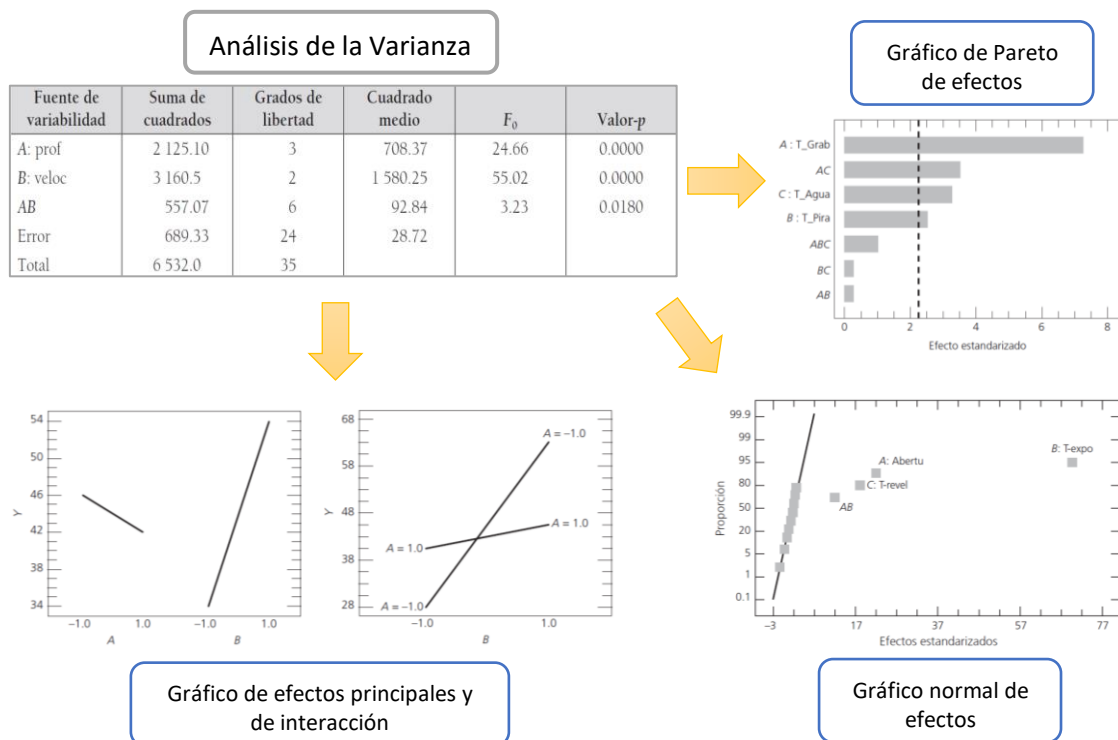


Figura 1.10. Técnicas para revisar la influencia de factores [108].

Existen artículos, como el de Krishna, en el que se examinaron parámetros que resultaron significativos, como el tipo de refuerzo, el tamaño de la partícula de refuerzo y el porcentaje en peso, sobre las propiedades mecánicas del compuestos de matriz metálica de aleación de aluminio (AMMC) [109]. En contraposición, en el estudio formulado por Odiaka et al., se concluyó que ninguno de los parámetros seleccionados fue individualmente significativo, lo cual es atribuido a las características propias del método empleado. En dicho trabajo se analizó la influencia de los parámetros de soldadura sobre la resistencia a la tracción de soldaduras de acero dulce reforzado con titanio, empleando Taguchi para el diseño experimental, para juntas a tope y traslapadas [110].

Las estructuras fabricadas con procesamiento de preimpregnado en bolsa de vacío tienden a obtener defectos en los laminados, debido a las condiciones de compactación. Por ello, se requieren estrategias efectivas de mitigación de defectos para producir piezas estructurales. Tal es el caso de controlar las condiciones de procesamiento del material, para así mitigar defectos en el mismo [73]. Así también, el estudio de Koronis et al., pretendió entender el comportamiento de un compuesto reforzado con fibra natural mediante un análisis estadístico bajo DOE, intentando reducir las variaciones del proceso. Los factores del proceso se determinaron en dos niveles de valores altos y bajos. De esta manera se encontraron correlaciones significativas entre el punto de succión y el tiempo de llenado del molde en el proceso de vacío. [111].

Complementando lo anterior, se sabe que existe una gama de diseños de experimentos. Como lo mencionan Zhang et al., estos se diferencian entre muchos otros, por la precisión del modelo empleado, su aplicabilidad, entre otras características [112]. Estos autores explican que la precisión del modelo generalmente se pasa por alto y se subestima. En el presente documento se da prioridad tanto la precisión del modelo respecto a los elementos que lo componen; así como al diseño mismo que lo genera.

### **1.5.2. Caracterización de materiales mediante diseño de experimentos**

La metodología de Diseño de experimentos (DOE), resulta muy práctica ante la necesidad de caracterizar nuevos materiales. Así por ejemplo, se ha utilizado DOE para definir el número de experimentos necesarios con las respectivas variaciones en las condiciones de entrada



para hallar la resistencia a la soldadura de juntas [113]. Así mismo, el DOE con el análisis de la varianza genera un modelo que puede utilizarse para producir materiales compuestos con las propiedades finales deseadas. Además puede ser usado para predecir la propiedad del compuesto sabiendo las proporciones de sus componentes [114], tal como se describe en la Figura 1.11.

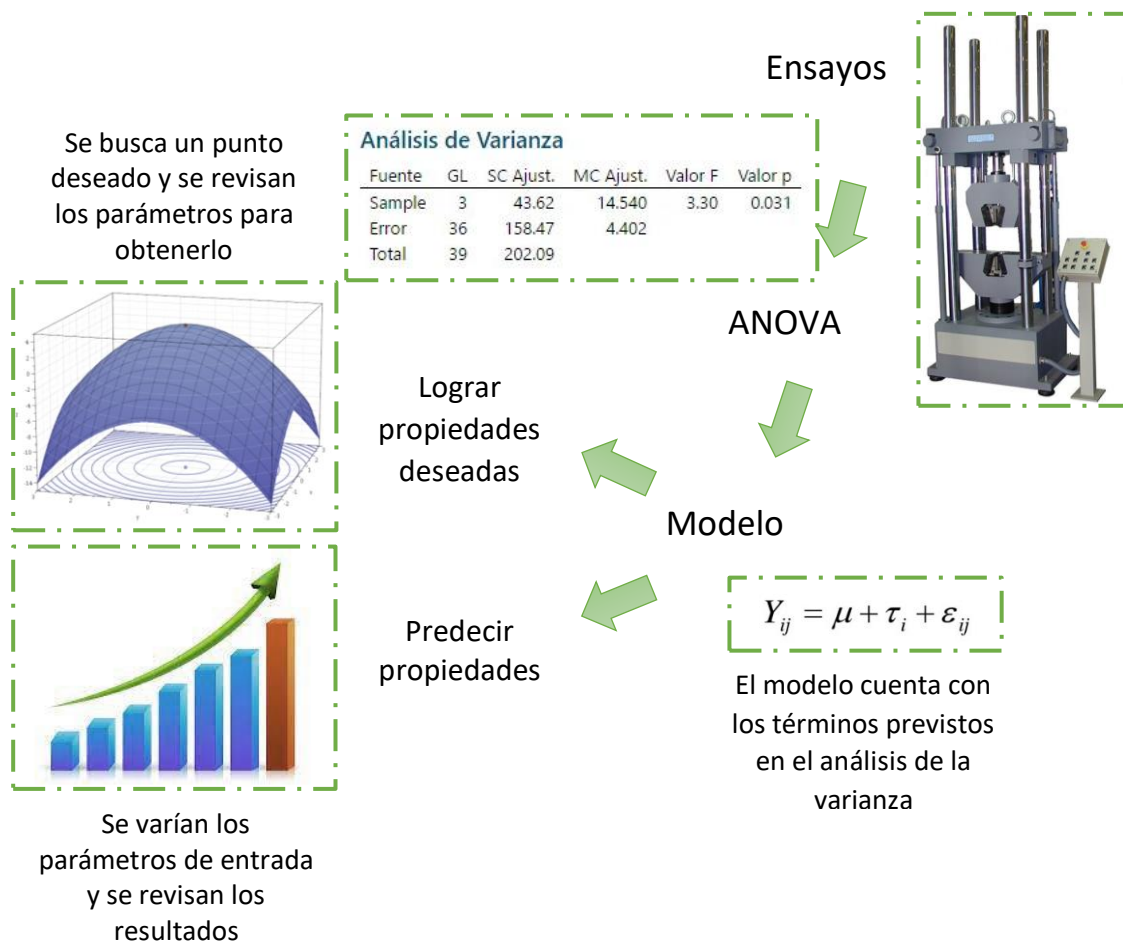


Figura 1.11. Caracterización mediante diseño de experimentos (DOE).

### 1.5.3. Metodología de superficie de respuesta (MSR)

La metodología de superficie de respuesta (MSR), es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que son útiles para modelar y predecir la respuesta de interés afectada por varias variables de entrada con el objetivo de optimizar esta respuesta. En la MSR también se especifica las relaciones entre una o más respuestas medidas y los factores de entrada controlables esenciales [115], [116].

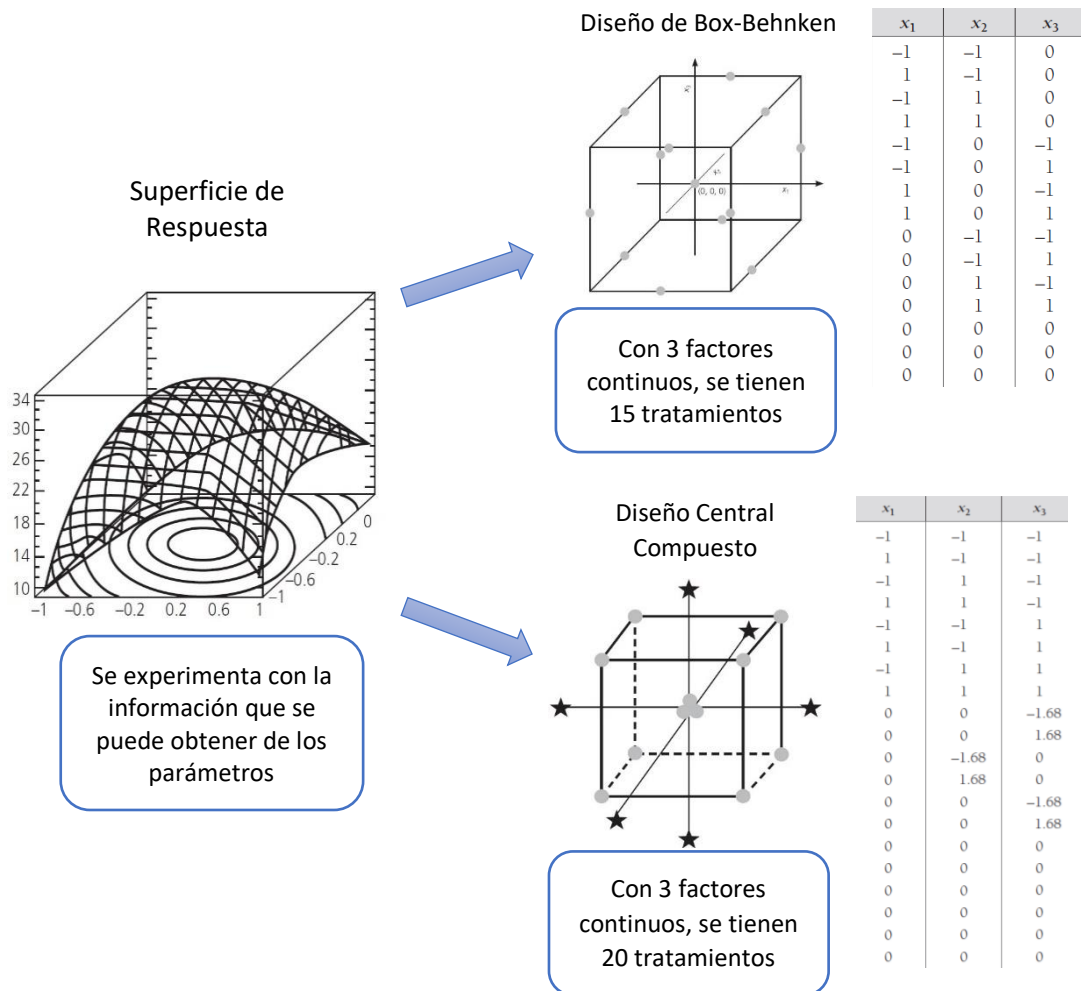


Figura 1.12. Diseños en la metodología de superficie de respuesta [108].

A manera de ejemplo de la aplicación de la MSR, empleando el diseño de Box-Behnken, se aborda en el diseño de partículas de manitol secadas por aspersión. Este diseño se conjuga con la función de deseabilidad para determinar los mejores parámetros del proceso y predecir las respuestas, las cuales se confirmaron experimentalmente. En dicho estudio se tuvieron coeficientes de determinación del 92,13% [117]. En otro trabajo, se estudió la resistencia a la compresión de un compuesto de hormigón encauchado utilizando mezclas generadas por un Diseño Central Compuesto (DCC) dentro de la MSR. En este estudio la precisión de los modelos matemáticos establecidos por DCC utilizando Análisis de Varianza (ANOVA), brindan coeficientes de determinación superiores al 85% [118].

## 1.6. Optimización de las propiedades mecánicas de materiales compuestos

### 1.6.1. Técnicas de optimización

La fabricación de componentes, a través de distintas técnicas, conlleva un sinnúmero de parámetros. Estos parámetros afectan las propiedades o características finales del material, tales como calidad de la pieza, propiedades mecánicas, tiempo de construcción, precisión dimensional, densidad del componente, por considerar unos pocos. Se tiene una revisión comparativa de distintas técnicas de optimización, que se puede visualizar en la Figura 1.13. En esta comparación se consideraron parámetros relevantes para la evaluación y se tiene técnicas como: Red Neuronal Artificial (RNA), Diseño Factorial, Diseño de Taguchi, MSR.

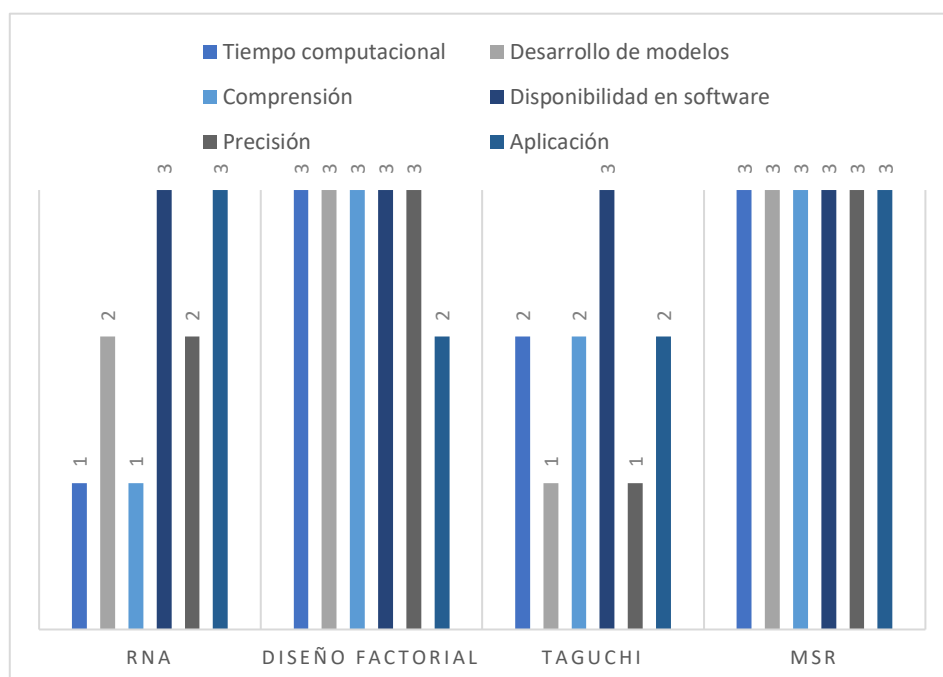


Figura 1.13. Comparación entre técnicas de optimización, considerando varios diseños en la metodología de superficie de respuesta [119], [120].

Para proponer un diseño aplicable al análisis del comportamiento mecánico de compuestos es necesario entender que, de las técnicas de optimización descritas en la figura, como los diseños factoriales y la MSR, tienen características que las hacen más apreciables sobre el resto de las técnicas. Una mejor precisión, mayor compresión de resultados, amplia disponibilidad en software, amplia aplicación en varias ramas de la ingeniería permite tener claro lo que conviene o no a la investigación.

Se corrobora la información antes presentada ya que en otro estudio se ha explorado y utilizado varias técnicas experimentales o estadísticas de DOE para optimizar los parámetros del proceso, técnicas tales como método de Taguchi, algoritmo genético (GA), relacional gris, MSR, factorial fraccional, redes neuronales artificiales (ANN), lógica difusa, entre otros. En dicho estudio, se presentó como una de las más relevantes a la MSR, por optimizar los parámetros del proceso FDM y con ello las propiedades mecánicas y la calidad de la pieza [121].

Se tienen un objetivo claro en la optimización de distintos materiales. Es así que, las diferentes técnicas de optimización se utilizan en casos concretos, para maximizar propiedades de los materiales, tales como la resistencia, transporte de calor y electricidad; todo esto enfocado para aplicaciones de ingeniería [122].

Revisando de manera más detallada el tema de la optimización, se revisa un método de optimización multiobjetivo de materiales, dentro de la que se abordan varias propiedades a ser revisadas, saliendo del enfoque de una única propiedades [123]. Para optimizar los parámetros geométricos, se emplea el DOE, juntamente con el enfoque de la función de deseabilidad, que es una herramienta útil para optimizar problemas de respuesta múltiple. Estas técnicas ofrecen una desviación entre los valores experimentales y simulados menor al 5% [124], [125].

Dentro del área de materiales, se consigue identificar la combinación óptima de variables que mejora la resistencia al impacto de los compuestos estructurales [126]. Estos autores indagaron en un diseño factorial para investigar la interacción de los parámetros de procesamiento. En los casos revisados, con la aplicación del DOE utilizando MSR, el análisis se llevó a cabo mediante el método ANOVA y los parámetros óptimos se seleccionaron con base en la gráfica de optimización [103].

La técnica de optimización mediante el diseño de Taguchi es ampliamente empleada en investigaciones enfocadas a estudiar las propiedades funcionales, físicas, mecánicas y térmicas de compuestos híbridos de base polimérica y de base metálica. Se revisan los parámetros de fabricación fueron optimizados por Taguchi (DOE), y tras la aplicación de la metodología se supo que el valor óptimo de resistencia a la tracción se obtuvo con 3 % en

peso de  $\text{TiO}_2$ , 2 % en peso de MEKP y 80 °C, dando fe de lo preciso del método [127]. Así mismo, mediante esa misma técnica, se demostró que los parámetros de fundición de agitación mecánica optimizados para la fabricación del compuestos de aleación de aluminio y nanotubos de carbono, con valores óptimos de dureza y resistencia de 106,4 HV y 277,0 MPa, con un compuesto que contenía un 0,5 % en peso de aleación de aluminio MWCNT, 0,5 % en peso de Mg y 10 min de agitación mecánica [128].

### **1.6.2. Optimización múltiple**

La necesidad de buscar un caso óptimo que logre aprovechar de manera eficiente todas las propiedades mecánicas analizadas hace que se indague en el uso de métodos para conseguir este fin. La optimización multiobjetivo se puede utilizar cuando se tienen varias metas en conflicto y se pretende estudiarlas y optimizarlas simultáneamente [129]. Una de las opciones más viables es el uso de técnicas de optimización múltiple, la cual de acuerdo a Paredes et al. [130], convierte el problema de optimización de respuestas múltiples en un problema de una única respuesta analizable de manera objetiva.

Se evalúa el desempeño funcional y mecánico de mezclas de asfálticas porosas modificadas con nailon y cal hidratada a través de pruebas experimentales que incluyen vacíos de aire [131]. Estos autores emplean el enfoque de Taguchi y una técnica novedosa de toma de decisiones de criterios múltiples (MCDM). También se empieza utilizando la MSR en base a los resultados de ANOVA, para luego realizar optimización multiobjetivo utilizando las ecuaciones de ajuste para seleccionar rangos óptimos de parámetros de diseño que puedan minimizar colectivamente las variables de salida [132]. Cabe recalcar que este se convierte en un método poco práctico, debido a la manipulación y selección de rangos. Considerando un criterio similar al expuesto anteriormente, se desarrolla la optimización multiobjetivo empleando un algoritmo genético para optimizar tres parámetros de entrada para la fabricación de piezas de ABS, es decir, la temperatura de impresión, el patrón de relleno y la altura de la capa [133].

El uso de la función de deseabilidad es muy común. Así, Rao et al. utilizaron el análisis mencionado, basado en la superficie de respuesta para optimizar los objetivos múltiples como la rugosidad superficial (SR) y la tasa de eliminación de material (MRR) [134]. Los resultados

presentan que la velocidad de corte y la profundidad de corte contribuyen a maximizar la MRR y a minimizar la SR del composite desarrollado.

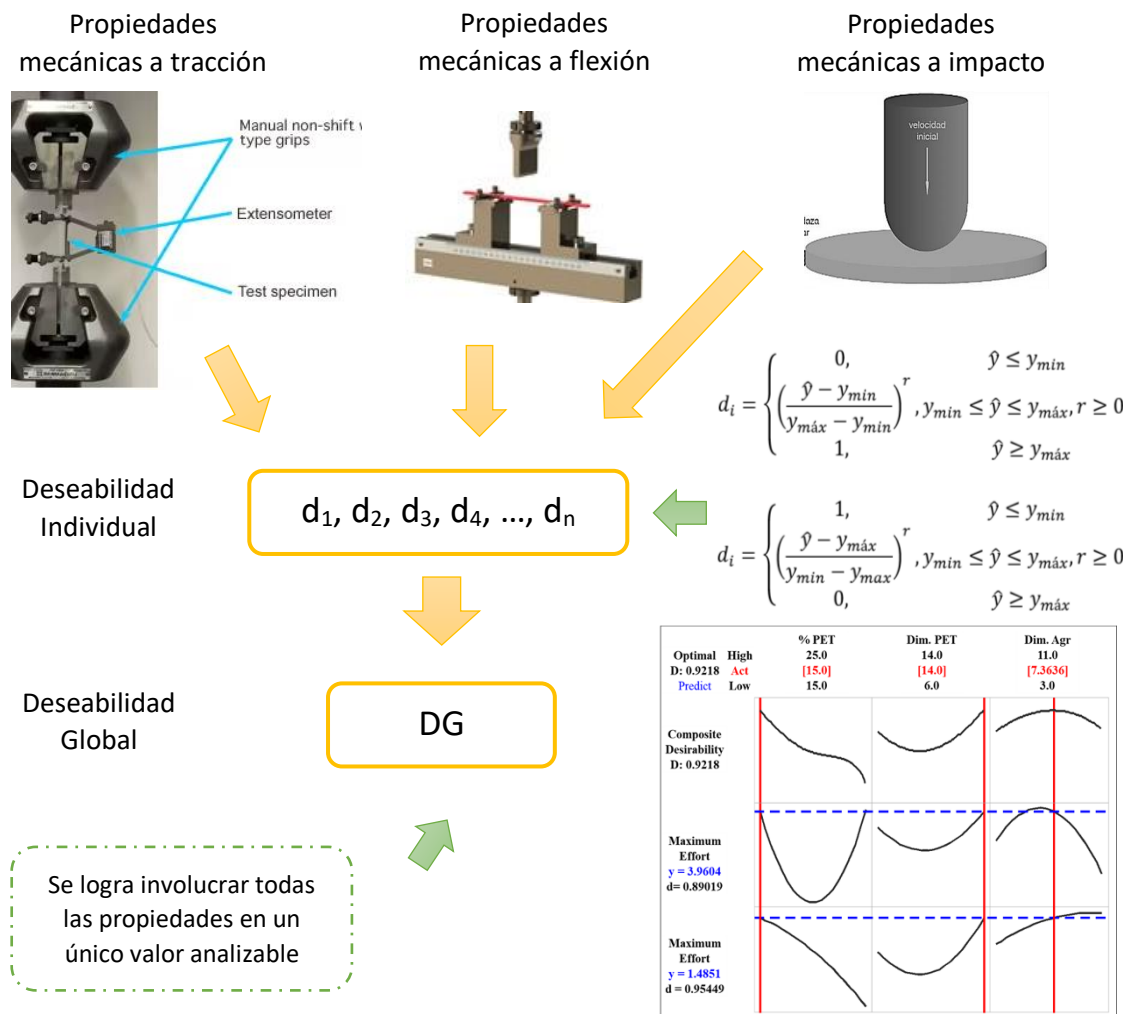


Figura 1.14. Optimización global de propiedades mecánicas.

La función de deseabilidad extiende su aplicación a distintas áreas. Además, esta técnica se conjuga eficientemente con la MSR [135]. Así, autores como Abdulkadir, consiguieron la optimización multiobjetivo de seis respuestas, a través de un diseño dentro de la MSR y la función de deseabilidad, con lo cual se obtuvieron valores óptimos de las variables y predijo valores optimizados para las respuestas, con un valor de precisión menor al 5% [136].

## **1.7. Justificación y Objetivos**

### **1.7.1. Justificación**

Ashby realizó una proyección (1960 – 2020) respecto al incremento en el uso o aplicaciones de los materiales compuestos dentro de la industria automotriz, de la construcción y la aeronáutica. Estas industrias requieren investigaciones que respondan a las necesidades de conseguir compuestos e híbridos que reemplacen a materiales pesados y nocivos, a la vez que brinden mejores propiedades físicas (aligeramiento) y mecánicas (resistencias y módulos). En estos casos se requiere además un buen comportamiento frente a las diferentes solicitaciones a los que sus productos están sometidos, considerando procesos de diseño y fabricación optimizados para disminuir el costo de desarrollo.

La investigación desarrollada propone la optimización del proceso de diseño y desarrollo de un material híbrido de matriz epoxi reforzada con fibras naturales y sintéticas, estableciendo un diseño experimental (DOE/MSR) mediante una matriz que permite determinar las combinaciones entre factores y niveles. Con ello se consiguen mejores propiedades mecánicas cuasi-isotrópicas del material en las diferentes orientaciones ( $-45^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $45^\circ$ ). Cabe indicar que la primera capa en todos los casos será una fibra sintética pues con esto se garantiza el proceso de acabado del producto donde se lo aplique. Otro factor, es la temperatura de secado ( $60^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$  y  $120^\circ\text{C}$ ), temperaturas que aseguran un adecuado curado del material híbrido, si este lo hiciera a temperatura ambiente.

La fibra natural utilizada es de origen amazónico ecuatoriano, de gran accesibilidad y potencial de resistencia y mojabilidad, que permite obtener una correcta interfaz y por ende buen comportamiento mecánico dentro de una matriz epoxi. Las fibras sintéticas de carbono, Kevlar y vidrio se consideraron porque son de alta resistencia mecánica y son utilizadas en algunas industrias que potencialmente podrían albergar el nuevo material a diseñar. El uso de estas fibras sintéticas permitirá elevar el desempeño de la fibra natural, amigable con el medio ambiente.

La resina termoestable utilizada (AEROPOXI PR2032) es adecuada para aprovechar las características de las fibras sintéticas por su gran resistencia y ductilidad. Investigaciones y aplicaciones aeronáuticas determinan la utilización de esta resina para sus productos. La

caracterización se realizó bajo normas ASTM D 3039 (tracción), ASTM D 7264 (flexión), ASTM D 5628 (impacto) pues estas permiten determinar criterios de resistencia y comportamiento del material y con ello proponer usos y aplicaciones.

Respecto a la aplicación del DOE/MSR dentro de la investigación, se determina que, de los otros métodos que abarca el diseño de experimentos, la MSR permite localizar las condiciones óptimas de operación de un proceso o producto. Esto supone el estudio de todas las combinaciones posibles dentro de una superficie analizable. Además, se sabe la necesidad de manejar un diseño de segundo orden dentro del diseño de experimentos, con la utilización de la MSR. Esto quiere decir que se pueda estudiar los efectos de curvatura, efectos lineales y las interacciones de los factores. De lo anterior, se enfatiza en el estudio de la curvatura debido a la necesidad de identificar el punto óptimo dentro de la región experimental. Se entiende que, para emplear un diseño de segundo orden, es preciso que se cuente con tres niveles dentro de los factores numéricos (orientación de la capa 1, orientación de la capa 2 y la temperatura de curado), para estimar la curvatura de la superficie en la dirección de cada factor.

Así mismo, de los modelos de segundo orden se tiene como más utilizado al Diseño de Box-Behnken (DBB) y al Diseño Central Compuesto (DCC). Dentro de los que, el DBB es la alternativa más económica, pues demanda un número competitivo de tratamientos respecto al DCC. Además, los puntos de prueba no son extremos, al no hallarse en los vértices de la región experimental (cubo del diseño, ver Figura 1.12). Finalmente, de acuerdo con el objetivo de optimizar la configuración del material híbrido, conjuga la metodología de superficie de respuesta con el uso de la función de deseabilidad. Esto engloba el interés sobre las diferentes propiedades mecánicas en un único valor objetivo analizable.

### **1.7.2. Objetivos**

El objetivo general de este trabajo es analizar mediante metodología DOE/MSR la optimización de respuestas múltiples de las propiedades mecánicas del material híbrido de matriz epoxi reforzada con fibras sintéticas y natural (chambira).

Para el cumplimiento del objetivo general, se disponen los siguientes objetivos específicos:



- **Determinar el diseño experimental (DOE/MSR) aplicable para caracterización del material híbrido de matriz epoxi reforzada con fibra sintética y natural (chambira)**

Se estableció el diseño experimental (DOE/MSR) mediante una matriz que ha permitido determinar las combinaciones entre factores y niveles, al mismo tiempo que se definieron los casos posibles (15). Por condiciones de manufactura, estratificación y acabado superficial, el híbrido se constituyó por tres capas, según el caso la primera siempre será de carbono, kevlar o vidrio. Los factores fueron: orientación capa 1 (-45°, 0°, 45°) de chambira, orientación capa 2 (-45°, 0°, 45°) de chambira, la temperatura de secado (60°C, 90°C, 120°C).

El diseño experimental (DOE) aplicado está orientado al MSR de Box-Behnken, que puede analizar la influencia de la resistencia mecánica en el material por tener factores categóricos o cuantitativos, dando como resultado un total de 45 corridas.

- **Determinar las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto del material híbrido de matriz epoxi reforzada con fibra sintética y natural (chambira)**

Una vez generada la cantidad de casos y réplicas, se efectuó el conformado y caracterización de las propiedades mecánicas del material híbrido. Esto mediante dos procesos de fabricación, conformado al vacío e infusión, y bajo dos medios de curado, ambiente y horno.

Como primera fase, se conformó materiales al vacío según la matriz de diseño determinada en el primer objetivo. La caracterización se realizó bajo ASTM D 3039 (tracción), ASTM D 7264 (flexión), ASTM D 5628 (impacto). Las propiedades obtenidas son sus cargas máximas, esfuerzos máximos, módulos, porcentaje de alargamiento, deflexiones y energía de falla, según sea el caso.

En la segunda fase, se obtuvieron especímenes bajo la misma configuración y diseño experimental (DOE/MSR) con sus respectivos factores y niveles, pero considerando el proceso de conformado o moldeo por RTM (moldeo por transferencia de resina por infusión). Los especímenes obtenidos se caracterizaron mecánicamente a tracción, flexión e impacto.

- **Analizar la optimización que los resultados de la caracterización del material híbrido.**

Obtenidos los resultados de las fases anteriores, se utilizó Minitab® Statistical Software versión 21.1, con lo que se inició verificando los supuestos paramétricos. Al no cumplirse dichos supuestos, se transformaron los datos mediante transformación de Box-Cox. Dentro del ANOVA, se revisó la significancia de los modelos de cada propiedad evaluada, notando la existencia de casos particularmente mejores, con lo que fue objetivo identificarlos. Finalmente, se efectuó la optimización global para determinar la configuración de factores y niveles apropiados y óptimos para un mejor rendimiento de las propiedades mecánicas en conjunto.

- **Evaluar la calidad del modelo generado por la aplicación del diseño de experimentos DOE/MSR**

La calidad del modelo se revisa dentro de cada una de las propiedades mecánicas evaluadas, con la ayuda del coeficiente de determinación. Este coeficiente permitió entender el porcentaje de variación de los resultados que puede explicarse con los términos del modelo de regresión de la MSR, mediante Minitab® Statistical Software.

Para entender la calidad del modelo global, se analiza la función de deseabilidad, dentro del que se revisa el coeficiente de determinación para saber el grado en el que los factores empleados explican la variabilidad de las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto del material híbrido obtenido.

## CAPÍTULO 2.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Considerando los parámetros base para la conformación del híbrido, como son: matriz epoxi, refuerzo natural (chambira), refuerzo de fibra sintética (carbono, kevlar y vidrio), mediante la metodología DOE/MSR, se determinará los factores (numéricos y categóricos) y niveles. Posteriormente, mediante la matriz de diseño se determinará el número de casos y sus réplicas.

#### 2.1. Materiales

Los materiales utilizados en el conformado del híbrido de la investigación propuesta tienen características y especificaciones importantes que se deben cumplir para poder obtener muestras similares y de igual comportamiento que las que se utilizan en el campo industrial. Por esto, en la siguiente sección, se tratan dichas especificaciones.

##### 2.1.1. Matriz de resina epóxica (AEROPOXI PR2032 - PH3660)

La resina epóxica PR2032 es una resina de viscosidad media, sin relleno, de color ámbar claro, diseñada para aplicaciones de producción estructural. PR2032, cuando se utiliza con el agente de curado PH3663, proporciona un sistema de resina de baja viscosidad ideal para el proceso de infusión a la vez que amplía la calidad y versatilidad de la línea Aeropoxy de alto rendimiento. De acuerdo con las especificaciones del fabricante tiene una densidad de 1,160 g/cm<sup>3</sup>.

##### 2.1.2. Refuerzo natural: fibra de chambira (Astrocaryum)

La fibra de chambira, Astrocaryum o Cumare, proviene de palmeras nativas de 30 m de altura y de 25 cm a 30 cm de diámetro, hojas de hasta 5 m de longitud, que se encuentran en la amazonia ecuatoriana. Fibra de densidad entre 1,2 y 1,3 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción entre 150 a 450 MPa. Esta fibra se obtuvo en Ecuador, específicamente en la comunidad Cofán de la provincia de Sucumbíos, las coordenadas 00°22.00' S - 75°39.23' W, a una altitud de 300 m. La fibra se trató desde su estado natural hasta obtener el tejido plano usando un telar

artesanal en la comunidad indígena de Salasaca, ubicado en Ecuador, provincia de Tungurahua, 78°45`68" longitud occidental; y 1°10`58" latitud Sur.

### 2.1.3. Refuerzo sintético

La fibra de carbono 3k twill (198 g/m<sup>2</sup>) de marca Quintum, es el tejido más popular en la industria automovilística, aplicaciones marinas, aeroespaciales y deportivas. Tiene una resistencia a la tracción de 4400 MPa, módulo de elasticidad de 231 GPa y una densidad entre 1,75 y 1,79 g/cm<sup>3</sup>.

La fibra de vidrio HexForce 7781 (Fiber Glass Fabric) de 299 g/m<sup>2</sup>, es de procedencia estadounidense. Es una fibra de tipo vidrio E de alto rendimiento. Tejido apretado con una elevada relación resistencia/peso. Se utiliza en laminados compuestos avanzados. Tiene una resistencia a la tracción aproximado de 438 MPa, módulo de elasticidad de 27,7 GPa y densidad de 2,54 g/cm<sup>3</sup>.

La fibra de Kevlar 49 es un material ideal para usarse en aviación, en partes que están sujetas a grandes esfuerzos y vibraciones, de densidad entre 1,4 y 1,45 g/cm<sup>3</sup>, resistencia a la tracción aproximada de 3400 MPa y módulo elasticidad de 125 GPa.



Figura 2.1. Refuerzos sintéticos empleados.

### 2.1.4. Insumos de conformado al vacío

Los elementos para el proceso de conformado al vacío tales como: bolsas de vacío, cinta de vacío o butilo AN-3, manta de absorción, tejido peel ply se las adquirió en JEV SOLUCIONES EN INGENIERÍA – Ecuador.

### 2.2. Metodología experimental aplicada

El trabajo parte de un diseño de experimentos (DOE-MSR) que permite determinar una secuencia eficiente de análisis de resultados experimentales. Esto permitirá a su vez optimizar el diseño mediante la función de deseabilidad que establece la condición que aprovecha al máximo las propiedades mecánicas del material, así como la significancia del modelo de la deseabilidad para corroborar la diferencia del óptimo global. Este proceso se lo realizará mediante Minitab® Statistical Software versión 21.1, dentro del campo de MSR. El proceso por seguir se esquematiza en la Figura 2..

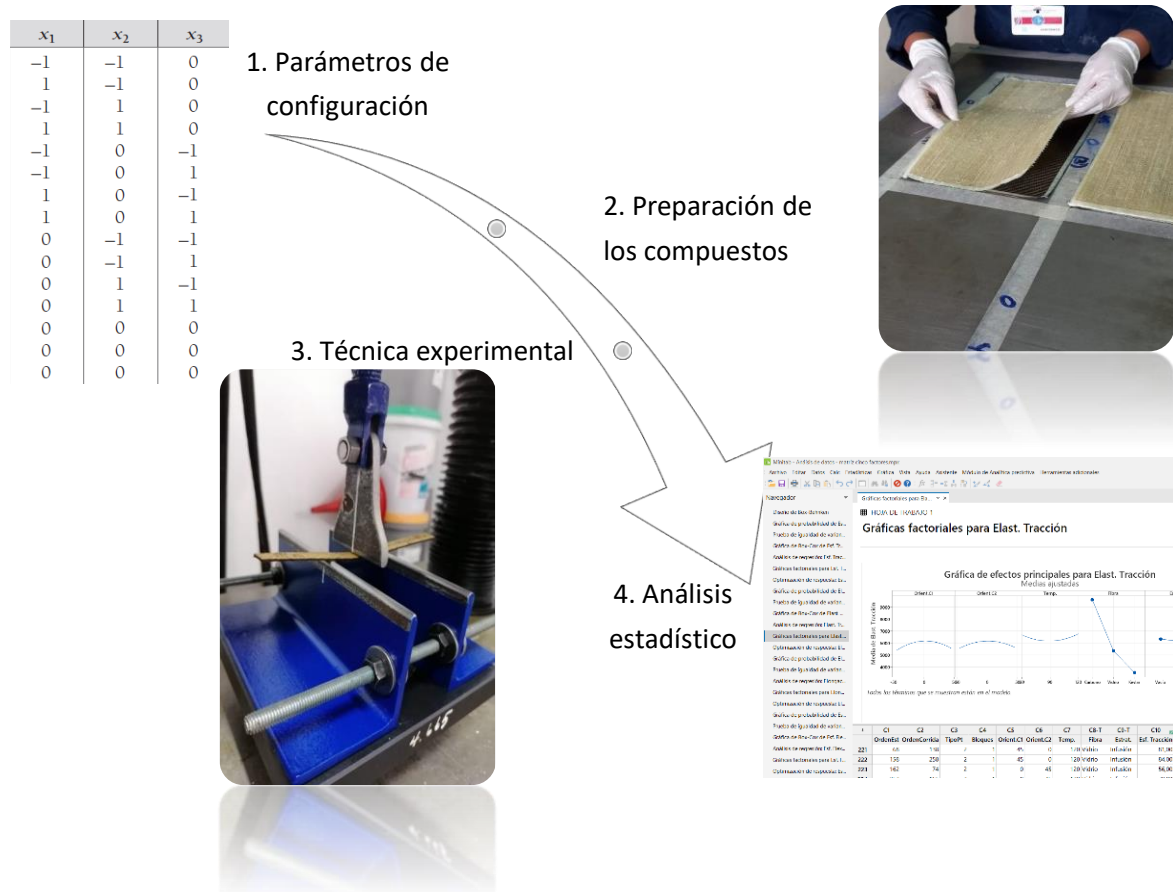


Figura 2.2. Procedimiento de la caracterización y optimización del compuesto

Como primer paso se definen los parámetros para la configuración del compuesto, con la que se generará la matriz de diseño, en la que se dispondrán las combinaciones necesarias para el análisis propuesto. Con la definición de las combinaciones se conforma el compuesto con sus respectivas replicas o repeticiones. Una vez obtenido las probetas de los composites para cada combinación, se ensayan las probetas y se determinan las propiedades mecánicas. Finalmente, se analizan los resultados usando el software.

### 2.3. Parámetros de configuración experimental del material (matriz de diseño)

En la Tabla 2.1 se describen los parámetros (factores y niveles) utilizados en la conformación del híbrido, además se enlistan las propiedades mecánicas a determinar (tracción, flexión e impacto) luego de los ensayos mecánicos.

Tabla 2.1. Parámetros de entrada para la configuración experimental.

Parámetros de entrada		Respuesta de salida	
Factores	Niveles	Ensayo	Propiedades
Orientación primera capa f. de chambira	-45°	Tracción	Esfuerzo máximo
	0°		Módulo de Tracción
	45°		Elongación
Orientación segunda capa f. de chambira	-45°	Flexión	Esfuerzo máximo
	0°		Módulo de Flexión
	45°		Deflexión
Temperatura	60°C	Impacto	Energía media de fallo
	90°C		
	120°C		
Tipo de fibra sintética	Carbono		
	Vidrio		
	Kevlar		
Tipo de moldeo	Vacío		
	Infusión		

Es importante considerar los intervalos en la determinación de los niveles de los factores. Primeramente, para el diseño experimental ejecutado, los factores deben ser cuantitativos. Además, los niveles deben tener rangos equidistantes a partir de un valor neutral (ej. -45°, 0°, 45°). Detallando el ejemplo, se estableció la orientación de la capa 1 de la fibra natural por lo siguiente:

Orientación neutral 1 en 0°, esto por estar alineado longitudinalmente al eje de aplicación de carga para un ensayo de tracción y que es la orientación que resulta mayor resistencia. Orientación positiva (+45°) y negativo (-45°), esto por ser el ángulo donde ya se ha demostrado que provoca una excelente resistencia a la tracción, flexión e impacto, más efectivo aun cuando en casos donde se combinan al mismo tiempo dos capas con orientación positiva y negativa.

Loa mismo ocurre con la temperatura, donde la temperatura neutral es de 90°C puesto que en investigaciones anteriores la temperatura que se trabajo es curar el compuesto a 80°C, logrando obtener excelentes propiedades mecánicas del material investigado [137].

### 2.3.1. Diseño MSR del material hibrido

El diseño de Box-Behnken, aplicado en esta investigación, es eficiente debido al número de corridas o casos para su aplicación (15 casos). Esto debido a la particularidad del diseño, que no cuenta con tratamientos en los vértices de la región experimental, volviéndolo más adecuado a situaciones en los que los casos en los extremos son complicados de ejecutar. Además de que, al adicionar dos factores categóricos, a los tres factores continuos ya descritos en las matrices antes dispuestas, es más eficiente y práctico emplear un diseño que brinde los resultados deseados con menos corridas. En el diseño de Box-Behnken, para tres factores continuos, requiere de 15 casos o corridas experimentales. Estas corridas se especifican en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Matriz de diseño de Box-Behnken para tres factores.

<b>Casos</b>	<b>Orient. C1</b>	<b>Orient. C2</b>	<b>Temp.</b>
<b>1</b>	0	-1	-1
<b>2</b>	-1	0	-1
<b>3</b>	1	0	-1
<b>4</b>	0	1	-1
<b>5</b>	-1	-1	0
<b>6</b>	1	-1	0
<b>7</b>	0	0	0
<b>8</b>	0	0	0
<b>9</b>	0	0	0
<b>10</b>	-1	1	0

<b>11</b>	1	1	0
<b>12</b>	0	-1	1
<b>13</b>	-1	0	1
<b>14</b>	1	0	1
<b>15</b>	0	1	1

### 2.3.2. Matriz de diseño (configuraciones)

En base a lo comentado en párrafos anteriores, se involucran los cinco factores de interés para armar la matriz de diseño en función de la matriz antes descrita en el diseño de Box-Behnken. En la Tabla 2.3 se pueden evidenciar los 90 casos base que involucran los tres factores continuos (orientación de capa 1, orientación de capa 2 y temperatura) y los dos factores categóricos (tipo de fibra y tipo de moldeo). Además, en la tabla se tienen las réplicas requeridas para el desarrollo del proceso experimental. Cada una de las combinaciones de la matriz de diseño, se repite (replica), para cada uno de los ensayos a realizar.

Tabla 2.3. Matriz de diseño con los cinco factores de estudio.

<b>Casos</b>	<b>Tipo de moldeo</b>	<b>Fibra Sint. C0</b>	<b>Orient. FCh. C1</b>	<b>Orient. FCh. C2</b>	<b>Temp.</b>	<b>Réplicas</b>
<b>1</b>	Vacío	Carbono	0	-45	60	3
<b>2</b>	Vacío	Carbono	-45	0	60	3
<b>3</b>	Vacío	Carbono	45	0	60	3
<b>4</b>	Vacío	Carbono	0	45	60	3
<b>5</b>	Vacío	Carbono	-45	-45	90	3
<b>6</b>	Vacío	Carbono	45	-45	90	3
<b>7</b>	Vacío	Carbono	0	0	90	3
<b>8</b>	Vacío	Carbono	0	0	90	3
<b>9</b>	Vacío	Carbono	0	0	90	3
<b>10</b>	Vacío	Carbono	-45	45	90	3
<b>11</b>	Vacío	Carbono	45	45	90	3
<b>12</b>	Vacío	Carbono	0	-45	120	3
<b>13</b>	Vacío	Carbono	-45	0	120	3
<b>14</b>	Vacío	Carbono	45	0	120	3
<b>15</b>	Vacío	Carbono	0	45	120	3
<b>16</b>	Vacío	Vidrio	0	-45	60	3
<b>17</b>	Vacío	Vidrio	-45	0	60	3
<b>18</b>	Vacío	Vidrio	45	0	60	3
<b>19</b>	Vacío	Vidrio	0	45	60	3



<b>Casos</b>	<b>Tipo de moldeo</b>	<b>Fibra Sint. C0</b>	<b>Orient. FCh. C1</b>	<b>Orient. FCh. C2</b>	<b>Temp.</b>	<b>Réplicas</b>
<b>20</b>	Vacío	Vidrio	-45	-45	90	3
<b>21</b>	Vacío	Vidrio	45	-45	90	3
<b>22</b>	Vacío	Vidrio	0	0	90	3
<b>23</b>	Vacío	Vidrio	0	0	90	3
<b>24</b>	Vacío	Vidrio	0	0	90	3
<b>25</b>	Vacío	Vidrio	-45	45	90	3
<b>26</b>	Vacío	Vidrio	45	45	90	3
<b>27</b>	Vacío	Vidrio	0	-45	120	3
<b>28</b>	Vacío	Vidrio	-45	0	120	3
<b>29</b>	Vacío	Vidrio	45	0	120	3
<b>30</b>	Vacío	Vidrio	0	45	120	3
<b>31</b>	Vacío	Kevlar	0	-45	60	3
<b>32</b>	Vacío	Kevlar	-45	0	60	3
<b>33</b>	Vacío	Kevlar	45	0	60	3
<b>34</b>	Vacío	Kevlar	0	45	60	3
<b>35</b>	Vacío	Kevlar	-45	-45	90	3
<b>36</b>	Vacío	Kevlar	45	-45	90	3
<b>37</b>	Vacío	Kevlar	0	0	90	3
<b>38</b>	Vacío	Kevlar	0	0	90	3
<b>39</b>	Vacío	Kevlar	0	0	90	3
<b>40</b>	Vacío	Kevlar	-45	45	90	3
<b>41</b>	Vacío	Kevlar	45	45	90	3
<b>42</b>	Vacío	Kevlar	0	-45	120	3
<b>43</b>	Vacío	Kevlar	-45	0	120	3
<b>44</b>	Vacío	Kevlar	45	0	120	3
<b>45</b>	Vacío	Kevlar	0	45	120	3
<b>46</b>	Infusión	Carbono	0	-45	60	3
<b>47</b>	Infusión	Carbono	-45	0	60	3
<b>48</b>	Infusión	Carbono	45	0	60	3
<b>49</b>	Infusión	Carbono	0	45	60	3
<b>50</b>	Infusión	Carbono	-45	-45	90	3
<b>51</b>	Infusión	Carbono	45	-45	90	3
<b>52</b>	Infusión	Carbono	0	0	90	3
<b>53</b>	Infusión	Carbono	0	0	90	3
<b>54</b>	Infusión	Carbono	0	0	90	3
<b>55</b>	Infusión	Carbono	-45	45	90	3
<b>56</b>	Infusión	Carbono	45	45	90	3

<b>Casos</b>	<b>Tipo de moldeo</b>	<b>Fibra Sint. C0</b>	<b>Orient. FCh. C1</b>	<b>Orient. FCh. C2</b>	<b>Temp.</b>	<b>Réplicas</b>
57	Infusión	Carbono	0	-45	120	3
58	Infusión	Carbono	-45	0	120	3
59	Infusión	Carbono	45	0	120	3
60	Infusión	Carbono	0	45	120	3
61	Infusión	Vidrio	0	-45	60	3
62	Infusión	Vidrio	-45	0	60	3
63	Infusión	Vidrio	45	0	60	3
64	Infusión	Vidrio	0	45	60	3
65	Infusión	Vidrio	-45	-45	90	3
66	Infusión	Vidrio	45	-45	90	3
67	Infusión	Vidrio	0	0	90	3
68	Infusión	Vidrio	0	0	90	3
69	Infusión	Vidrio	0	0	90	3
70	Infusión	Vidrio	-45	45	90	3
71	Infusión	Vidrio	45	45	90	3
72	Infusión	Vidrio	0	-45	120	3
73	Infusión	Vidrio	-45	0	120	3
74	Infusión	Vidrio	45	0	120	3
75	Infusión	Vidrio	0	45	120	3
76	Infusión	Kevlar	0	-45	60	3
77	Infusión	Kevlar	-45	0	60	3
78	Infusión	Kevlar	45	0	60	3
79	Infusión	Kevlar	0	45	60	3
80	Infusión	Kevlar	-45	-45	90	3
81	Infusión	Kevlar	45	-45	90	3
82	Infusión	Kevlar	0	0	90	3
83	Infusión	Kevlar	0	0	90	3
84	Infusión	Kevlar	0	0	90	3
85	Infusión	Kevlar	-45	45	90	3
86	Infusión	Kevlar	45	45	90	3
87	Infusión	Kevlar	0	-45	120	3
88	Infusión	Kevlar	-45	0	120	3
89	Infusión	Kevlar	45	0	120	3
90	Infusión	Kevlar	0	45	120	3

## 2.4. Preparación del material compuesto híbrido

### 2.4.1. Elaboración del material híbrido

Dentro del conformado del material híbrido es importante recalcar la forma de obtención del tejido de fibra natural de chambira, procedente de la región amazónica del Ecuador. Luego de extraer de la planta cumare (*Astrocaryum chambira*), se desfibrila y se trata con sosa caustica ( $NaOH$ ), que permite liberar la celulosa de la lignina. Luego de este paso y el secado respectivo, se conforma el tejido en un telar artesanal de artesanos indígenas de Salsaca – Ecuador). Se obtiene un manto de tejido a  $0^\circ$  de orientación de 1 m de ancho por 3 m de longitud. Finalmente se hace una distribución de corte en función de las orientaciones establecidas en los casos de la matriz de diseño para obtener en forma de placas, planchas o capas de tejido, los mismos que serán utilizados posteriormente en el conformado del híbrido, como se puede observar en la Figura 2.3.

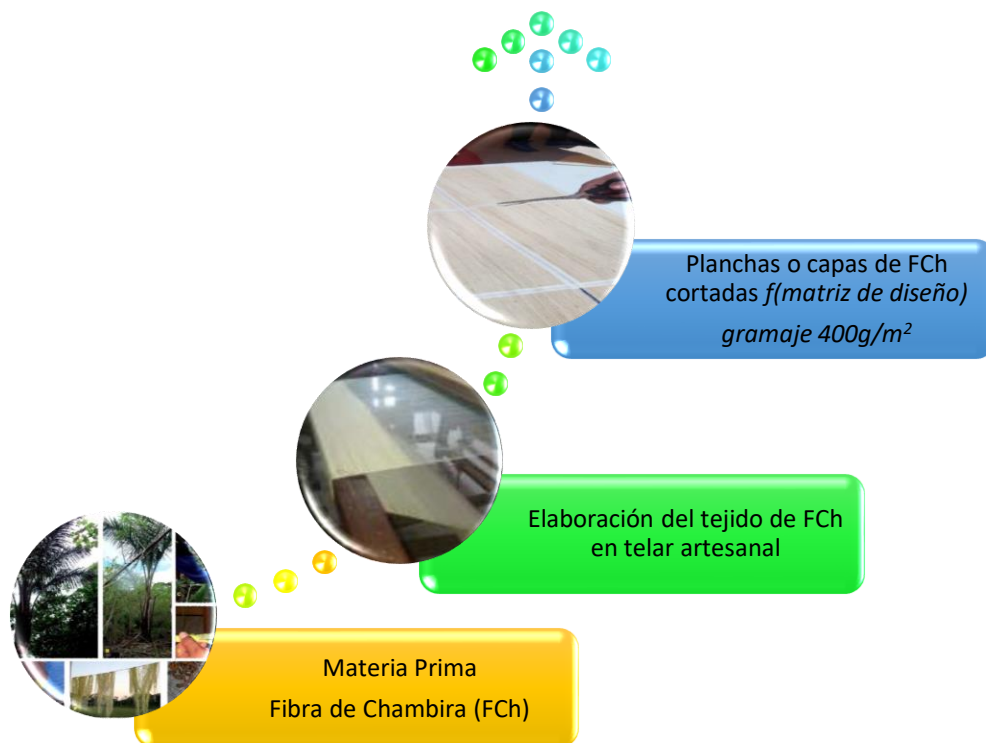


Figura 2.3. Proceso de obtención del tejido de fibra de chambira.

Con el tejido de fibra natural de chambira y las tres fibras sintéticas que se utilizarán como capa base en todos los casos y replicas, se procede al cálculo de fracciones volumétricas que

determinarán las cantidades de matriz (resina poliéster) y el refuerzo (capas de fibra sintética + fibra natural). Este proceso de muestra esquemáticamente en la Figura 2.4.



Figura 2.4. Proceso de cálculo de fracciones volumétricas del híbrido.

#### 2.4.2. Fracciones volumétricas del material híbrido

Para estimar las fracciones volumétricas, primero es necesario calcular la cantidad de matriz en función del peso de las fibras, para lo cual se emplea la expresión descrita a continuación.

$$C.R. = \frac{100}{127} \cdot P.F.$$

$$C.E. = \frac{27}{127} \cdot P.F.$$

Donde  $C.R.$  es la cantidad de resina,  $C.E.$  es la cantidad de endurecedor y  $P.F.$  es el peso de la fibra.

Con las expresiones anteriores y las mediciones realizadas individualmente a cada plancha de material, se detalla en la Tabla 2.4 los pesos de las fibras y el peso de la matriz, obteniendo pequeñas variaciones, pues en el conformado del tejido y el corte de la fibra hay pérdidas o ganancia de volumen de material. En la Figura 2. se especifica la distribución para el corte de la fibra de chambira para cas distintas probetas.

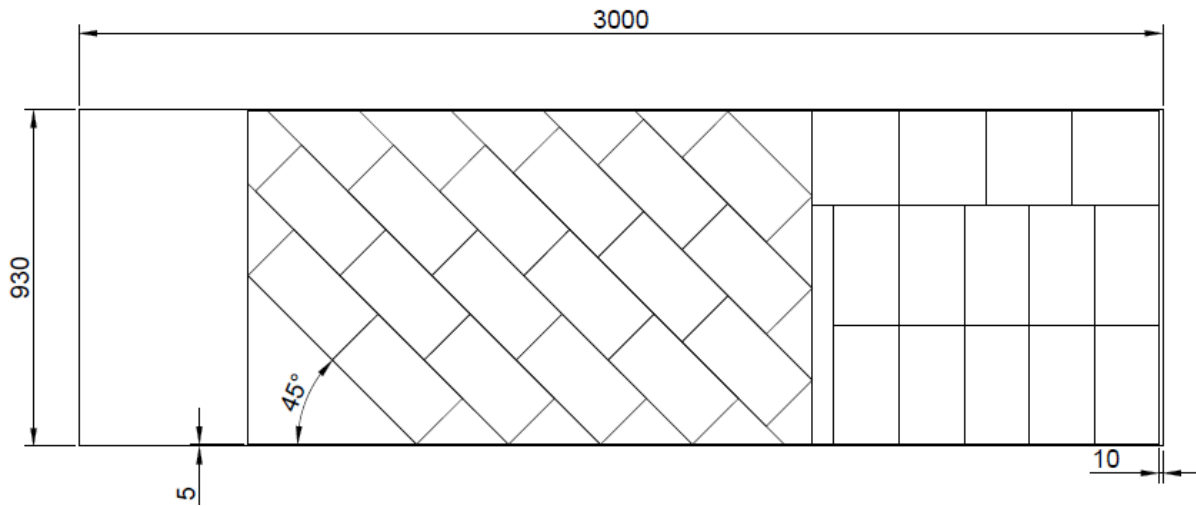


Figura 2.5. Cortes de fibra 0° = 14; cortes de fibra 45° = 16.

Tabla 2.4. Peso de cada componente del material compuesto híbrido.

Casos	Orient. C1	Orient. C2	Temp.	Fibra	Peso de fibra [g]		Peso matriz [g]
					Chambira	Sintética	
<b>C0= Fibra de Carbono (FC); C1=Chambira; C2=Chambira</b>							
1	0	-45	60	Carbono	36	14	39,37
2	-45	0	60	Carbono	37	16	41,73
3	45	0	60	Carbono	35	17	40,95
4	0	45	60	Carbono	37	15	40,95
5	-45	-45	90	Carbono	38	15	41,73
6	45	-45	90	Carbono	36	14	39,37
7	0	0	90	Carbono	38	17	43,31
8	0	0	90	Carbono	38	17	43,31
9	0	0	90	Carbono	37	14	40,16
10	-45	45	90	Carbono	36	15	40,16
11	45	45	90	Carbono	35	17	40,95
12	0	-45	120	Carbono	38	16	42,52
13	-45	0	120	Carbono	39	17	44,09
14	45	0	120	Carbono	35	15	39,37
15	0	45	120	Carbono	38	16	42,52
<b>Promedio compuesto con base FC</b>					36,87	15,67	41,37

Casos	Orient.	Orient.	Temp.	Fibra	Peso de fibra [g]		Peso matriz [g]
	C1	C2			Chambira	Sintética	
<b>C0= Fibra de Vidrio (FC); C1=Chambira; C2=Chambira</b>							
16	0	-45	60	Vidrio	35	17	40,94
17	-45	0	60	Vidrio	36	19	43,31
18	45	0	60	Vidrio	36	17	41,73
19	0	45	60	Vidrio	35	17	40,94
20	-45	-45	90	Vidrio	38	19	44,88
21	45	-45	90	Vidrio	36	18	42,52
22	0	0	90	Vidrio	38	20	45,67
23	0	0	90	Vidrio	38	22	47,24
24	0	0	90	Vidrio	36	18	42,52
25	-45	45	90	Vidrio	35	19	42,52
26	45	45	90	Vidrio	34	21	43,31
27	0	-45	120	Vidrio	35	18	41,73
28	-45	0	120	Vidrio	36	19	43,31
29	45	0	120	Vidrio	37	18	43,31
30	0	45	120	Vidrio	36	19	43,31
<b>Promedio compuesto con base FV</b>					36,07	18,73	43,15

Casos	Orient.	Orient.	Temp.	Fibra	Peso de fibra [g]		Peso matriz [g]
	C1	C2			Chambira	Sintética	
<b>C0= Fibra de Kevlar (Fk); C1=Chambira; C2=Chambira</b>							
31	0	-45	60	Kevlar	32,6	37	55,00
32	-45	0	60	Kevlar	34,0	39	57,00
33	45	0	60	Kevlar	32,4	35	53,00
34	0	45	60	Kevlar	33,6	38	56,00
35	-45	-45	90	Kevlar	32,2	35	53,00
36	45	-45	90	Kevlar	32,6	36	54,00
37	0	0	90	Kevlar	33,0	35	54,00
38	0	0	90	Kevlar	32,4	37	55,00
39	0	0	90	Kevlar	34,0	39	57,00
40	-45	45	90	Kevlar	34,0	39	57,00
41	45	45	90	Kevlar	32,6	37	55,00
42	0	-45	120	Kevlar	34,0	39	57,00
43	-45	0	120	Kevlar	32,4	36	54,00
44	45	0	120	Kevlar	34,0	39	57,00
45	0	45	120	Kevlar	32,4	37	55,00
<b>Promedio compuesto con base Fk</b>					33,08	37,20	55,27

Con la información antes descrita, se calculan las fracciones volumétricas para cada uno de los grupos de materiales, diferenciados por el tipo de fibra sintética. El gramaje del tejido de fibra natural de chambira fue de 400 g/m<sup>2</sup>. En la Tabla 2.5 se tienen las fracciones volumétricas estimadas.

Tabla 2.5. Fracciones volumétricas de los refuerzos y la matriz.

		<b>Peso [g]</b>	<b>Fracción Volumétrica [%]</b>
<b>Carbono</b>	Total	94	100
	Fibra natural	37	39
	Fibra sintética	16	17
	Matriz	41	44
<b>Vidrio</b>	Total	98	100
	Fibra natural	36	37
	Fibra sintética	19	19
	Matriz	43	44
<b>Kevlar</b>	Total	126	100
	Fibra natural	33	26
	Fibra sintética	37	30
	Matriz	55	44

### 2.4.3. Conformado del material híbrido

El conformado del material sigue los pasos esquematizados en la Figura 2.. El conformado del material híbrido a base de matriz epoxi se desarrolla con la composición de las 3 capas de fibra (natural y sintética) en las distintas orientaciones, según lo descrito en la Tabla 2.3. Según el caso de estudio esto se logra mediante, la mojabilidad del refuerzo en base a la proporcionalidad del peso de la fibra natural chambira (FCH) y el peso de la fibra sintética vidrio (Fibra de carbono, fibra de vidrio, fibra de Kevlar), la resina epoxi se combina con el endurecedor provocando así la matriz termoestable que permite realizar la coalescencia de los refuerzos. El proceso para la preparación del compuesto se describe en la Figura 2..

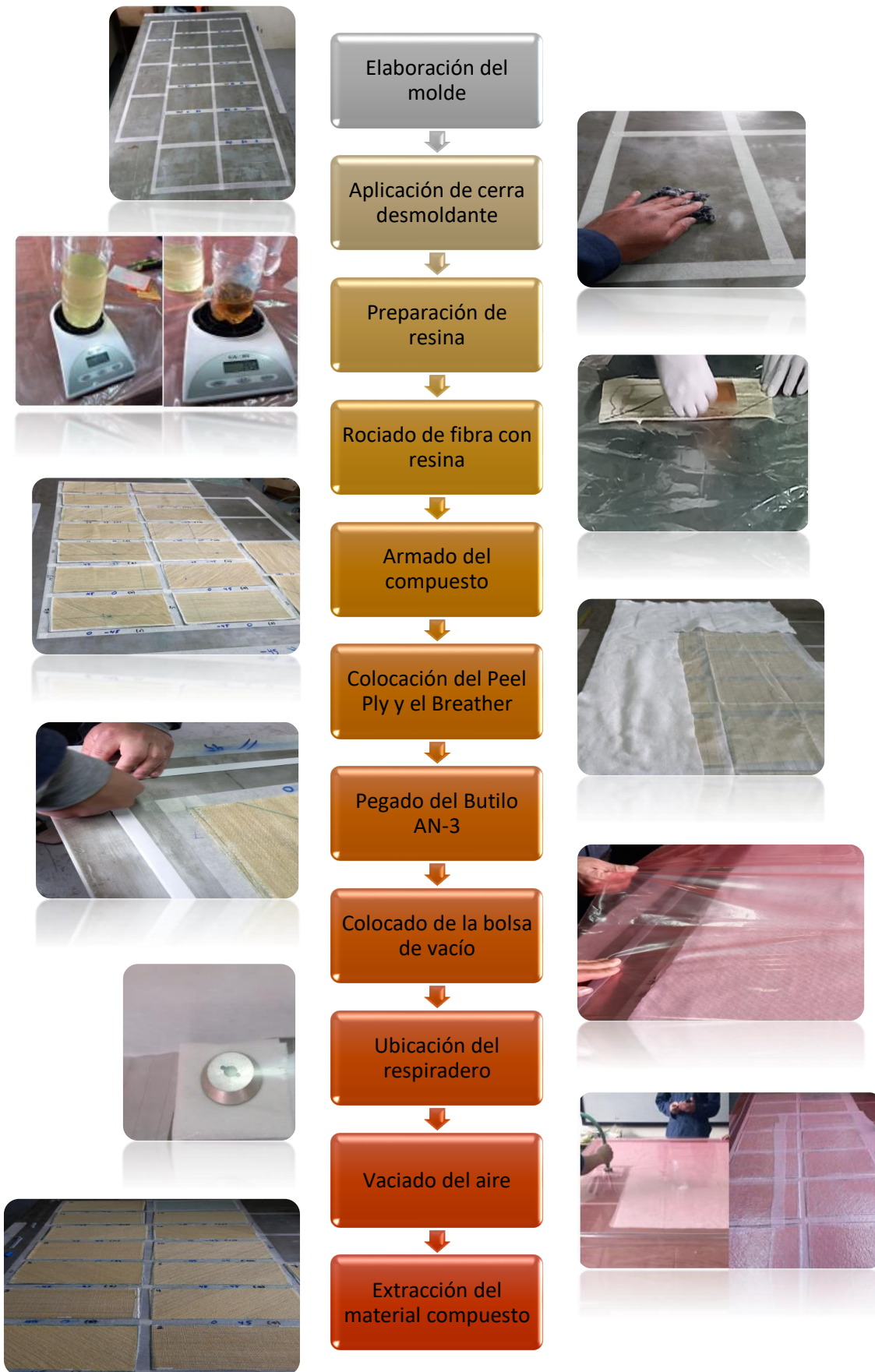


Figura 2.6. Proceso de conformado de los materiales compuestos.



#### 2.4.4. Obtención de probetas o réplicas para la caracterización mecánica

Es importante indicar que cada caso (1 al 15) se obtuvieron físicamente en forma de planchas o tableros de 330 x 170 mm, con un gramaje de 400 g/m<sup>2</sup>; luego de lo cual, mediante proceso de corte laser se obtuvieron las probetas o especímenes para los diferentes ensayos según la distribución que se visualiza en la Figura 2..

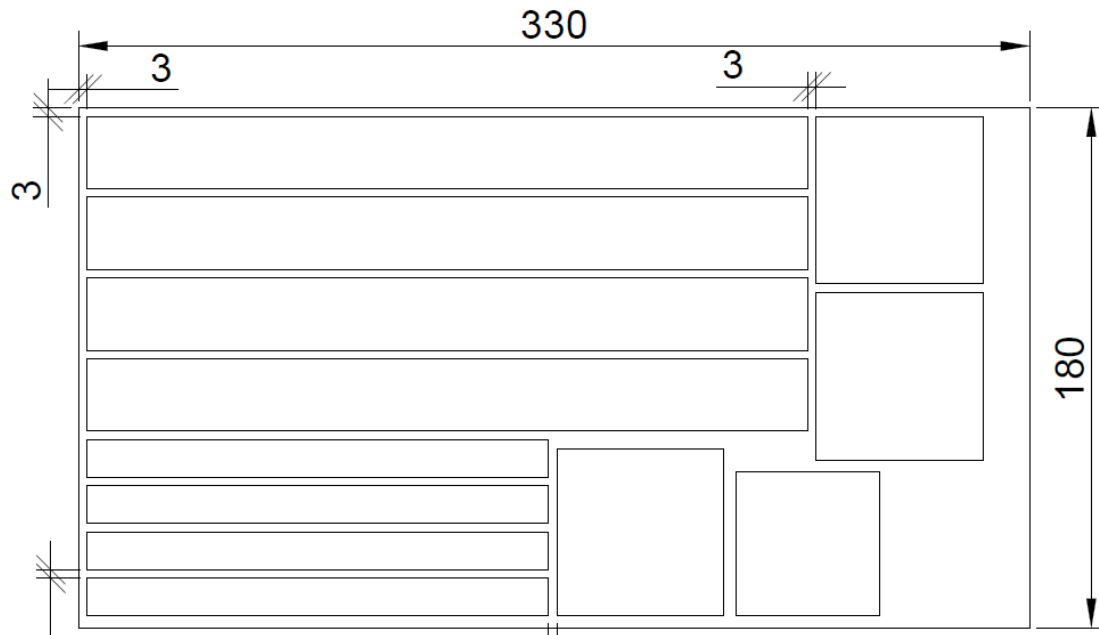


Figura 2.7. Distribución de probetas para ensayos.

Con la distribución de corte mostrado se obtienen las probetas en juegos de 3 especímenes o réplicas de una misma configuración. Todo en base a la matriz de diseño que se evidencia en la Tabla 2.3.

### 2.5. Técnicas experimentales

#### 2.5.1. Análisis Dinámico Mecánico (DMA) del material híbrido

El análisis mecánico dinámico (DMA) al que fue expuesto el material híbrido, se basa en la posibilidad de poder evaluar las respuestas que este ensayo permite, como el módulo elástico (de almacenamiento), módulo viscoso (de pérdidas) y ángulo de desfase ( $\tan \delta$ ) que el material sufre dentro de la cámara de ensayo. Esto debido a que se ha establecido que existe una mayor amortiguación para compuestos reforzados con fibra natural que los compuestos

reforzados con fibras sintéticas como la de vidrio, mientras que el tan  $\delta$  del yute y el lino se encontró que los compuestos reforzados con fibra son aproximadamente 13% y 16% mayor que los compuestos reforzados con fibra de vidrio [138].

El DMA realizado, está determinado para diferentes configuraciones de apilamiento del material, en análisis y otras combinaciones como: fibras sintéticas puras y de híbridos de matriz epoxi reforzada con refuerzo de fibra natural (chambira) y sintética (vidrio, carbono y kevlar), se realizaron utilizando un analizador mecánico dinámico (DMA 850, procedencia EEUU). La prueba se realizó según la norma ASTM D 5023 con la dimensión del espécimen de 60 (l)  $\times$  13 (a) mm<sup>2</sup>. La temperatura aumentó a razón de 3°C por minuto desde una temperatura de 25°C hasta 150 °C a una frecuencia de 1 Hz. Se empleó refrigeración por convección con la ayuda de un ventilador.

Los casos analizados (S1 a S14) de DMA se presenta en la siguiente Tabla 2.5, donde se pueden considerar casos importantes que permitirán relacionar sus resultados con las respuestas obtenidas en los ensayos realizados previamente de tracción.

Tabla 2.6. Casos de apilamiento del material híbrido para DMA.

Casos	Orden de Apilamiento	Espesor (mm)
S1	Ch+Ch+Ch+Ch+Ch	4,89
S2	Ch+V	1,40
S3	Ch+V+Ch	2,16
S4	V+Ch+V	1,73
S5	Ch+V+Ch+V	2,79
S6	Ch+V+Ch+V+Ch	3,23
S7	V+Ch+V+Ch+V	2,52
S8	V+V+V+V+V	1,72
S9	C+C+C+C+C	1,45
S10	K+K+K+K+K	2,79
S11	Ch+C	1,53
S12	Ch+K	1,56
S13	Ch+C+Ch	2,37
S14	Ch+K+Ch	2,31

**Ch = Fibra de chambira, V = Fibra de vidrio**  
**C = Fibra de carbono, K = Fibra de aramida - Kevlar**

Para el análisis se tomó en cuenta los casos S2 y S3 para el vidrio, S11 y S13 para el caso del carbono y S12 y S14 para el caso del Kevlar, que se configuran con 1 y dos capas de fibra

natural de chambira y que son de similares o iguales configuraciones del material utilizado en la caracterización mecánica de tracción del híbrido mediante MSR.

### 2.5.2. Caracterización mecánica

Para los ensayos a tracción se dispone de la máquina universal (WAW600B). Con esta máquina se determinan las propiedades mecánicas a tracción del nuevo material tales como carga máxima, esfuerzo máximo, módulo de elásticas y porcentaje, de elongación con base en ASTM D3039, la cual consiste en aplicar una fuerza axial entre dos puntos hasta conseguir su ruptura. En la Figura 2. se muestra el ensayo a tracción en la máquina descrita.

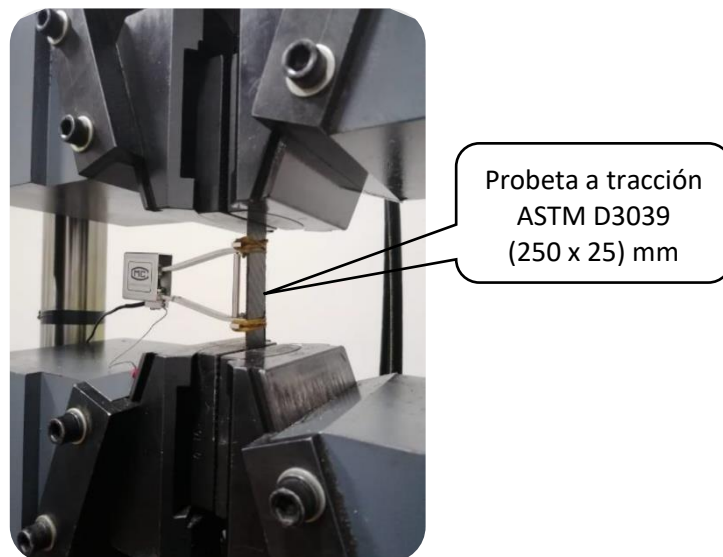


Figura 2.8. Máquina universal (WAW600B) para ensayos de tracción.

Para los ensayos a flexión, al igual que en el caso anterior, se dispone de la máquina universal (WAW600B). Con ella, se puede determinar las propiedades mecánicas a flexión del nuevo material tales como: carga máxima, esfuerzo máximo, módulo de elasticidad, deformación se utilizó la norma ASTM D7264 la cual trata de analizar la carga vertical ejecutada en el centro de la probeta que esta simplemente apoyada. En la Figura 2. se ilustra el ensayo a flexión.

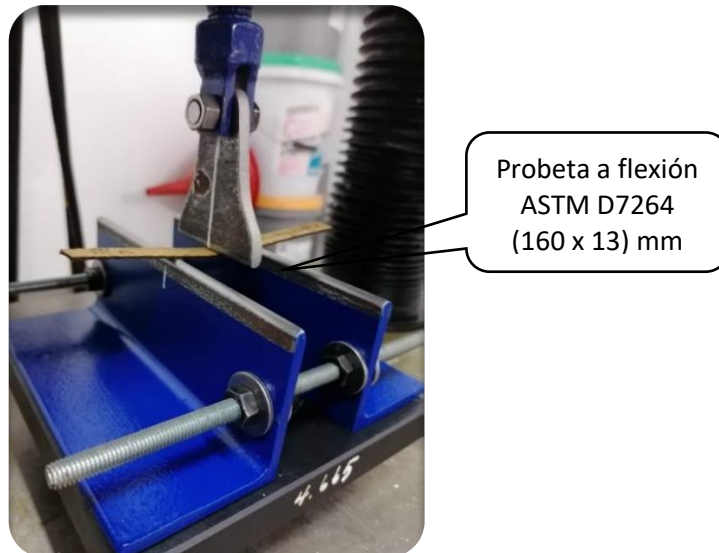


Figura 2.9. Máquina universal (WAW600B) para ensayos de flexión.

Para estimar la energía media de fallo, se utilizó ASTM D5628. Esta norma se utiliza para probetas planas y rígidas mediante el uso de un dardo, en el que mediante la caída de este a diferentes alturas. El valor requerido para estimar la energía de fallo se encuentra con la altura a la que la probeta falla. La norma señala que con el experimento se consigue determinar la energía media de fallo con la siguiente expresión:

$$MEF = h \cdot w \cdot f$$

donde  $h$  es la altura máxima de ruptura,  $w$  es la masa del dardo y  $f$  es un factor de conversión.

## 2.6. Tratamiento de datos y análisis estadístico

El análisis estadístico, a través del diseño de experimentos planteado, basado en el diseño de Box-Behnken, se esquematiza en el diagrama plasmado en la Figura 2.. La tabulación de los datos consta de la revisión de la información facilitada en los informes de los ensayos y su respectiva transcripción a una hoja de cálculo para su mejor edición y organización previo al análisis. Se entiende que el ANOVA es el corazón de la aplicación del DOE. Para este caso, se desglosa la varianza y se estudia el peso de cada una de las fuentes de variabilidad sobre las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto; verificando esto con los valores de significancia.

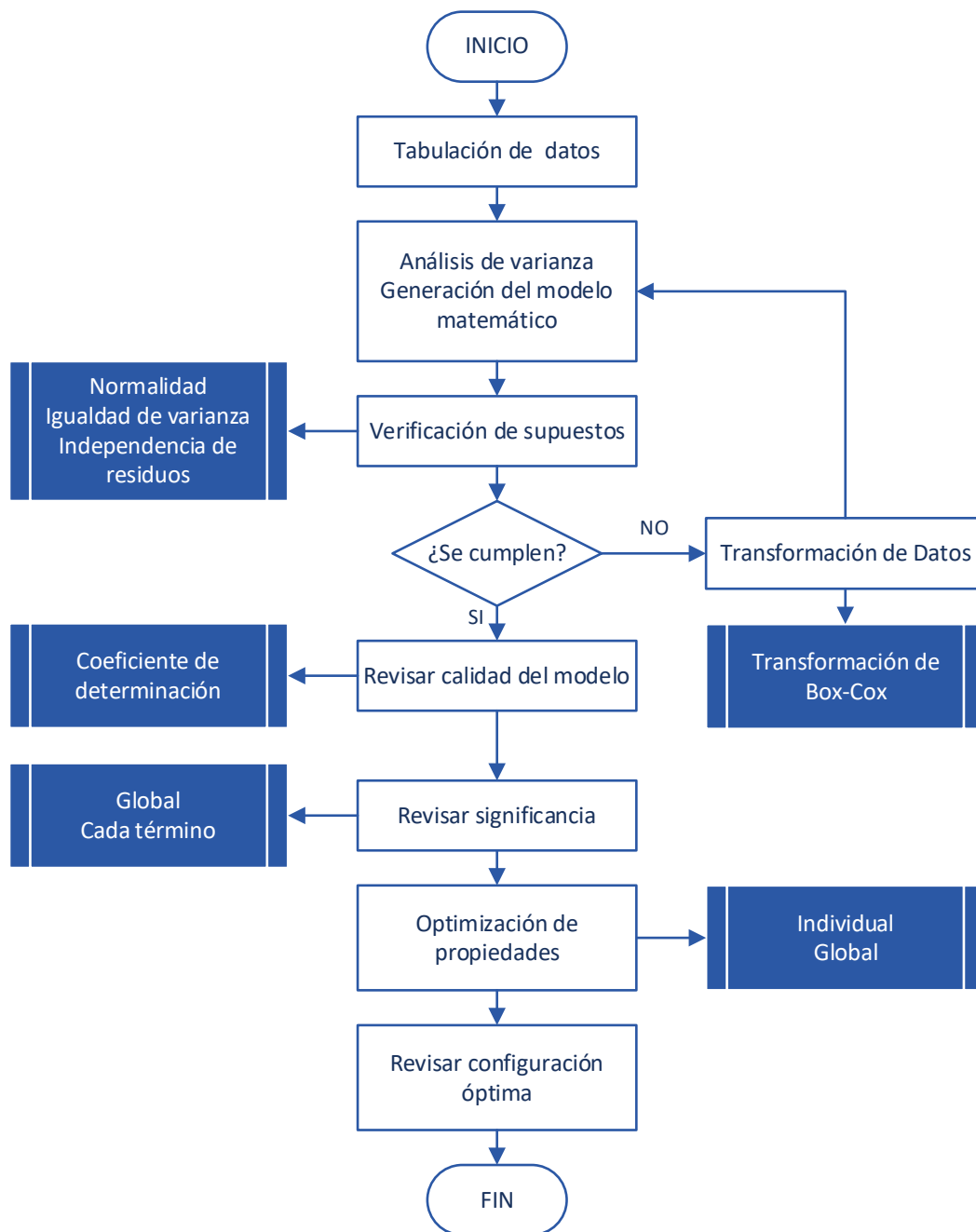


Figura 2.2. Proceso de tratamiento y análisis de datos.

Tras el ANOVA, se genera un modelo matemático y con este, se revisan los supuestos paramétricos sobre los residuos de los datos. En el caso de que no se lleguen a cumplir los supuestos, se realizará la respectiva transformación de los datos, lo que hará que se aplique nuevamente el análisis de varianza y posterior verificación de supuestos.

Con los resultados del ANOVA, habiendo pasado la verificación de supuestos, se revisa la significancia de las fuentes de variabilidad, significancia del modelo y el coeficiente de

determinación, esto para entender el comportamiento del compuesto en relación a sus componentes y la calidad como estos son descritos por el modelo matemático generado.

Finalmente se realiza la optimización individual, de cada propiedad y posterior optimización global. El análisis estadístico concluye con la identificación de los parámetros óptimos para la elaboración del material compuesto.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS

#### 3.1. Propiedades de las fibras individuales

##### 3.1.1. Determinación de propiedades de fibras del híbrido

Como parámetro de control y comparación, se realizaron la caracterización física y mecánica de las fibras sintéticas y naturales a utilizar como refuerzos dentro del híbrido, estas son las fibras de chambira, carbono, vidrio y Kevlar.

##### 3.1.2. Refuerzo natural – fibra de chambira (*Astrocaryum*)

Para obtener la densidad de la fibra de chambira se utilizó un método gravimétrico, consistente en verter la resina en un vaso de precipitados, añadir peso y observar el cambio respecto al volumen original. En la Tabla 3.1 se describen los parámetros mencionados en el párrafo anterior, a término de las mediciones y estimaciones se tiene la densidad promedio para el tejido de fibra de chambira.

Tabla 3.1. Determinación de la densidad del tejido de fibra de chambira.

Prueba	Peso [g]	Volumen inicial [cm <sup>3</sup> ]	Volumen final [cm <sup>3</sup> ]	Variación [cm <sup>3</sup> ]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]
1	14	150	165	15	0,933
2	19	150	166	16	1,187
3	16	150	165	15	1,067
4	22	150	168	18	1,222
<b>Promedio</b>					<b>1,102</b>

La determinación de las propiedades mecánicas a tracción de la fibra de chambira se realizó bajo los mismos parámetros y equipos que se utilizaron para las probetas del híbrido. Esta información se plasma en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Determinación de propiedades mecánicas a tracción - fibra de chambira.

Prueba	Módulo de elasticidad [GPa]	Esfuerzo max Tracción [MPa]	Elongación [%]
1	1,13	43,61	14,0

<b>2</b>	1,00	46,96	16,2
<b>3</b>	1,29	45,98	11,2
<b>Promedio</b>	1,14	45,50	13,8

### 3.1.3. Refuerzos sintéticos – fibra de carbono, vidrio y Kevlar

Para estimar la densidad de la fibra de carbono se utilizó un vaso de precipitación con 125 cm<sup>3</sup> de resina, mediante el método gravimétrico, que consiste en determinar el volumen inicial, añadir un peso y observar los cambios que experimenta este volumen original. En la Tabla 3.3 se detallan las pruebas realizadas y los valores dentro de cada una.

Tabla 3.3. Determinación de la densidad de la fibra de carbono.

<b>Prueba</b>	<b>Peso [g]</b>	<b>Volumen inicial [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen final [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Variación [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Densidad [g/cm<sup>3</sup>]</b>
<b>1</b>	7	125	135	10	0,700
<b>2</b>	19	125	138	13	1,461
<b>3</b>	32	125	153	28	1,142
<b>4</b>	36	125	155	30	1,210
<b>Promedio</b>					1,128

Al igual que en la fibra anterior, se aplicó el método gravimétrico para determinar la densidad de la fibra de vidrio. En la Tabla 3.4 se observan los valores medidos en las pruebas realizadas para el cálculo de la densidad de la fibra de vidrio.

Tabla 3.4. Determinación de la densidad de la fibra de vidrio.

<b>Prueba</b>	<b>Peso [g]</b>	<b>Volumen inicial [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen final [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Variación [cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Densidad [g/cm<sup>3</sup>]</b>
<b>1</b>	2,912	80	81,70	1,70	1,713
<b>2</b>	2,638	80	82,00	2,00	1,319
<b>3</b>	2,702	90	91,60	1,60	1,689
<b>Promedio</b>					1,573

Para estimar la densidad de la fibra de Kevlar se emplea el método ya descrito para el resto de las fibras. En este caso los datos de la densidad medida en las distintas pruebas se plasma en la

Tabla 3.5.



Tabla 3.5. Determinación de la densidad de la fibra de Kevlar.

Prueba	Peso [g]	Volumen inicial [cm <sup>3</sup> ]	Volumen final [cm <sup>3</sup> ]	Variación [cm <sup>3</sup> ]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]
1	0,2117	150	149,75	0,15	1,411
2	0,2143	150	149,74	0,15	1,429
3	0,2027	150	149,75	0,15	1,351
<b>Promedio</b>					1,397

### 3.2. Resultados de la caracterización mecánica del híbrido

En la tabla 3.6 se presentan los resultados de la caracterización mecánica a tracción, flexión e impacto, con los que se efectúan los análisis descriptivos e inferenciales.

Tabla 3.6. Medias de los resultados de los ensayos.

Casos	Esf. a Tracción [MPa]	Mod. Tracción [MPa]	Elong. [%]	Esf. a Flexión [MPa]	Mod. Flexión [MPa]	Deflex. [mm]	Energía Impacto [J]
1	120,95	9239,58	7,37	64,62	2086,67	8,98	3,44
2	104,10	10569,89	4,72	73,47	4920,00	5,37	4,01
3	114,58	10018,98	7,00	76,63	6810,00	5,07	3,96
4	122,04	10981,49	8,15	49,82	1803,33	7,86	5,96
5	94,24	8651,18	4,51	33,30	820,00	9,62	4,47
6	100,67	7944,75	6,00	33,00	1120,00	8,73	3,95
7	133,71	12608,72	5,46	90,56	5823,33	6,42	2,29
8	136,25	9866,44	4,01	84,48	5156,67	6,32	2,29
9	155,11	13181,02	5,73	66,03	5690,00	6,01	3,29
10	117,36	9199,82	5,20	25,23	943,00	8,39	4,47
11	113,41	8973,68	6,14	36,27	896,33	8,74	4,47
12	102,51	9103,55	4,36	39,48	1176,67	9,35	3,73
13	102,71	9523,87	7,26	51,02	5183,33	4,72	4,47
14	105,81	8658,98	8,60	64,55	5186,67	6,58	5,22
15	100,90	10203,28	5,97	38,47	1010,33	8,54	4,47
16	81,83	4694,03	7,70	34,19	1071,00	8,96	6,00
17	91,22	5871,34	8,15	58,12	5200,00	4,80	8,46
18	89,85	6569,08	6,33	74,31	6250,00	5,41	5,29

Casos	Esf. a Tracción [MPa]	Mod. Tracción [MPa]	Elong. [%]	Esf. a Flexión [MPa]	Mod. Flexión [MPa]	Deflex. [mm]	Energía Impacto [J]
19	81,18	5326,84	7,10	43,07	1245,00	8,77	4,23
20	55,96	4262,59	5,43	43,90	1330,00	9,54	6,35
21	63,49	4456,00	6,53	37,07	1320,00	8,66	5,29
22	83,58	6579,63	10,77	124,38	3743,33	7,86	4,00
23	81,65	6830,29	10,43	123,72	2160,00	7,43	4,00
24	97,93	7554,17	8,74	91,57	6136,67	7,11	4,23
25	60,87	4319,73	5,93	30,30	1227,67	7,88	5,29
26	67,26	5204,52	6,22	41,02	1182,00	8,23	5,29
27	88,72	6029,85	6,29	45,89	1535,00	8,43	5,29
28	88,92	5929,93	7,50	93,76	4633,33	7,17	5,82
29	87,01	5291,42	8,02	72,28	4536,67	5,88	4,76
30	89,28	6156,84	6,29	63,26	1830,00	9,42	4,23
31	143,58	13596,53	9,02	56,17	1270,00	8,70	5,05
32	144,60	15158,46	6,50	59,46	2725,00	6,88	4,13
33	127,18	15293,35	5,29	71,88	2695,00	6,17	3,67
34	136,93	14378,40	7,77	66,99	1456,67	7,43	4,13
35	140,10	12686,85	7,70	72,12	1420,00	8,02	3,67
36	130,06	10478,51	6,92	48,08	1195,00	9,87	3,67
37	125,32	16070,72	7,10	77,74	1910,00	7,48	4,59
38	130,93	11476,90	7,31	65,24	1676,33	9,68	3,67
39	149,17	16179,50	8,37	91,08	1845,00	7,82	3,67
40	98,57	10912,59	5,10	53,09	1036,00	9,09	3,67
41	129,03	12255,47	7,06	64,54	1285,00	9,96	4,13
42	96,20	12265,78	3,83	51,99	1263,33	9,03	6,54
43	129,32	13611,27	6,12	60,89	1966,67	6,91	5,03
44	131,65	13073,27	7,95	61,89	1710,00	6,31	5,03
45	115,10	13517,41	5,23	67,94	1796,67	7,66	5,03
46	110,68	10200,08	6,44	62,87	4516,67	10,49	3,44
47	106,11	9249,47	5,53	101,24	5803,33	7,12	4,01
48	117,02	10508,28	4,69	90,73	6780,00	7,67	3,96
49	101,19	14118,43	4,74	45,48	4033,33	10,20	5,96
50	90,58	15279,94	2,18	64,59	3580,00	11,20	4,47
51	81,80	14048,47	2,34	45,76	4943,33	12,50	3,95
52	125,07	22034,54	2,95	84,36	9260,00	6,63	2,29
53	124,16	23903,98	2,28	71,43	11133,33	7,00	2,29
54	114,62	20106,22	2,90	85,41	7906,67	6,81	3,29

<b>Casos</b>	<b>Esf. a Tracción [MPa]</b>	<b>Mod. Tracción [MPa]</b>	<b>Elong. [%]</b>	<b>Esf. a Flexión [MPa]</b>	<b>Mod. Flexión [MPa]</b>	<b>Deflex. [mm]</b>	<b>Energía Impacto [J]</b>
55	90,78	13616,58	2,30	64,87	4663,33	10,81	4,47
56	77,48	13271,57	2,05	79,02	3916,67	12,59	4,47
57	119,92	21205,21	2,10	58,48	6573,33	13,14	3,73
58	95,43	17639,11	2,14	52,52	12700,00	5,03	4,47
59	99,39	18565,13	1,90	49,43	15766,67	5,04	5,22
60	96,55	15538,48	2,47	45,34	5653,33	11,59	4,47
61	111,44	7455,12	9,54	113,52	4965,00	12,81	6,00
62	85,53	5771,91	8,15	98,99	6870,00	9,07	8,46
63	69,72	4645,56	8,22	87,06	3903,33	11,76	5,29
64	91,09	6697,61	8,00	96,68	4110,00	12,19	4,23
65	65,72	5919,24	5,91	153,70	7543,33	13,08	6,35
66	59,34	3985,74	7,05	45,15	2286,67	12,54	5,29
67	145,14	8250,66	11,43	91,87	6930,00	9,11	4,00
68	135,10	7846,61	10,73	93,57	6553,33	9,19	4,00
69	137,09	8145,67	10,49	97,63	6956,67	10,31	4,23
70	54,73	3213,85	8,17	40,26	2426,67	10,70	5,29
71	51,57	4385,52	6,61	21,23	6480,00	10,74	5,29
72	76,87	4739,11	8,33	41,36	2713,33	10,24	5,29
73	77,94	5487,56	8,02	61,11	4463,33	6,03	5,82
74	86,11	6389,39	7,73	63,90	5206,67	6,78	4,76
75	73,79	6256,33	6,97	47,04	2776,67	11,03	4,23
76	98,11	5822,70	8,39	52,09	3040,00	12,91	5,05
77	138,47	7781,53	11,86	136,02	6743,33	15,03	4,13
78	133,11	7801,07	10,28	111,30	5973,33	12,95	3,67
79	112,66	7228,41	7,89	64,08	3650,00	13,23	4,13
80	122,64	5614,92	14,58	51,15	2563,33	13,44	3,67
81	128,97	4692,32	14,87	44,94	3270,00	10,49	3,67
82	148,13	8479,43	12,20	52,68	6456,67	5,94	4,59
83	134,14	8514,06	11,37	56,89	6530,00	5,58	3,67
84	139,95	7554,70	13,10	51,14	7166,67	5,92	3,67
85	106,47	5396,11	12,50	48,23	4073,33	9,97	3,67
86	104,75	6333,69	12,99	48,30	2453,33	11,14	4,13
87	134,95	8480,33	11,80	81,45	5085,00	10,25	6,54
88	114,64	7229,64	10,43	59,35	6280,00	5,59	5,03
89	121,61	7408,67	12,47	74,44	7803,33	6,63	5,03
90	127,44	6481,42	14,35	64,29	4405,00	8,79	5,03

### 3.3. Análisis descriptivo de resultados por tipo de moldeo

Como primer análisis de datos se plantea una revisión descriptiva de resultados de las propiedades mecánicas conseguidas luego de la caracterización, donde se quiere evidenciar la diferencia entre los distintos tipos de moldeo. Esto se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Estadísticos descriptivos de resultados.

Variable Respuesta	Fibra base	Tipo de moldeo	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Desv. Est. / Media
<b>Esf. Máx. Tracción</b>	Carbono	Vacío	114,96	2,93	19,63	17,1%
		Infusión	103,39	2,63	17,62	17,0%
	Vidrio	Vacío	80,58	2,01	13,45	16,7%
		Infusión	88,08	4,67	31,34	35,6%
	Kevlar	Vacío	128,52	2,63	17,65	13,7%
		Infusión	124,40	2,78	18,68	15,0%
<b>Módulo de Tracción</b>	Carbono	Vacío	9915,02	298,61	2003,14	20,2%
		Infusión	15952,37	680,69	4566,18	28,6%
	Vidrio	Vacío	5671,75	158,34	1062,18	18,7%
		Infusión	5945,99	240,06	1610,39	27,1%
	Kevlar	Vacío	13397,00	343,48	2304,15	17,2%
		Infusión	6987,93	214,84	1441,22	20,6%
<b>Elongación</b>	Carbono	Vacío	6,03	0,30	2,03	33,7%
		Infusión	3,11	0,23	1,56	50,2%
	Vidrio	Vacío	7,43	0,30	1,98	26,6%
		Infusión	8,36	0,25	1,67	20,0%
	Kevlar	Vacío	6,75	0,26	1,71	25,3%
		Infusión	11,94	0,42	2,79	23,4%
<b>Esf. Máx. Flexión</b>	Carbono	Vacío	55,13	3,14	21,05	38,2%
		Infusión	66,77	3,23	21,67	32,5%
	Vidrio	Vacío	65,12	4,62	30,97	47,6%
		Infusión	76,87	5,31	35,61	46,3%
	Kevlar	Vacío	64,61	1,73	11,63	18,0%
		Infusión	66,42	3,96	26,54	40,0%
<b>Módulo de Flexión</b>	Carbono	Vacío	3241,76	345,92	2320,48	71,6%
		Infusión	7148,67	582,63	3907,74	54,7%
	Vidrio	Vacío	2898,38	316,85	2125,50	73,3%
		Infusión	4945,67	329,34	2209,31	44,7%
	Kevlar	Vacío	1683,38	92,32	619,29	36,8%
		Infusión	5032,89	289,68	1943,24	38,6%

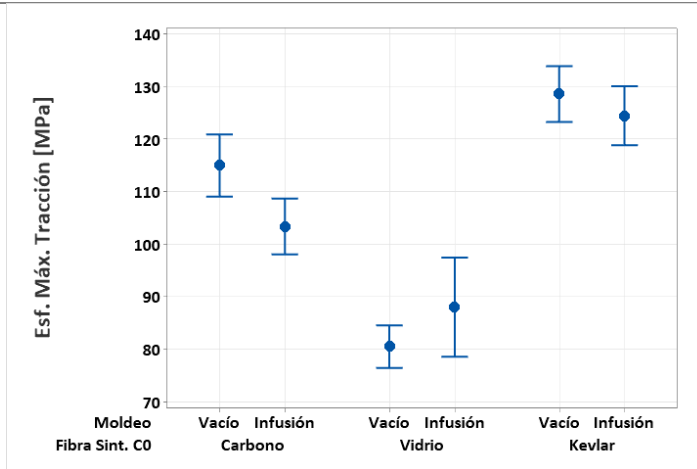
<b>Deflexión</b>	Carbono	Vacío	7,38	0,26	1,72	23,3%
		Infusión	9,19	0,45	2,99	32,5%
	Vidrio	Vacío	7,70	0,22	1,51	19,6%
		Infusión	10,37	0,32	2,17	20,9%
	Kevlar	Vacío	8,07	0,20	1,37	17,0%
		Infusión	9,86	0,49	3,31	33,6%
<b>Energía de Impacto</b>	Carbono	Vacío	4,03	0,14	0,95	23,6%
		Infusión	4,03	0,14	0,95	23,6%
	Vidrio	Vacío	5,23	0,17	1,13	21,6%
		Infusión	5,23	0,17	1,13	21,6%
	Kevlar	Vacío	4,38	0,12	0,81	18,5%
		Infusión	4,38	0,12	0,81	18,5%

Con la información presentada en la Tabla 3.7, se puede establecer el nivel de relación coherente entre los resultados obtenidos, por ejemplo, en resultados de caracterización a tracción del material, se tiene alrededor del 67% de los resultados con un porcentaje por debajo del 25% de correspondencia, lo que indica que se garantiza la reproducibilidad de los datos. El 33% que es más significativo en diferencias entre resultados atribuye a que las condiciones de moldeo, principalmente al vacío dependen mucho del proceso de humectación de muestras, corte de probetas, ajuste de temperatura del horno, entre otras. De este análisis también se generan gráficas para poder visualizar las particularidades entre los distintos tipos de moldeo y los diversos tipos de fibras empleados, es así como se tienen las gráficas de intervalos para cada una de las propiedades mecánicas estudiadas.

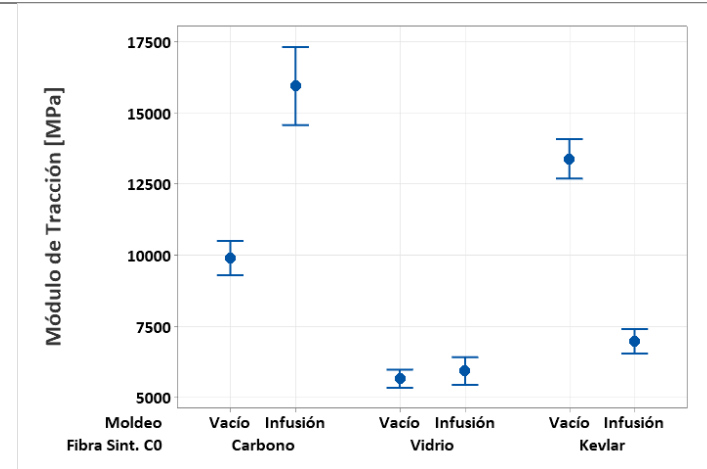
Tabla 3.8. Intervalos de propiedades mecánicas, por tipo de moldeo y fibra.

**Propiedades a tracción**

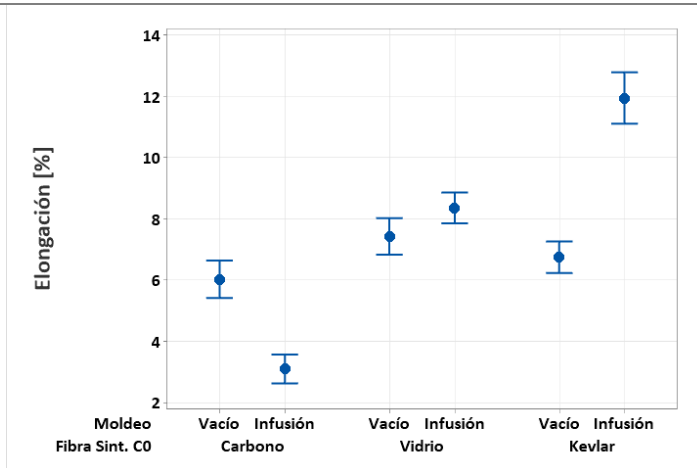
**Esfuerzo máximo**



**Módulo de elasticidad**



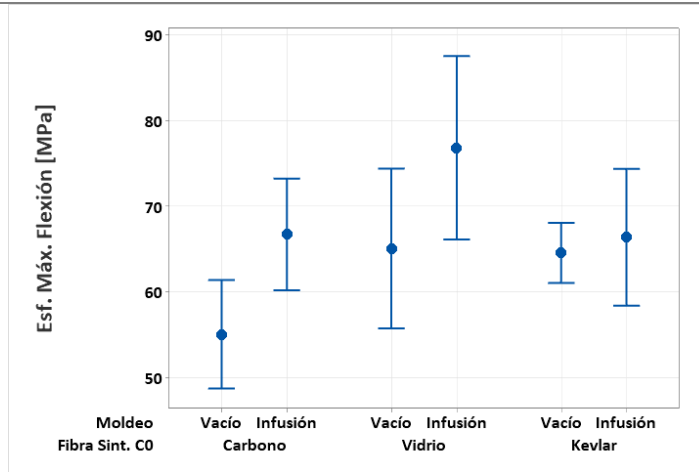
**Elongación**



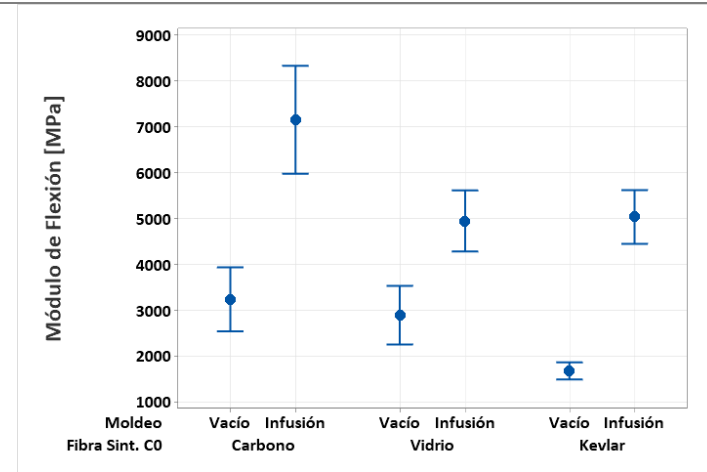
En las gráficas de intervalos de las propiedades a tracción, se muestran en su mayoría intervalos con dimensiones similares, lo que señala una homogeneidad en los resultados de los distintos tipos de moldeo.

## Propiedades a flexión

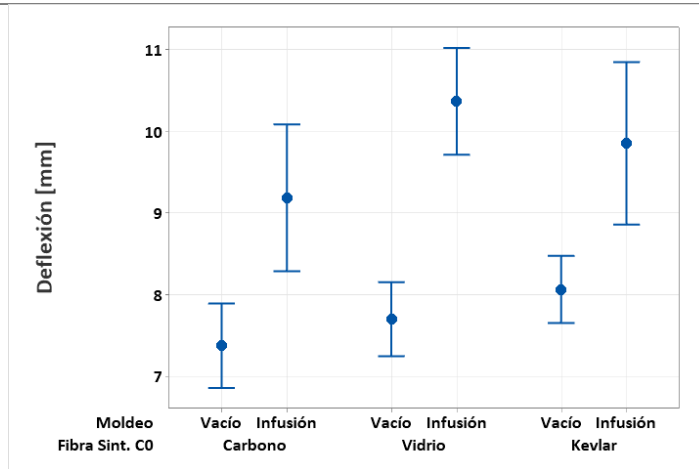
### Esfuerzo máximo



### Módulo de elasticidad



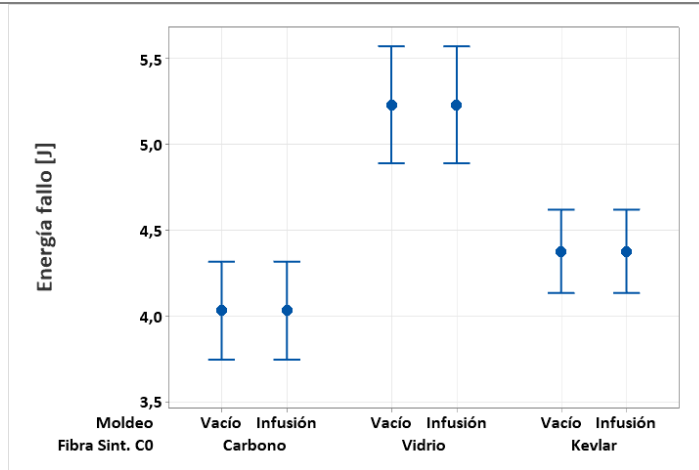
### Deflexión



En las gráficas de intervalos de las propiedades a flexión, se muestran en su totalidad intervalos con dimensiones similares, lo que señala una homogeneidad en los resultados de los distintos tipos de moldeo.

## Propiedades a impacto

### Energía media de fallo



En la gráfica de intervalo de energía media de fallo en el ensayo a impacto, se muestran intervalos muy similares, lo que señala una homogeneidad en los resultados de los distintos tipos de moldeo.



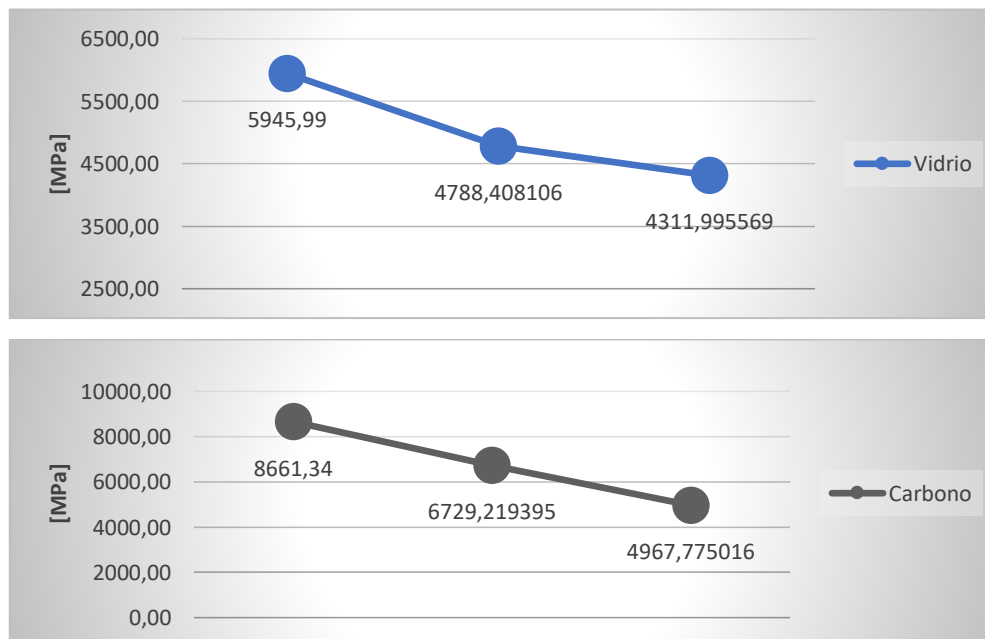
### 3.4. Análisis de resultados de la caracterización DMA

Dentro del análisis dinámico mecánico, se dispone de las gráficas de los casos considerados comparables y más relevantes. Los casos importantes de análisis los planteamos en la Tabla 3.9, que permiten realizar una comparación rápida entre los resultados de la caracterización mecánica y el DMA, entre ellos se tiene:

Tabla 3.9. Comparación entre caracterización mecánica y el DMA.

	Trac. – Mód. De tracción (2CCh)	DMA – Mód. Complejo (1CCh)	DMA - Mód. complejo (2CCh)
<b>Vidrio</b>	5945,99	4788,41	4312,00
<b>Carbono</b>	8661,34	6729,22	4967,78
<b>Kevlar</b>	6987,93	7857,31	4373,21

Así, se tiene una representación gráfica de los resultados antes mencionados, en la que se presentan por cada una de las fibras, en las distintas caracterizaciones. Se hace evidente la similitud entre los valores de la caracterización mecánica y la del DMA de una y doble capa de fibra de chambira. Considerando a la vez que una variable importante en el ensayo DMA es el espesor del material.



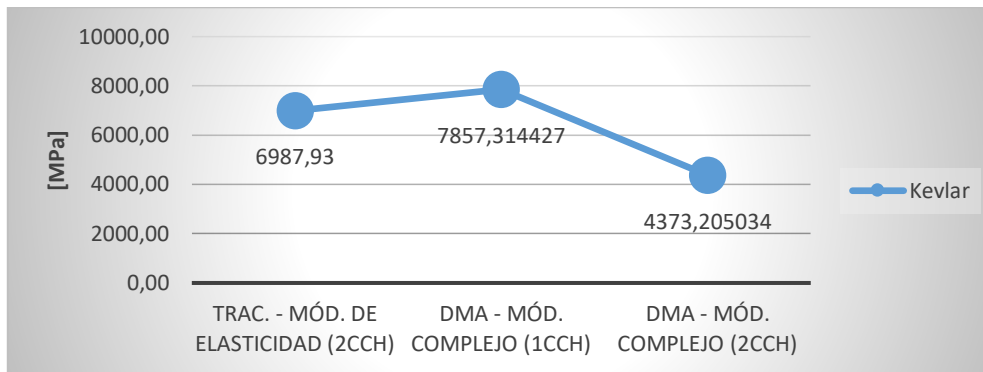


Figura 3.1. Gráficas comparativas de la caracterización mecánica y DMA.

Expandiendo la información del DMA para los casos antes revisados se tienen las gráficas en las que se plasma el módulo elástico, el módulo viscoso y la tan (delta).

En las Figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7, se plasman las curvas establecidas de manera estratégica para hacer una comparación propia del DMA, en el que se presentan los valores del módulo elástico a temperatura ambiente, el máximo módulo viscoso y se ponen en evidencia un pico en la línea de tan(delta), asociada a temperatura de transición vítrea.

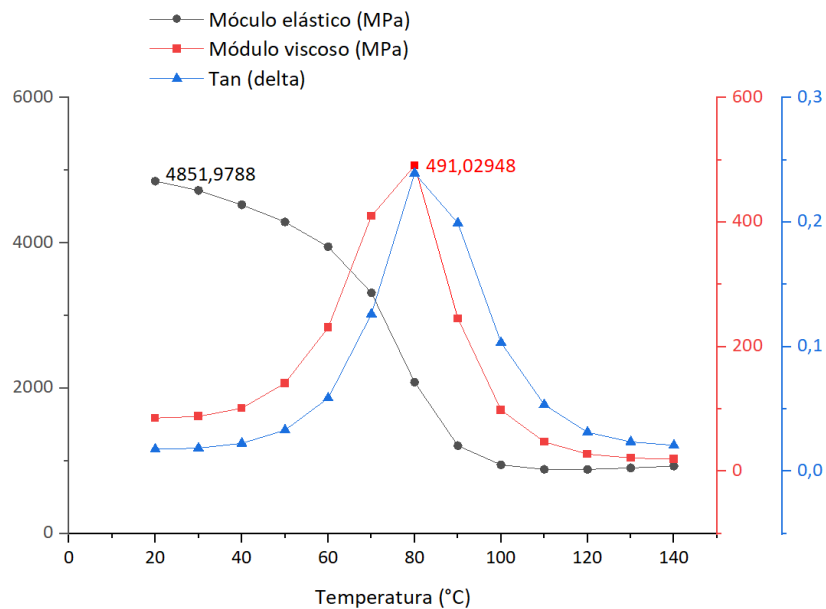


Figura 3.2. Gráfica de la Tan(delta), los módulos elástico y viscoso para el caso S2.

En la figura anterior se estima una  $T_g$  que ronda los 80°C, un módulo elástico máximo de 4851,98 MPa y un módulo viscoso máximo de 491,03 MPa, para el caso S2.

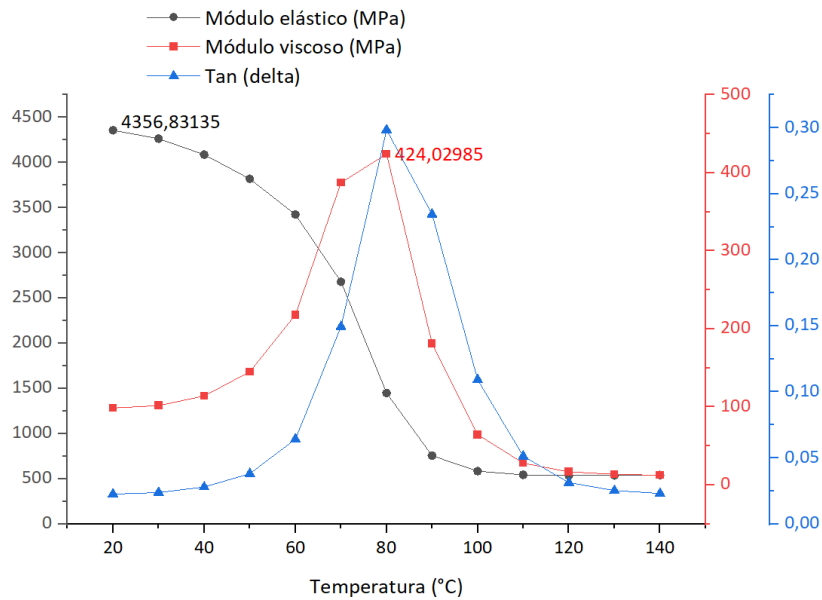


Figura 3.3. Gráfica de la tan(delta), los módulos elástico y viscoso para el caso S3.

En la figura anterior se estima una  $T_g$  que ronda los 80°C, un módulo elástico máximo de 4356,83 MPa y un módulo viscoso máximo de 424,03 MPa, para el caso S3.

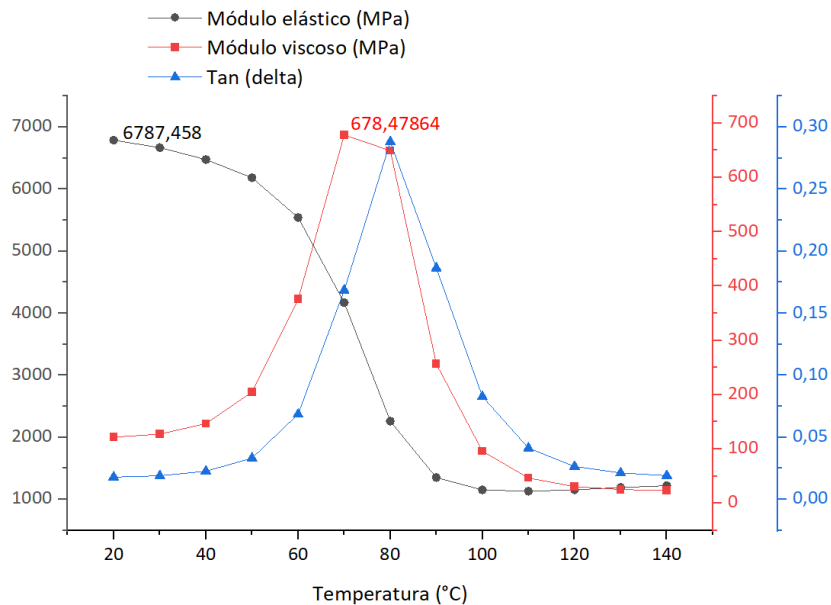


Figura 3.4. Gráfica de la tan(delta), los módulos elástico y viscoso para el caso S11.

En la figura anterior se estima una  $T_g$  que ronda los 80°C, un módulo elástico máximo de 6787,46 MPa y un módulo viscoso máximo de 678,48 MPa, para el caso S11.

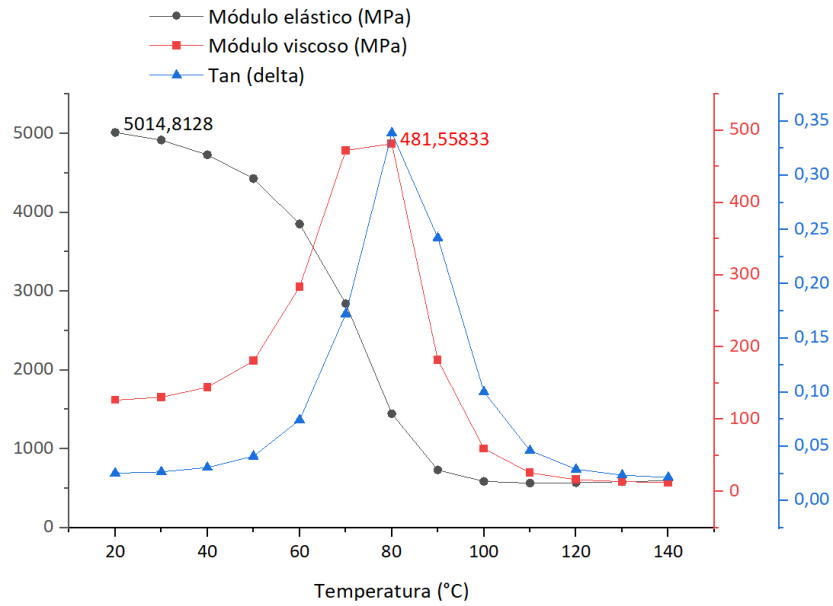


Figura 3.5. Gráfica de la tan(delta), los módulos elástico y viscoso para el caso S13.

En la figura anterior se estima una  $T_g$  que ronda los 80°C, un módulo elástico máximo de 5014,81 MPa y un módulo viscoso máximo de 481,56 MPa, para el caso S13.

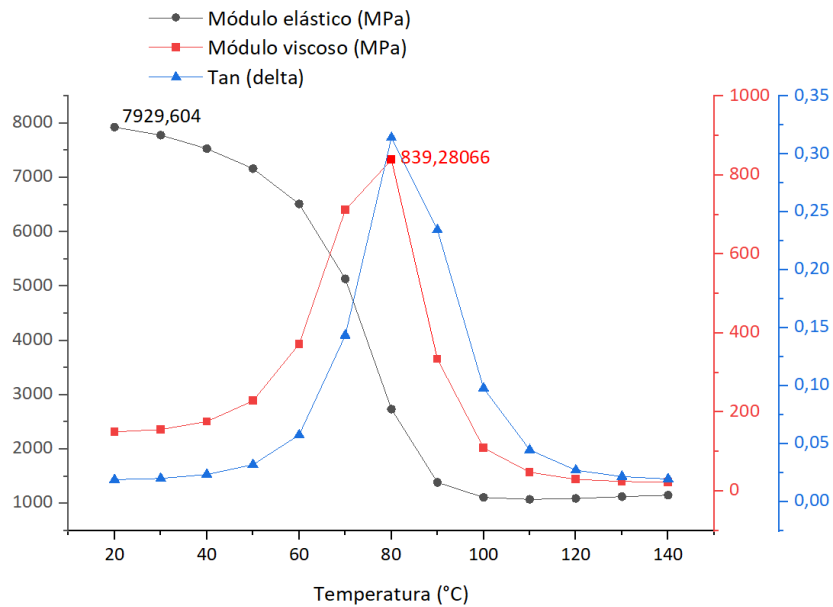


Figura 3.6. Gráfica de la tan(delta), los módulos elástico y viscoso para el caso S12.

En la figura 3.6 se estima una  $T_g$  que ronda los 80°C, un módulo elástico máximo de 7929,60 MPa y un módulo viscoso máximo de 839,28 MPa, para el caso S12.

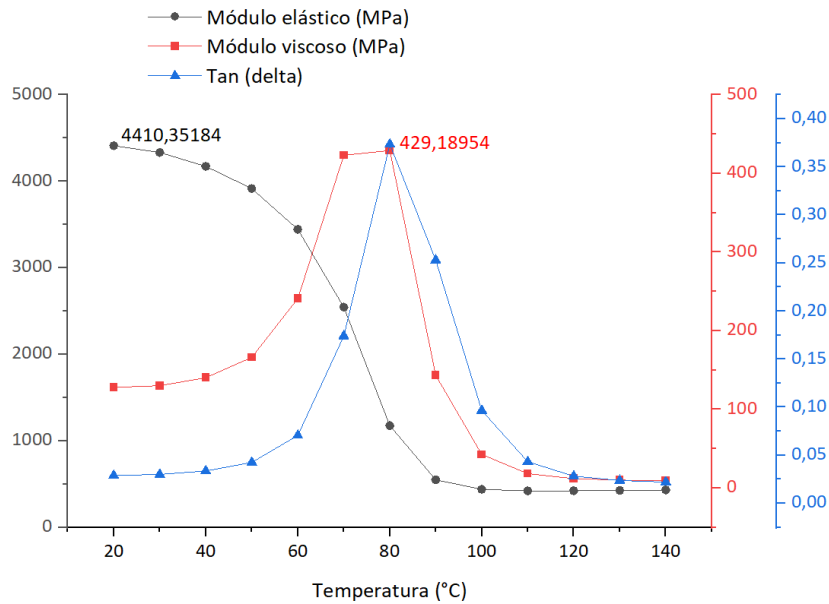


Figura 3.7. Gráfica de la tan(delta), los módulos elástico y viscoso para el caso S14.

En la figura 3.7 se estima una temperatura de transición vítrea que ronda los 80°C, un módulo elástico máx de 4410,35 MPa y un módulo viscoso máx de 429,19 MPa, para caso 14.

### 3.5. Análisis estadístico del esfuerzo máximo a la tracción

#### 3.5.1. Verificación de supuestos del esfuerzo máximo a la tracción

Se revisan los supuestos paramétricos en los datos obtenidos con los ensayos mecánicos. Este proceso garantiza la aplicabilidad del análisis de la varianza, al ser esta una técnica estadística paramétrica.

Tabla 3.10. Verificación de supuestos en datos del esfuerzo máximo a la tracción.

Normalidad de datos		Independencia	
Igualdad de varianza entre tratamientos			
Método	Estadístico	Valor-p	
Prueba de Levene	0,82	0,839	

En la tabla antes presentada, se revisan la gráfica de probabilidad normal, la gráfica de los datos versus el orden de observación y la prueba de Levene, con lo que se consigue verificar los supuestos de normalidad, independencia de datos e igualdad de varianza, respectivamente. Al cumplirse los supuestos, se tiene certeza de al aplicar el análisis de varianza ANOVA, obtener resultados confiables.

### 3.5.2. Análisis de la varianza del esfuerzo máximo a la tracción

Tras la verificación de supuestos, se desarrolla el ANOVA, con un modelo que incluye términos de segundo grado, el modelo tiene un coeficiente de determinación de 72,67 %. Se consideraron como términos principales de análisis la orientación de la primera y segunda capa de fibra de chambira, la temperatura, el tipo de fibra sintética y el tipo de moldeo. De ahí se derivan los términos de mayor grado y las interacciones que se consideran estadísticamente relevantes para el modelo a definir.

Tabla 3.11. Análisis de la varianza del esfuerzo a tracción.

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	20	142604	7130,2	33,10	0,000
Orient. FCh. C1	1	12	12,0	0,06	0,813
Orient. FCh. C2	1	612	611,7	2,84	0,093
Temp. [°C]	1	1815	1814,5	8,42	0,004
Moldeo	1	1746	1745,6	8,10	0,005
Fibra Sint. C0	2	7014	3506,8	16,28	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1	1	19814	19814,4	91,99	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2	1	22597	22596,5	104,91	0,000
Temp. [°C]*Temp. [°C]	1	860	860,1	3,99	0,047
Orient. FCh. C2*Moldeo	1	995	994,7	4,62	0,033
Moldeo*Fibra Sint. C0	2	4154	2077,0	9,64	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Moldeo	1	3003	3002,8	13,94	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Fibra Sint. C0	2	6526	3263,1	15,15	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2*Moldeo	1	1495	1494,8	6,94	0,009
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2*Fibra Sint. C0	2	1891	945,3	4,39	0,013
Temp. [°C]*Moldeo*Fibra Sint. C0	2	2090	1045,0	4,85	0,009
Error	249	53631	215,4		
Falta de ajuste	57	25140	441,0	2,97	0,000
Error puro	192	28491	148,4		
Total	269	196235			

Con la adecuada verificación de términos relevantes, se tiene ya el modelo generado para ser considerado para la predicción del punto óptimo. Este modelo cuenta con los términos descritos en la Tabla 3.11, los cuales son estadísticamente significativos con un grado de 5%.

$$Y_{ijkmn} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \zeta_m + (\alpha^2)_i + (\beta^2)_j + (\gamma^2)_k + (\beta\delta)_{jl} + (\delta\zeta)_{lm} + (\alpha^2\delta)_{il} + (\alpha^2\zeta)_{im} + (\beta^2\delta)_{jl} + (\beta^2\zeta)_{jm} + (\gamma\delta\zeta)_{klm} + \varepsilon_{ijklmn}$$

### 3.5.3. Análisis de gráficos (Pareto y efectos)

Esquematizando la información de la tabla anterior, se tienen el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacción.

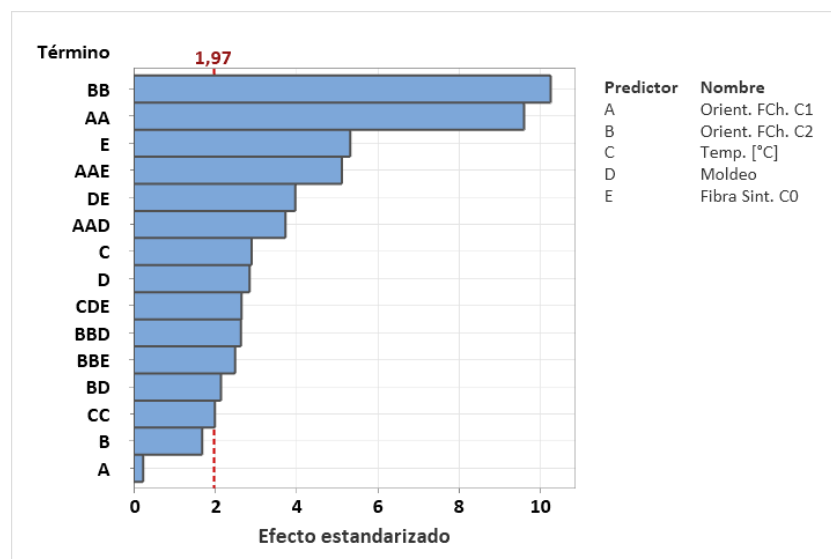


Figura 3.8. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del esfuerzo a tracción.

Los términos que más contribuyen son los efectos cuadráticos de la primera y la segunda capa de la orientación de la fibra de chambira, seguida del efecto del tipo de fibra sintética.

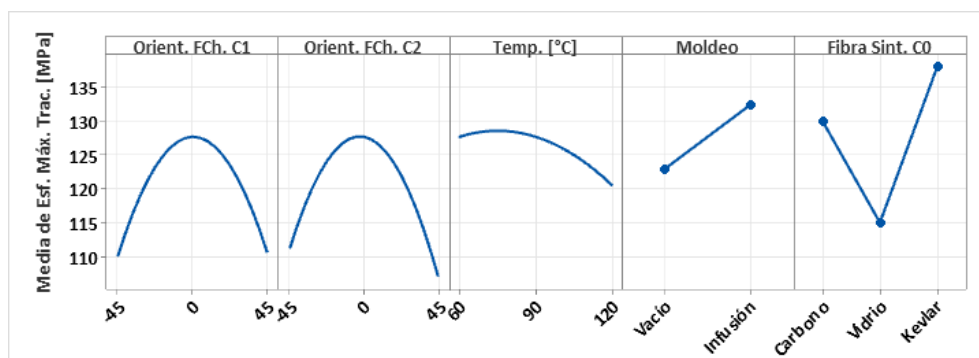


Figura 3.9. Gráfica de efectos principales para el esfuerzo a tracción.

Dentro del gráfico de efectos principales, reforzando la información de la tabla del análisis de la varianza, se tiene una contribución sustancial del tipo de fibra sintética, debido a la pronunciada pendiente que presenta la gráfica de esta variable, además se tienen la marcada curvatura en los factores: Orientación de la fibra de chambira capa 1 y capa 2.

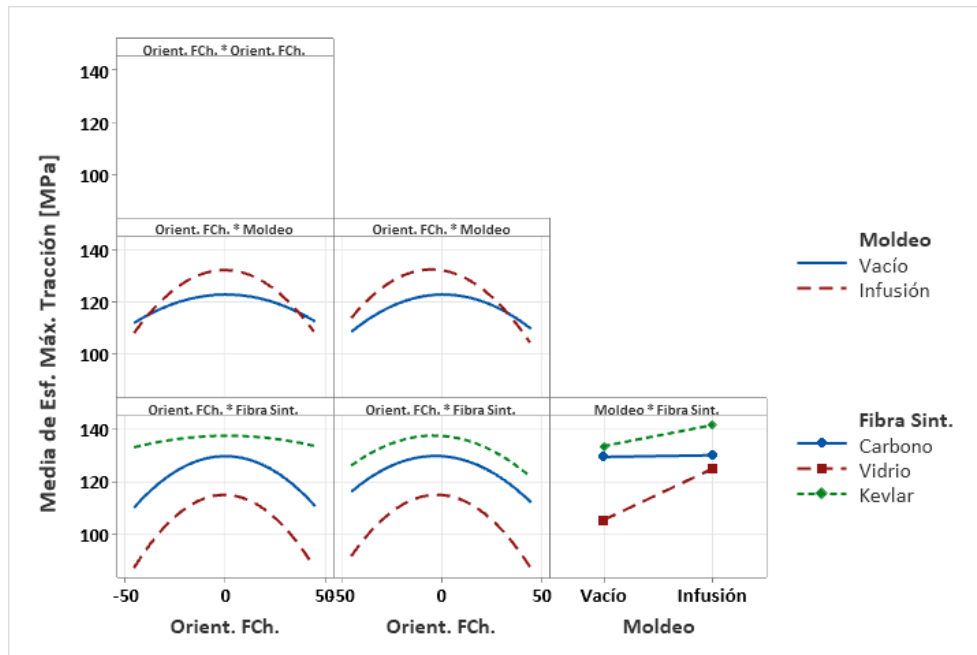


Figura 3.10. Gráfica de efectos principales para el esfuerzo a tracción.

De manera esquemática, la interacción se presenta como la diferencia de las pendientes, entre cada gráfica particular, que envuelve la interacción de segundo grado. En esta gráfica se tiene la interacción significativa del tipo de fibra sintética con el tipo de moldeo. En este caso se revisa como la relación de una variable sobre la otra, al cambiar los niveles de dichas variables.

### 3.5.4. Optimización individual del esfuerzo máximo a la tracción

Empleado la función de deseabilidad, se obtiene el punto óptimo para el esfuerzo a la tracción, mediante la combinación de los cinco factores estudiados. Los parámetros de entrada al igual que la respuesta de salida se muestran en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Optimización individual para el esfuerzo a tracción.

Parámetros de entrada		Respuesta de salida		
Factores	Valor	Ensayo	Propiedad	Ajuste
Tipo de moldeo	Infusión	Tracción	Esfuerzo máximo	142,31 MPa
Tipo de fibra sintética	Kevlar			



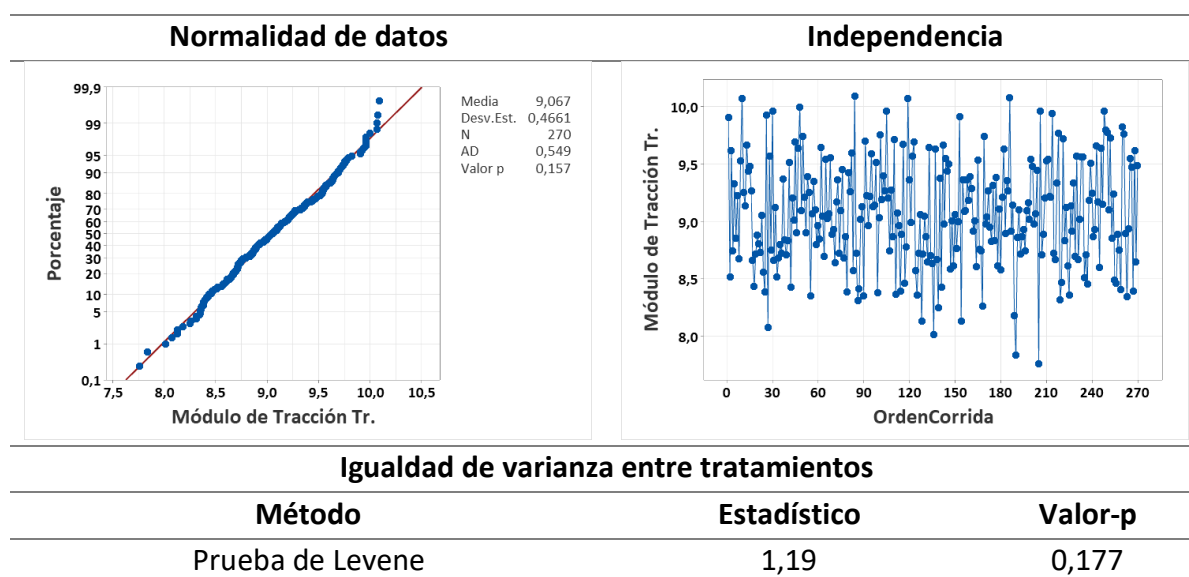
<b>Orient. f. chambira capa 1</b>	- 0,455 °
<b>Orient. f. chambira capa 2</b>	- 5,909 °
<b>Temperatura</b>	94,297 °C

### 3.6. Análisis estadístico del módulo de tracción

#### 3.6.1. Verificación de supuestos del módulo de tracción

Se revisan los supuestos paramétricos en los datos obtenidos con los ensayos mecánicos, este proceso garantiza la aplicabilidad del análisis de la varianza, al ser esta una técnica estadística paramétrica. Para cumplir con los supuestos se empleó un coeficiente de transformación de 0,00 para la transformación de Box-Cox.

Tabla 3.13. Verificación de supuestos en datos del módulo de elasticidad a tracción



En la tabla antes presentada, se revisan la gráfica de probabilidad normal, la gráfica de los datos versus el orden de observación y la prueba de Levene, con lo que se consigue verificar los supuestos de normalidad, independencia de datos e igualdad de varianza, respectivamente. Al cumplirse los supuestos, se tiene certeza de al aplicar el análisis de varianza ANOVA, obtener resultados confiables.

#### 3.6.2. Análisis de la varianza del módulo de tracción

Tras la verificación de supuestos, se desarrolla el ANOVA, con un modelo que incluye términos de segundo grado, el modelo tiene un coeficiente de determinación de 87,64 %. Se consideraron como términos principales de análisis la Orientación de la capa 1, la Orientación

de la capa 2, la Temperatura, el Tipo de fibra y el Tipo de moldeo. De ahí se derivan los términos de mayor grado y las interacciones que se consideran estadísticamente relevantes para el modelo a definir.

Tabla 3.14. Análisis de la varianza del módulo de elasticidad a tracción.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	25	51,217	2,0487	69,19	0,000
Orient. FCh. C1	1	0,012	0,0116	0,39	0,533
Orient. FCh. C2	1	0,029	0,0294	0,99	0,320
Temp. [°C]	1	0,076	0,0762	2,57	0,110
Moldeo	1	0,000	0,0004	0,01	0,905
Fibra Sint. C0	2	8,975	4,4876	151,56	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1	1	3,037	3,0369	102,57	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2	1	2,668	2,6680	90,11	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C2	1	0,356	0,3558	12,02	0,001
Temp. [°C]*Moldeo	1	0,472	0,4721	15,95	0,000
Temp. [°C]*Fibra Sint. C0	2	0,352	0,1764	5,96	0,003
Moldeo*Fibra Sint. C0	2	14,439	7,2194	243,82	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Moldeo	1	0,227	0,2265	7,65	0,006
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Fibra Sint. C0	2	0,249	0,1247	4,21	0,016
Orient. FCh. C2*Temp. [°C]*Fibra Sint. C0	2	0,193	0,0963	3,25	0,040
Temp. [°C]*Temp. [°C]*Fibra Sint. C0	2	0,617	0,3084	10,41	0,000
Temp. [°C]*Moldeo*Fibra Sint. C0	2	0,911	0,4553	15,38	0,000
Orient. FCh. C2*Temp. [°C]*Mold*Fib Sint. C0	2	0,276	0,1377	4,65	0,010
Error	244	7,225	0,0296		
Falta de ajuste	52	2,175	0,0418	1,59	0,013
Error puro	192	5,050	0,0263		
Total	269	58,442			

Con la adecuada verificación de términos relevantes, se tiene el modelo generado para ser considerado para la predicción del punto óptimo. Este modelo cuenta con los términos descritos en la Tabla 3.14, los cuales son estadísticamente significativos con un grado de 5%.

$$\begin{aligned}
 Y_{ijkmn} = & \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \zeta_m + (\alpha^2)_i + (\beta^2)_j + (\alpha\beta)_{ij} + (\gamma\delta)_{kl} + (\gamma\zeta)_{km} \\
 & + (\delta\zeta)_{lm} + (\alpha^2\delta)_{il} + (\alpha^2\zeta)_{im} + (\beta\gamma\zeta)_{jkm} + (\gamma^2\zeta)_{km} + (\gamma\delta\zeta)_{klm} \\
 & + (\beta\gamma\delta\zeta)_{jklm} + \varepsilon_{ijklmn}
 \end{aligned}$$

### 3.6.3. Análisis de gráficos (Pareto y efectos)

Esquematizando la información de la tabla anterior, se tienen el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacción.

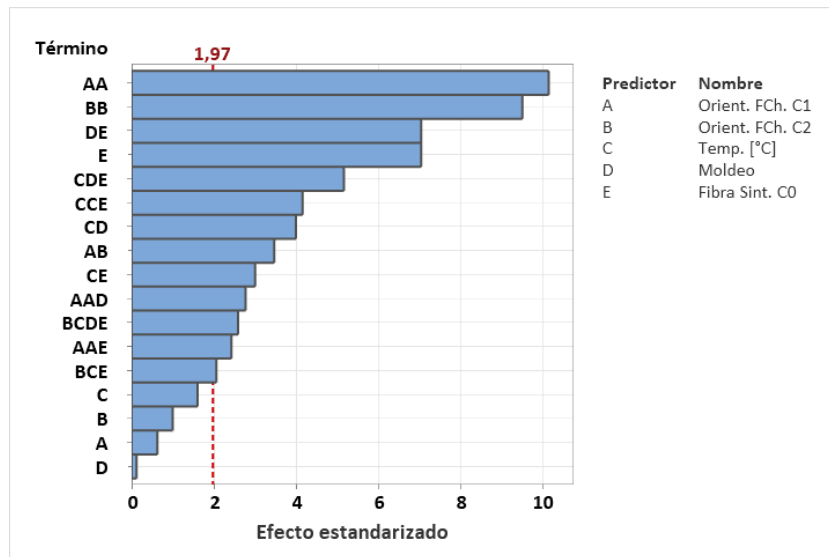


Figura 3.11. Diagrama de Pareto: efectos estandarizados del módulo de tracción.

Los términos que más contribuyen son los efectos cuadráticos de la primera y la segunda capa de la orientación de la fibra de chambira, seguida del efecto del tipo de fibra sintética.

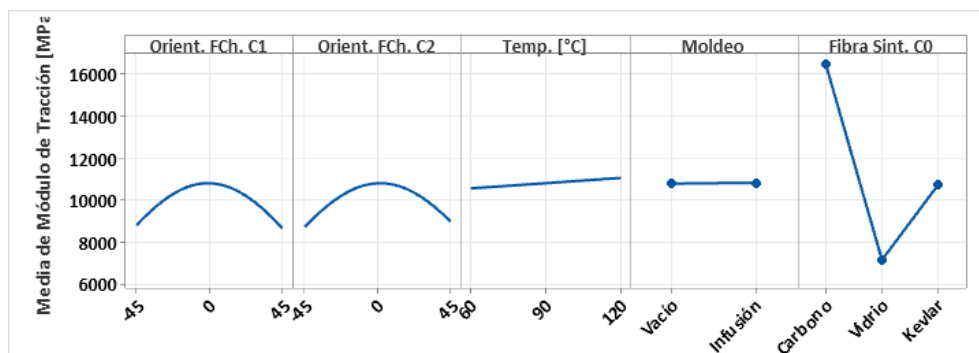


Figura 3.12. Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad a tracción.

Dentro del gráfico de efectos principales, reforzando la información de la tabla del análisis de la varianza, se tiene una contribución sustancial del tipo de fibra sintética, debido a la pronunciada pendiente que presenta la gráfica de esta variable.

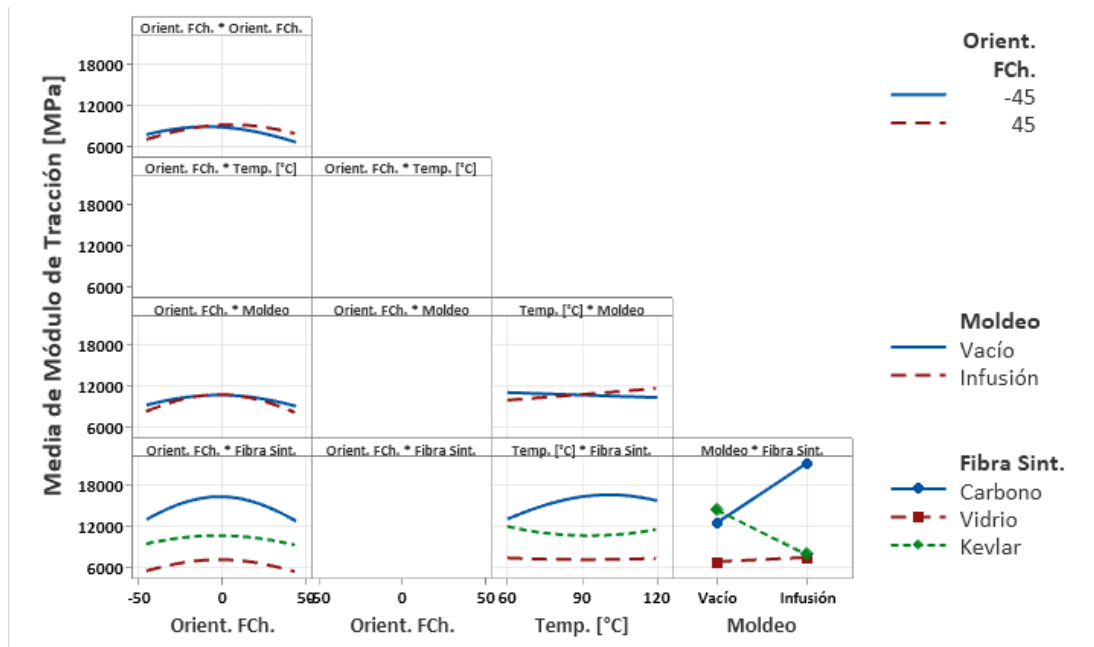


Figura 3.13. Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad a tracción.

De manera esquemática, la interacción se presenta como la diferencia de las pendientes, entre cada gráfica particular, que involucra la interacción de segundo grado. En esta gráfica se tiene la interacción significativa del tipo de fibra sintética con el tipo de moldeo, así como entre la temperatura y el tipo de fibra sintética. En este caso se revisa como la relación de una variable sobre la otra, al cambiar los niveles de dichas variables.

### 3.6.4. Optimización individual del módulo de tracción

Empleado la función de deseabilidad, se obtiene el punto óptimo para el módulo de elasticidad a la tracción, mediante la combinación de los cinco factores estudiados. Los parámetros de entrada al igual que la respuesta de salida se muestran en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Optimización individual para el módulo de elasticidad a tracción.

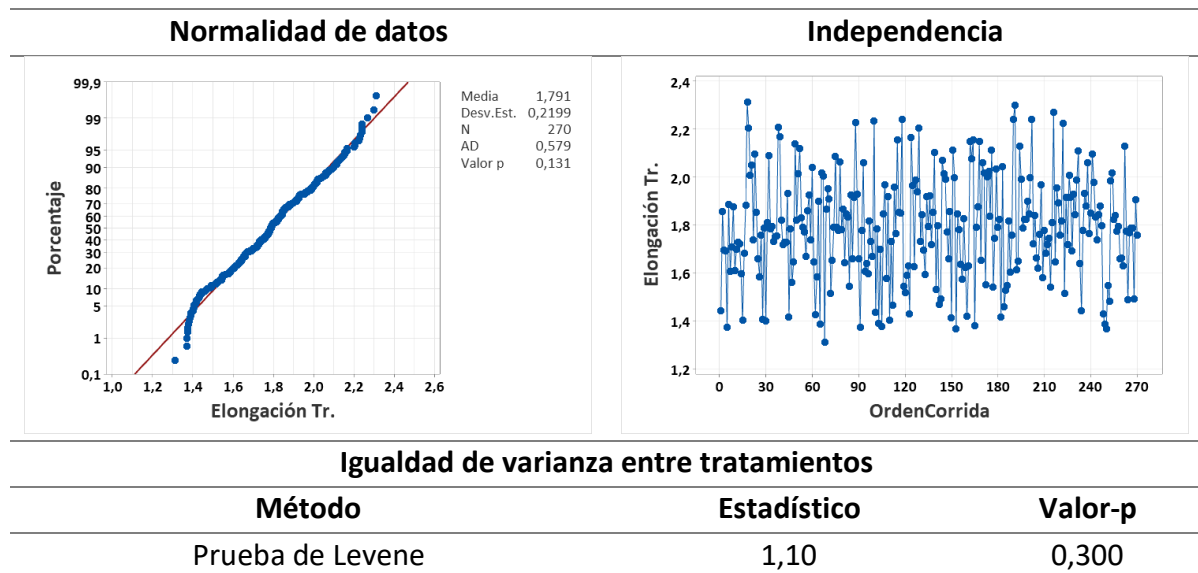
Parámetros de entrada		Respuesta de salida		
Factores	Valor	Ensayo	Propiedad	Ajuste
Tipo de moldeo	Infusión	Tracción	Módulo de elasticidad	24419,76 MPa
Tipo de fibra sintética	Carbono			
Orient. f. chambira capa 1	- 2,273 °			
Orient. f. chambira capa 2	- 9,545 °			
Temperatura	120 °C			

### 3.7. Análisis estadístico del porcentaje de elongación (%)

#### 3.7.1. Verificación de supuestos del porcentaje de elongación

Se revisan los supuestos paramétricos en los datos obtenidos con los ensayos mecánicos, este proceso garantiza la aplicabilidad del análisis de la varianza, al ser esta una técnica estadística paramétrica. Para cumplir con los supuestos se empleó un coeficiente de transformación de 0,3 para la transformación de Box-Cox.

Tabla 3.16. Verificación de supuestos en datos de la elongación.



En la tabla antes presentada, se revisan la gráfica de probabilidad normal, la gráfica de los datos versus el orden de observación y la prueba de Levene, con lo que se consigue verificar los supuestos de normalidad, independencia de datos e igualdad de varianza, respectivamente. Al cumplirse los supuestos, se tiene certeza de al aplicar el análisis de varianza ANOVA, obtener resultados confiables.

#### 3.7.2. Análisis de la varianza del porcentaje de elongación

Tras la verificación de supuestos, se desarrolla el ANOVA, con un modelo que incluye términos de segundo grado, el modelo tiene un coeficiente de determinación de 83,65 %. Se consideraron como términos principales de análisis la orientación de la primera y segunda capa de fibra de chambira, la temperatura, el tipo de fibra sintética y el tipo de moldeo. De ahí se derivan los términos de mayor grado y las interacciones que se consideran estadísticamente relevantes para el modelo a definir.

Tabla 3.17. Análisis de la varianza de la elongación.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	22	15,131	0,6878	57,43	0,000
Orient. FCh. C1	1	0,018	0,0184	1,53	0,217
Orient. FCh. C2	1	0,002	0,0016	0,13	0,715
Temp. [°C]	1	0,312	0,3115	26,01	0,000
Moldeo	1	0,056	0,0558	4,66	0,032
Fibra Sint. C0	2	3,157	1,5785	131,81	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1	1	0,106	0,1062	8,87	0,003
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2	1	0,212	0,2124	17,74	0,000
Orient. FCh. C2*Temp. [°C]	1	0,080	0,0795	6,64	0,011
Temp. [°C]*Fibra Sint. C0	2	0,336	0,1693	14,13	0,000
Moldeo*Fibra Sint. C0	2	4,802	2,4009	200,48	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Temp. [°C]	1	0,116	0,1160	9,68	0,002
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Fibra Sint. C0	2	0,240	0,1198	10,00	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2*Fibra Sint. C0	2	0,243	0,1216	10,15	0,000
Temp. [°C]*Temp. [°C]*Fibra Sint. C0	2	0,590	0,2946	24,60	0,000
Temp. [°C]*Moldeo*Fibra Sint. C0	2	0,579	0,2897	24,19	0,000
Error	247	2,958	0,0120		
Falta de ajuste	55	1,111	0,0202	2,10	0,000
Error puro	192	1,847	0,0096		
Total	269	18,089			

Con la adecuada verificación de términos relevantes, se tiene ya el modelo generado para ser considerado para la predicción del punto óptimo. Este modelo cuenta con los términos descritos en la Tabla 3.17, los cuales son estadísticamente significativos con un grado de 5%.

$$Y_{ijkmn} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \zeta_m + (\alpha^2)_i + (\beta^2)_j + (\beta\gamma)_{jk} + (\gamma\zeta)_{km} + (\delta\zeta)_{lm} \\ + (\alpha^2\gamma)_{ik} + (\alpha^2\zeta)_{im} + (\beta^2\zeta)_{jm} + (\gamma^2\zeta)_{km} + (\gamma\delta\zeta)_{klm} + \varepsilon_{ijklmn}$$

### 3.7.3. Análisis de gráficos (Pareto y efectos)

Esquemmatizando la información de la tabla anterior, se tienen el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacción.

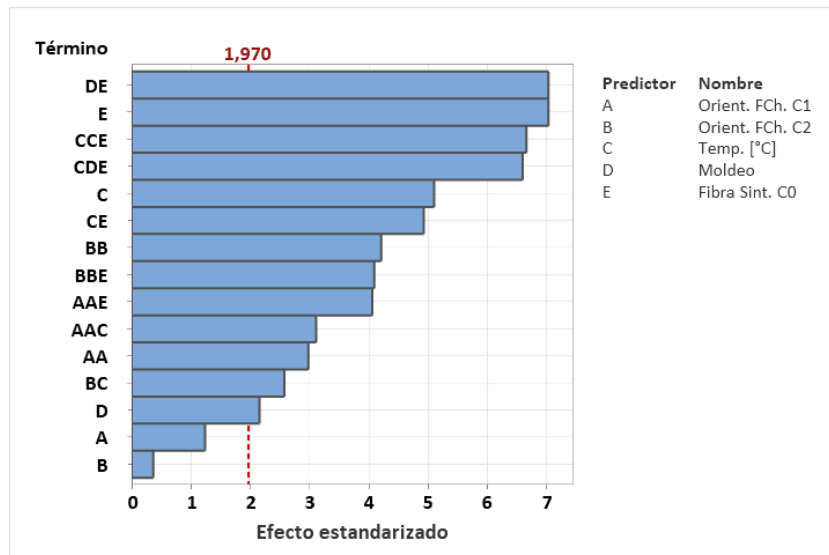


Figura 3.14. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de la elongación.

El término que más contribuye es la interacción entre el término cuadrático de la orientación de la primera capa de fibra de chambira y el tipo de fibra sintética. Además, es importante la interacción entre el tipo de moldeo y el tipo de fibra sintética.

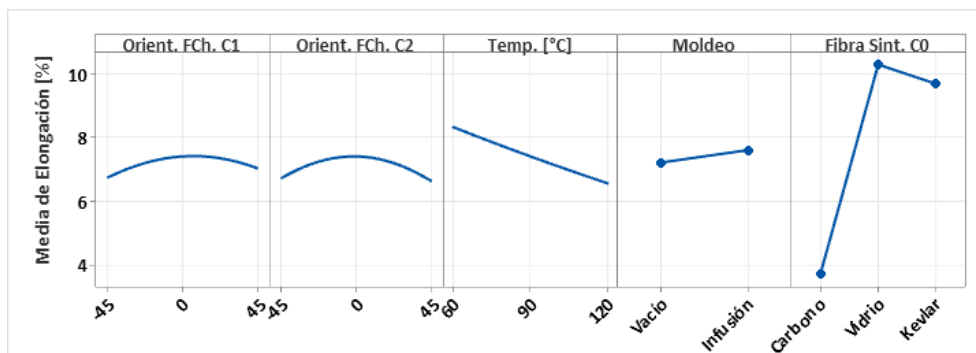


Figura 3.15. Gráfica de efectos principales para la elongación

Dentro del gráfico de efectos principales, reforzando la información de la tabla del análisis de la varianza, se tiene una contribución sustancial del tipo de fibra sintética, debido a la pronunciada pendiente que presenta la gráfica de esta variable, seguida de este, se tienen la contribución del efecto de la temperatura.

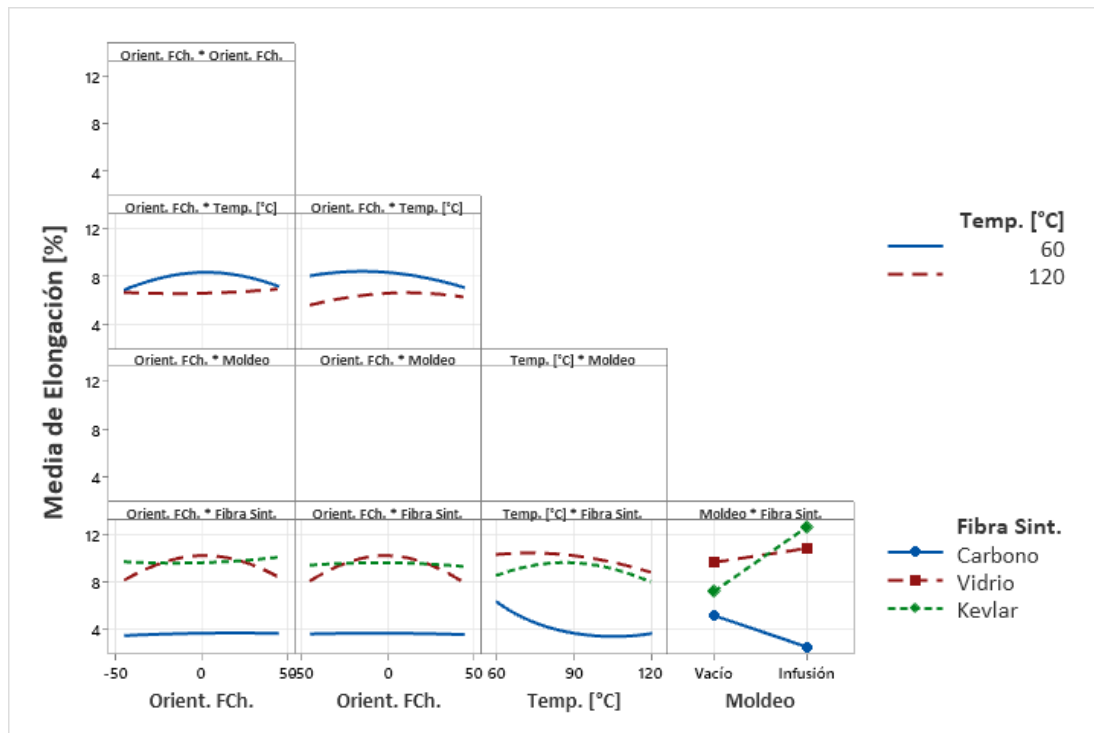


Figura 3.16. Gráfica de efectos principales para la elongación.

De manera esquemática, la interacción se presenta como la diferencia de las pendientes, entre cada gráfica particular, que envuelve la interacción de segundo grado. En esta gráfica se tiene la interacción significativa del tipo de fibra sintética con el tipo de moldeo; además del tipo de fibra sintética con la temperatura. En este caso se revisa como la relación de una variable sobre la otra, al cambiar los niveles de dichas variables.

### 3.7.4. Optimización individual del porcentaje de elongación

Empleado la función de deseabilidad, se obtiene el punto óptimo para el módulo de elasticidad a la tracción, mediante la combinación de los cinco factores estudiados. Los parámetros de entrada al igual que la respuesta de salida se muestran en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Optimización individual para la elongación.

Parámetros de entrada		Respuesta de salida		
Factores	Valor	Ensayo	Propiedad	Ajuste
Tipo de moldeo	Infusión			
Tipo de fibra sintética	Carbono			
Orient. f. chambira capa 1	- 5,909 °	Tracción	Elongación	1,839 %
Orient. f. chambira capa 2	- 45 °			
Temperatura	118,182 °C			

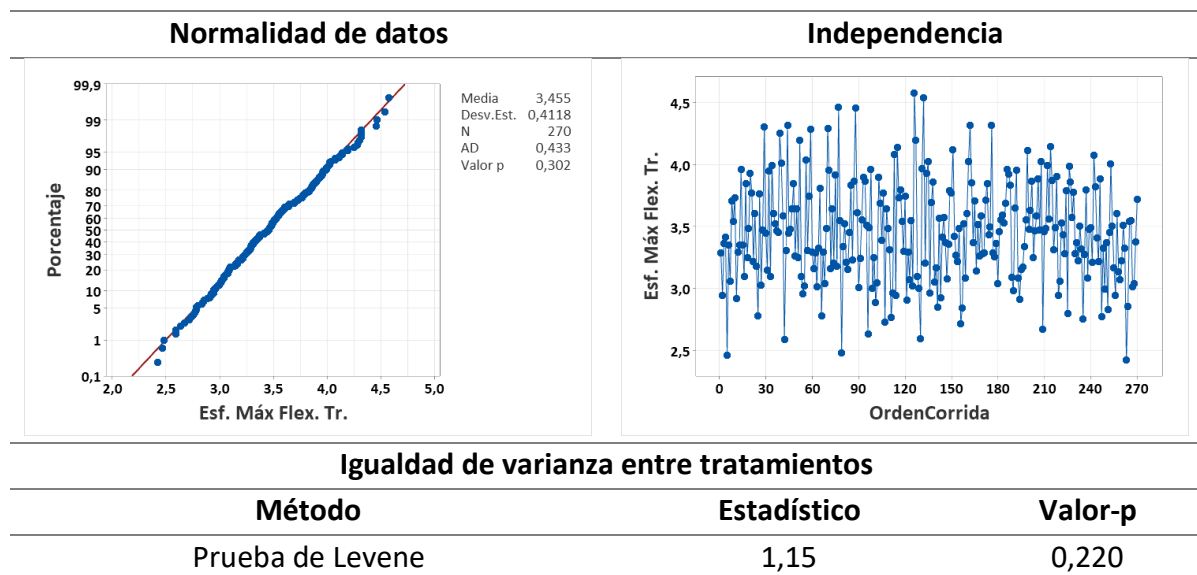


### 3.8. Análisis estadístico del esfuerzo a flexión

#### 3.8.1. Verificación de supuestos del esfuerzo a flexión

Se revisan los supuestos paramétricos en los datos obtenidos con los ensayos mecánicos. Este proceso garantiza la aplicabilidad del análisis de la varianza, al ser esta una técnica estadística paramétrica. Para cumplir con los supuestos se empleó un coeficiente de transformación de 0,3 para la transformación de Box-Cox.

Tabla 3.19. Verificación de supuestos en datos del esfuerzo máximo a la flexión.



En la tabla antes presentada, se revisan la gráfica de probabilidad normal, la gráfica de los datos versus el orden de observación y la prueba de Levene, con lo que se consigue verificar los supuestos de normalidad, independencia de datos e igualdad de varianza, respectivamente. Al cumplirse los supuestos, se tiene certeza de aplicar el análisis de varianza y obtener resultados confiables.

#### 3.8.2. Análisis de la varianza del esfuerzo a flexión

Tras la verificación de supuestos, se desarrolla el ANOVA, con un modelo que incluye términos de segundo grado, el modelo tiene un coeficiente de determinación de 65,19 %. Se consideraron como términos principales de análisis la orientación de la primera y segunda capa de fibra de chambira, la temperatura, el tipo de fibra sintética y el tipo de moldeo. De ahí se derivan los términos de mayor grado y las interacciones que se consideran estadísticamente relevantes para el modelo a definir.

Tabla 3.20. Análisis de la varianza del esfuerzo a flexión.

Fuente	GL	SC Ajust	MC Ajust	Valor F	Valor p
Regresión	33	29,734	0,901	13,39	0,000
Orient. FCh. C1	1	0,002	0,002	0,02	0,877
Orient. FCh. C2	1	0,251	0,251	3,72	0,055
Temp. [°C]	1	0,311	0,311	4,62	0,033
Moldeo	1	0,583	0,583	8,66	0,004
Fibra Sint. C0	2	2,451	1,225	18,21	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1	1	1,413	1,413	21,01	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2	1	11,614	11,614	172,62	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C2	1	1,120	1,120	16,64	0,000
Orient. FCh. C1*Moldeo	1	0,620	0,620	9,21	0,003
Orient. FCh. C1*Fibra Sint. C0	2	0,513	0,256	3,81	0,023
Orient. FCh. C2*Moldeo	1	0,410	0,410	6,09	0,014
Orient. FCh. C2*Fibra Sint. C0	2	0,499	0,249	3,70	0,026
Temp. [°C]*Moldeo	1	1,474	1,474	21,91	0,000
Moldeo*Fibra Sint. C0	2	0,595	0,297	4,42	0,013
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Temp. [°C]	1	0,362	0,3620	5,38	0,021
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2	1	0,292	0,292	4,34	0,038
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Moldeo	1	0,7318	0,732	10,88	0,001
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Fibra Sint. C0	2	0,9992	0,500	7,43	0,001
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2*Moldeo	1	0,9529	0,953	14,16	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2*Fibra Sint. C0	2	1,5736	0,787	11,69	0,000
Orient. FCh. C2*Moldeo*Fibra Sint. C0	2	0,8542	0,427	6,35	0,002
Temp. [°C]*Temp. [°C]*Moldeo	1	0,4766	0,477	7,08	0,008
Temp. [°C]*Temp. [°C]*Fibra Sint. C0	2	0,7684	0,384	5,71	0,004
Temp. [°C]*Moldeo*Fibra Sint. C0	2	1,4911	0,746	11,08	0,000
Error	236	15,8786	0,067		
Falta de ajuste	44	9,9285	0,226	7,28	0,000
Error puro	192	5,9501	0,031		
Total	269	45,6123			

Con la adecuada verificación de términos relevantes, se tiene ya el modelo generado para ser considerado para la predicción del punto óptimo. Este modelo cuenta con los términos descritos en la Tabla 3.20, los cuales son estadísticamente significativos con un grado de 5%.

$$\begin{aligned}
 Y_{ijkmn} = & \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \zeta_m + (\alpha^2)_i + (\beta^2)_j + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\delta)_{il} + (\alpha\zeta)_{im} \\
 & + (\beta\delta)_{jl} + (\beta\zeta)_{jm} + (\gamma\delta)_{kl} + (\delta\zeta)_{lm} + (\alpha^2\gamma)_{ik} + (\alpha\beta^2)_{ij} + (\alpha^2\delta)_{il} \\
 & + (\alpha^2\zeta)_{im} + (\beta^2\delta)_{jl} + (\beta^2\zeta)_{jm} + (\beta\delta\zeta)_{jlm} + (\gamma^2\delta)_{kl} + (\gamma^2\zeta)_{km} \\
 & + (\gamma\delta\zeta)_{klm} + \varepsilon_{ijklmn}
 \end{aligned}$$

### 3.8.3. Análisis de gráficos (Pareto y efectos)

Esquematisando la información de la tabla anterior, se tienen el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacción.

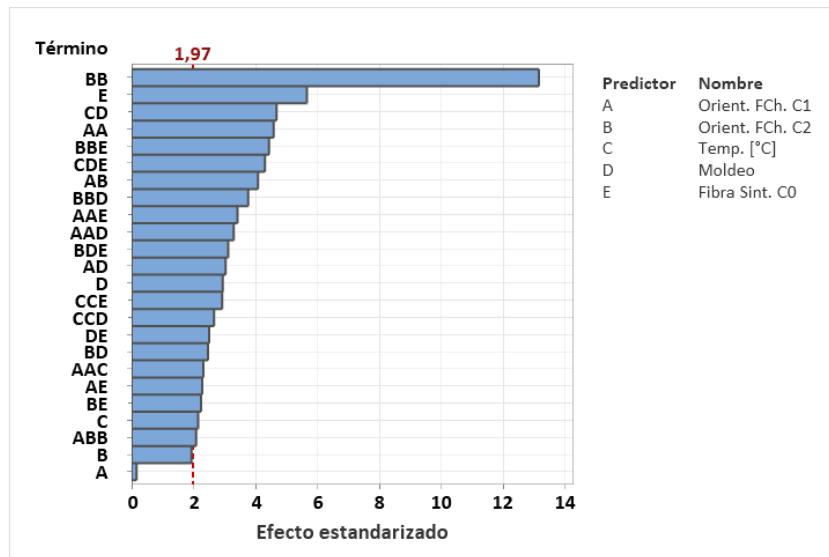


Figura 3.17. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del esfuerzo a flexión

Los términos que más contribuyen son los efectos cuadráticos de la segunda capa de la orientación de la fibra de chambira, seguida del efecto del tipo de fibra sintética y de la interacción entre la temperatura y el tipo de fibra sintética.

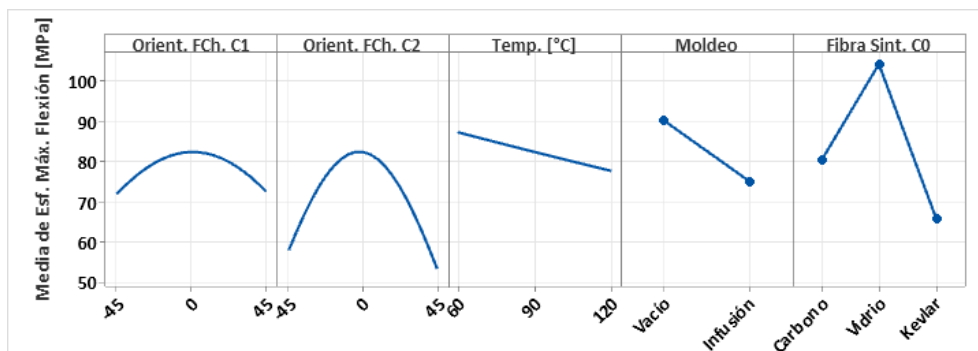


Figura 3.18. Gráfica de efectos principales para el esfuerzo a flexión.

Dentro del gráfico de efectos principales, reforzando la información de la tabla del análisis de la varianza, se tiene una contribución sustancial del tipo de fibra sintética, debido a la pronunciada pendiente que presenta la gráfica de esta variable. A continuación, se tienen la contribución de la orientación de la segunda capa de fibra de chambira y por detrás, también el efecto de la primera capa.

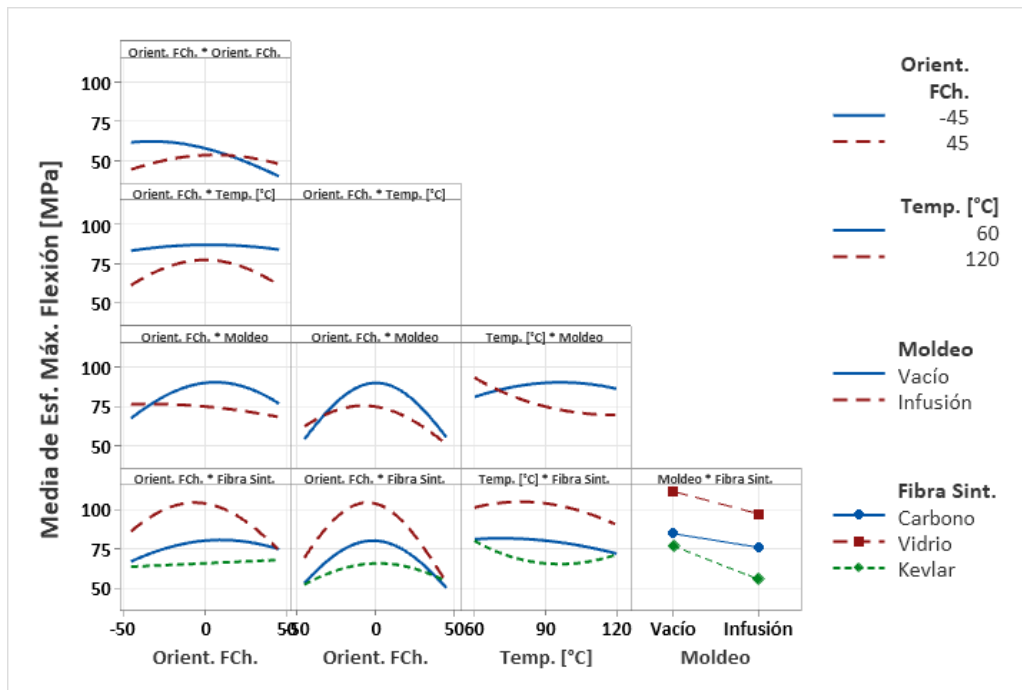


Figura 3.19. Gráfica de efectos principales para el esfuerzo a flexión.

De manera esquemática, la interacción se presenta como la diferencia de las pendientes, entre cada gráfica particular, que involucra la interacción de segundo grado. En esta gráfica se tiene la interacción significativa del tipo de fibra sintética con el tipo de moldeo. Además, se tiene la interacción entre la orientación de la primera capa de fibra de chambira con el tipo de moldeo. En este caso se revisa como la relación de una variable sobre la otra, al cambiar los niveles de dichas variables.

### 3.8.4. Optimización individual del esfuerzo a flexión

Empleado la función de deseabilidad, se obtiene el punto óptimo para el esfuerzo a flexión, mediante la combinación de los cinco factores estudiados. Los parámetros de entrada al igual que la respuesta de salida se muestran en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21. Optimización individual para el esfuerzo a flexión

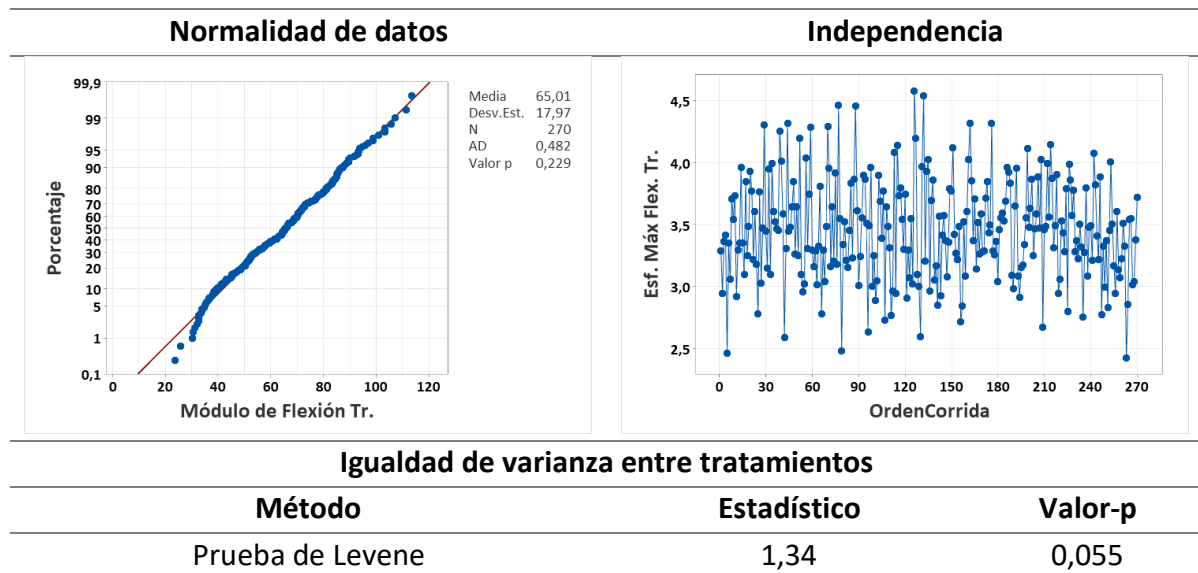
Parámetros de entrada		Respuesta de salida		
Factores	Valor	Ensayo	Propiedad	Ajuste
Tipo de moldeo	Infusión	Flexión	Esfuerzo máximo de flexión	139,62 MPa
Tipo de fibra sintética	Vidrio			
Orient. f. chambira capa 1	- 45 °			
Orient. f. chambira capa 2	- 25,091 °			
Temperatura	60 °C			

### 3.9. Análisis estadístico del módulo de flexión

#### 3.9.1. Verificación de supuestos del módulo de flexión

Se revisan los supuestos paramétricos en los datos obtenidos con los ensayos mecánicos, este proceso garantiza la aplicabilidad del análisis de la varianza, al ser esta una técnica estadística paramétrica. Para cumplir con los supuestos se empleó un coeficiente de transformación de 0,5 para la transformación de Box-Cox.

Tabla 3.22. Verificación de supuestos en datos del esfuerzo máximo a la flexión



En la tabla antes presentada, se revisan la gráfica de probabilidad normal, la gráfica de los datos versus el orden de observación y la prueba de Levene, con lo que se consigue verificar los supuestos de normalidad, independencia de datos e igualdad de varianza, respectivamente. Al cumplirse los supuestos, se tiene certeza de al aplicar el análisis de varianza ANOVA, obtener resultados confiables.

#### 3.9.2. Análisis de la varianza del módulo de flexión

Tras la verificación de supuestos, se desarrolla el ANOVA, con un modelo que incluye términos de segundo grado, el modelo tiene un coeficiente de determinación de 79,97 %. Se consideraron como términos principales de análisis la orientación de la primera y segunda capa de fibra de chambira, la temperatura, el tipo de fibra sintética y el tipo de moldeo. De ahí se derivan los términos de mayor grado y las interacciones que se consideran estadísticamente relevantes para el modelo a definir.

Tabla 3.23. Análisis de la varianza del módulo de elasticidad a flexión

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	22	105024	4773,8	44,84	0,000
Orient. FCh. C1	1	16	16,0	0,15	0,699
Orient. FCh. C2	1	17	16,8	0,16	0,691
Temp. [°C]	1	124	124,1	1,17	0,281
Moldeo	1	24664	24663,6	231,65	0,000
Fibra Sint. C0	2	11173	5586,5	52,47	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2	1	37947	37947,1	356,41	0,000
Temp. [°C]*Moldeo	1	1261	1260,8	11,84	0,001
Temp. [°C]*Fibra Sint. C0	2	1407	703,6	6,61	0,002
Moldeo*Fibra Sint. C0	2	1845	922,5	8,66	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C2*Fibra Sint. C0	2	1932	965,8	9,07	0,000
Orient. FCh. C1*Temp. [°C]*Moldeo	1	575	574,9	5,40	0,021
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2*Fibra Sint. C0	2	4427	2213,3	20,79	0,000
Temp. [°C]*Temp. [°C]*Moldeo	1	447	446,9	4,20	0,042
Temp. [°C]*Moldeo*Fibra Sint. C0	2	2974	1487,2	13,97	0,000
Or. FCh. C1*Or. FCh. C2*Moldeo*Fib Sint. C0	2	2067	1033,4	9,71	0,000
Error	247	26298	106,5		
Falta de ajuste	55	9870	179,5	2,10	0,000
Error puro	192	16427	85,6		
Total	269	131322			

Con la adecuada verificación se tienen ya el modelo generado para ser considerado para predicción del punto óptimo. Este modelo cuenta con los términos descritos en la Tabla 3.23, los cuales son estadísticamente significativos con un grado de 5%.

$$Y_{ijklmn} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \zeta_m + (\beta^2)_j + (\gamma\delta)_{kl} + (\gamma\zeta)_{km} + (\delta\zeta)_{lm} + (\alpha\beta\zeta)_{ikm} \\ + (\alpha\gamma\delta)_{ikl} + (\beta^2\zeta)_{jm} + (\gamma^2\delta)_{kl} + (\gamma\delta\zeta)_{klm} + (\alpha\beta\delta\zeta)_{iklm} + \varepsilon_{ijklmn}$$

### 3.9.3. Análisis de gráficos (Pareto y efectos)

Esquematizando la información de la tabla anterior, se tienen el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacción.

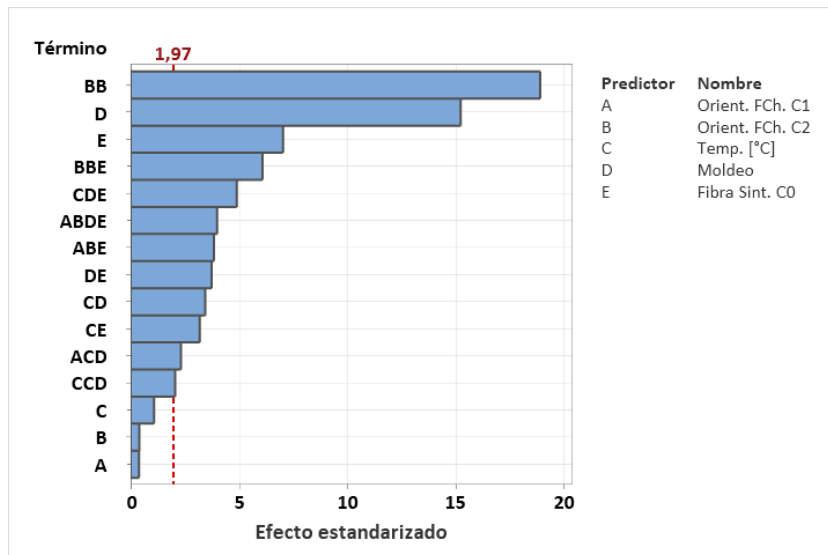


Figura 3.20. Diagrama de Pareto: efectos estandarizados del módulo de flexión.

Los términos que más contribuyen es el término cuadrático de la orientación de la segunda capa de fibra de chambira, seguido del efecto del tipo de moldeo y luego el efecto del tipo de fibra sintética.

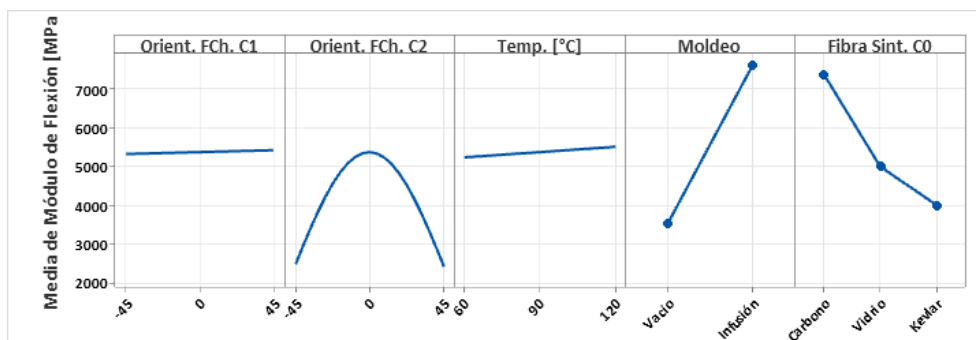


Figura 3.21. Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad a flexión.

Dentro del gráfico de efectos principales, reforzando la información de la tabla del análisis de la varianza, se tiene una contribución sustancial del tipo de fibra sintética, debido a la pronunciada pendiente que presenta la gráfica de esta variable. A continuación, se tiene la contribución de la orientación de la segunda capa de fibra de chambira.

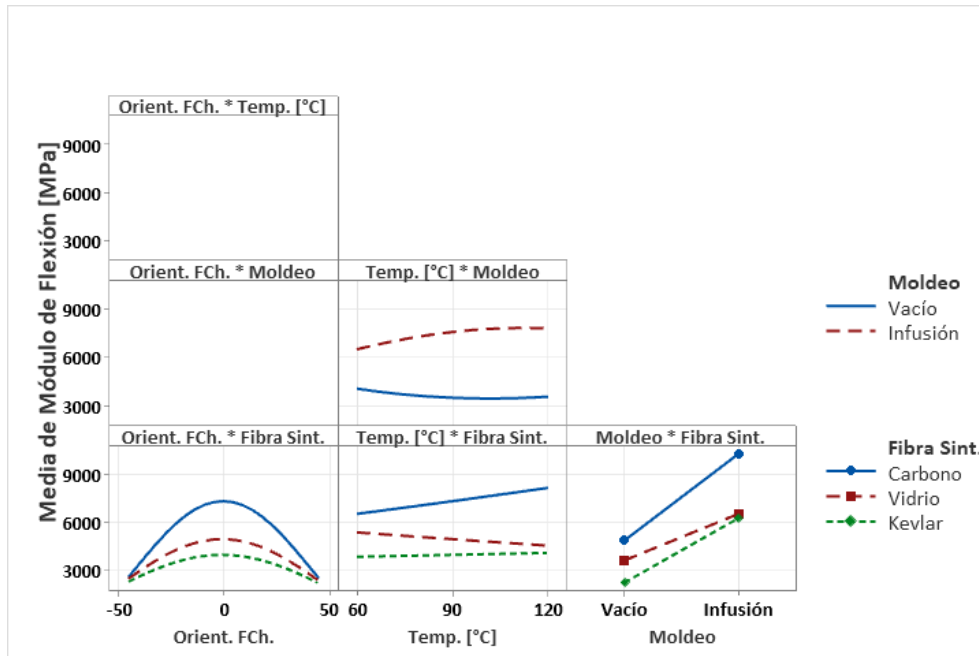


Figura 3.22. Gráfica de efectos principales para el módulo de elasticidad a flexión.

De manera esquemática, la interacción se presenta como la diferencia de las pendientes, entre cada gráfica particular, que envuelve la interacción de segundo grado. En esta gráfica se tiene la interacción significativa del tipo de fibra con el tipo de moldeo. En este caso se revisa como la relación de una variable sobre la otra, al cambiar los niveles de dichas variables.

### 3.9.4. Optimización individual del módulo de flexión

Empleado la función de deseabilidad, se obtiene el punto óptimo para el módulo de elasticidad a flexión, mediante la combinación de los cinco factores estudiados. Los parámetros de entrada al igual que la respuesta de salida se muestran en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24. Optimización individual para el módulo de elasticidad a flexión

Parámetros de entrada		Respuesta de salida		
Factores	Valor	Ensayo	Propiedad	Ajuste
Tipo de moldeo	Infusión	Flexión	Módulo de flexión	13419,03 MPa
Tipo de fibra sintética	Carbono			
Orient. f. chambira capa 1	45 °			
Orient. f. chambira capa 2	- 4,091 °			
Temperatura	120 °C			

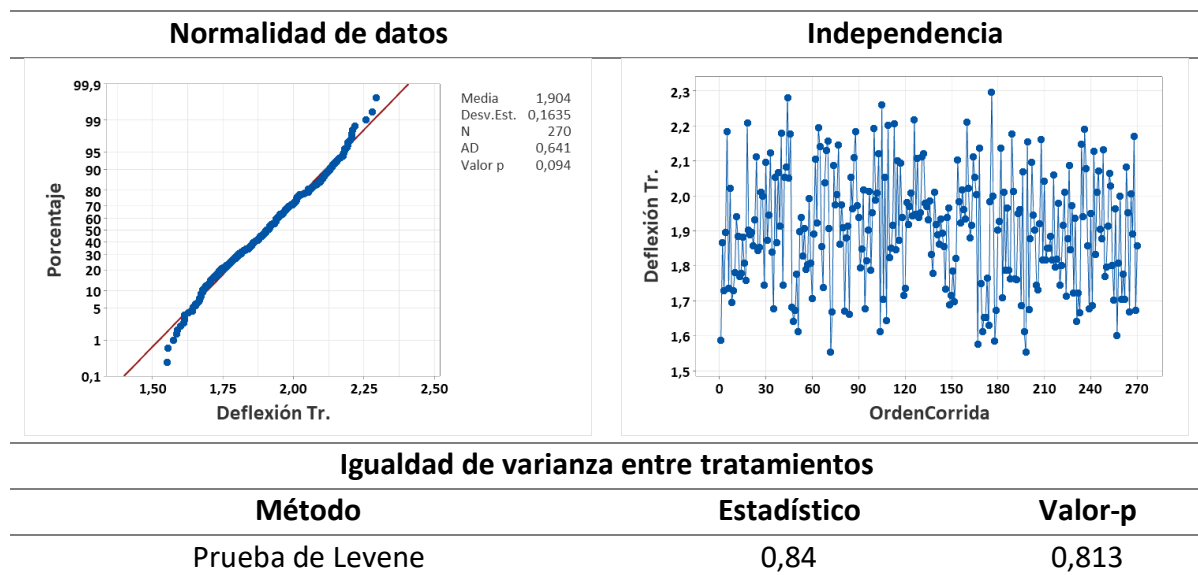


### 3.10. Análisis estadístico de la deflexión

#### 3.10.1. Verificación de supuestos de la deflexión

Se revisan los supuestos paramétricos en los datos obtenidos con los ensayos mecánicos, este proceso garantiza la aplicabilidad del análisis de la varianza, al ser esta una técnica estadística paramétrica. Para cumplir con los supuestos se empleó un coeficiente de transformación de 0,3 para la transformación de Box-Cox.

Tabla 3.25. Verificación de supuestos en datos de la deflexión.



En la tabla antes presentada, se revisan la gráfica de probabilidad normal, la gráfica de los datos versus el orden de observación y la prueba de Levene, con lo que se consigue verificar los supuestos de normalidad, independencia de datos e igualdad de varianza, respectivamente. Al cumplirse los supuestos, se tiene certeza de al aplicar el análisis de varianza, obtener resultados confiables.

#### 3.10.2. Análisis de la varianza de la deflexión

Tras la verificación de supuestos, se desarrolla el ANOVA, con un modelo que incluye términos de segundo grado, el modelo tiene un coeficiente de determinación de 79,75 %. Se consideraron como términos principales de análisis la orientación de la primera y segunda capa de fibra de chambira, la temperatura, el tipo de fibra sintética y el tipo de moldeo. De ahí se derivan los términos de mayor grado y las interacciones que se consideran estadísticamente relevantes para el modelo a definir.

Tabla 3.26. Análisis de la varianza de la deflexión.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	27	5,983	0,222	35,30	0,000
Orient. FCh. C1	1	0,009	0,009	1,42	0,235
Orient. FCh. C2	1	0,056	0,056	8,86	0,003
Temp. [°C]	1	0,010	0,010	1,53	0,217
Moldeo	1	0,000	0,000	0,03	0,855
Fibra Sint. C0	2	0,200	0,100	15,89	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2	1	2,716	2,716	432,63	0,000
Temp. [°C]*Temp. [°C]	1	0,041	0,041	6,45	0,012
Temp. [°C]*Moldeo	1	0,467	0,467	74,42	0,000
Temp. [°C]*Fibra Sint. C0	2	0,161	0,080	12,79	0,000
Moldeo*Fibra Sint. C0	2	0,067	0,034	5,36	0,005
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Temp. [°C]	1	0,104	0,104	16,63	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Moldeo	1	0,091	0,091	14,42	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Fibra Sint. C0	2	0,135	0,068	10,76	0,000
Orient. FCh. C1*Temp. [°C]*Fibra Sint. C0	2	0,047	0,024	3,77	0,024
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2*Moldeo	1	0,131	0,131	20,85	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2*Fibra Sint. C0	2	0,202	0,101	16,08	0,000
Temp. [°C]*Temp. [°C]*Moldeo	1	0,110	0,110	17,53	0,000
Temp. [°C]*Temp. [°C]*Fibra Sint. C0	2	0,060	0,030	4,79	0,009
Temp. [°C]*Moldeo*Fibra Sint. C0	2	0,119	0,060	9,51	0,000
Error	242	1,519	0,006		
Falta de ajuste	50	0,789	0,016	4,15	0,000
Error puro	192	0,730	0,004		
Total	269	7,503			

Con la adecuada verificación de términos relevantes, se tiene ya el modelo generado para ser considerado para la predicción del punto óptimo. Este modelo cuenta con los términos descritos en la Tabla 3.26, los cuales son estadísticamente significativos con un grado de 5%.

$$\begin{aligned}
 Y_{ijklmn} = & \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \zeta_m + (\beta^2)_j + (\gamma^2)_k + (\gamma\delta)_{kl} + (\gamma\zeta)_{km} + (\delta\zeta)_{lm} \\
 & + (\alpha^2\gamma)_{ik} + (\alpha^2\delta)_{il} + (\alpha^2\zeta)_{im} + (\alpha\gamma\zeta)_{ikm} + (\beta^2\delta)_{jl} + (\beta^2\zeta)_{jm} + (\gamma^2\delta)_{kl} \\
 & + (\gamma^2\zeta)_{km} + (\gamma\delta\zeta)_{klm} + \varepsilon_{ijklmn}
 \end{aligned}$$

### 3.10.3. Análisis de gráficos (Pareto y efectos)

Esquematisando la información de la tabla anterior, se tienen el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacción.

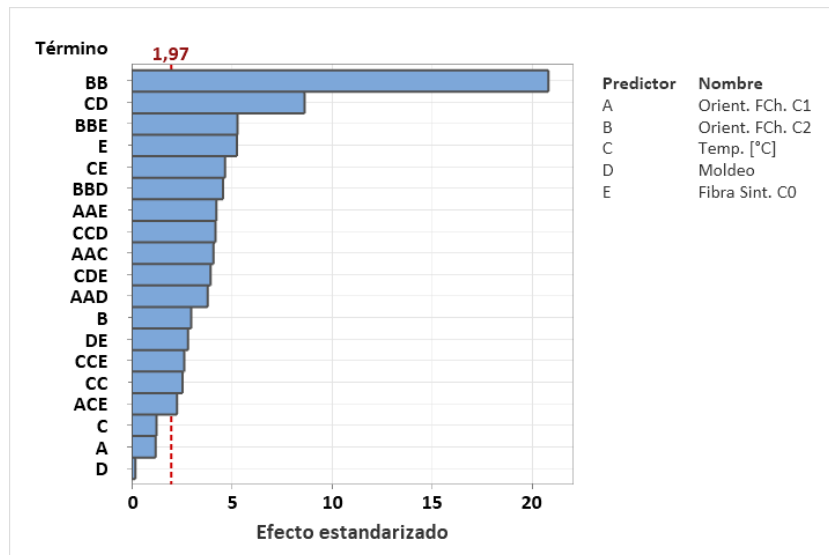


Figura 3.23. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de la deflexión

Los términos que más contribuyen es el efecto cuadrático de la orientación de la segunda capa de fibra de chambira y el efecto cuadrático de la temperatura.

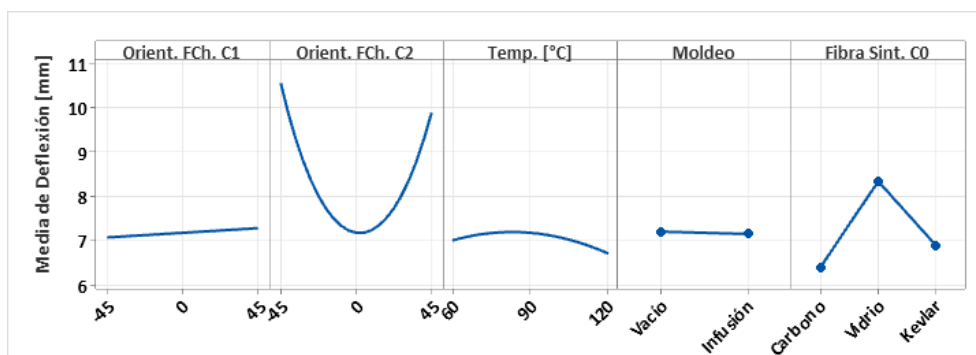


Figura 3.24. Gráfica de efectos principales para la deflexión.

Dentro del gráfico de efectos principales, reforzando la información de la tabla del análisis de la varianza, se tiene una contribución sustancial del tipo de fibra sintética, debido a la pronunciada pendiente que presenta la gráfica de esta variable, seguida de este, se tienen la contribución de la orientación de la segunda capa de fibra de chambira. De manera esquemática, la interacción se presenta como la diferencia de las pendientes, entre cada gráfica particular, que envuelve la interacción de segundo grado. En esta gráfica se tiene la interacción significativa del tipo de fibra sintética con el tipo de moldeo. En este caso se revisa como la relación de una variable sobre la otra, al cambiar los niveles de dichas variables.

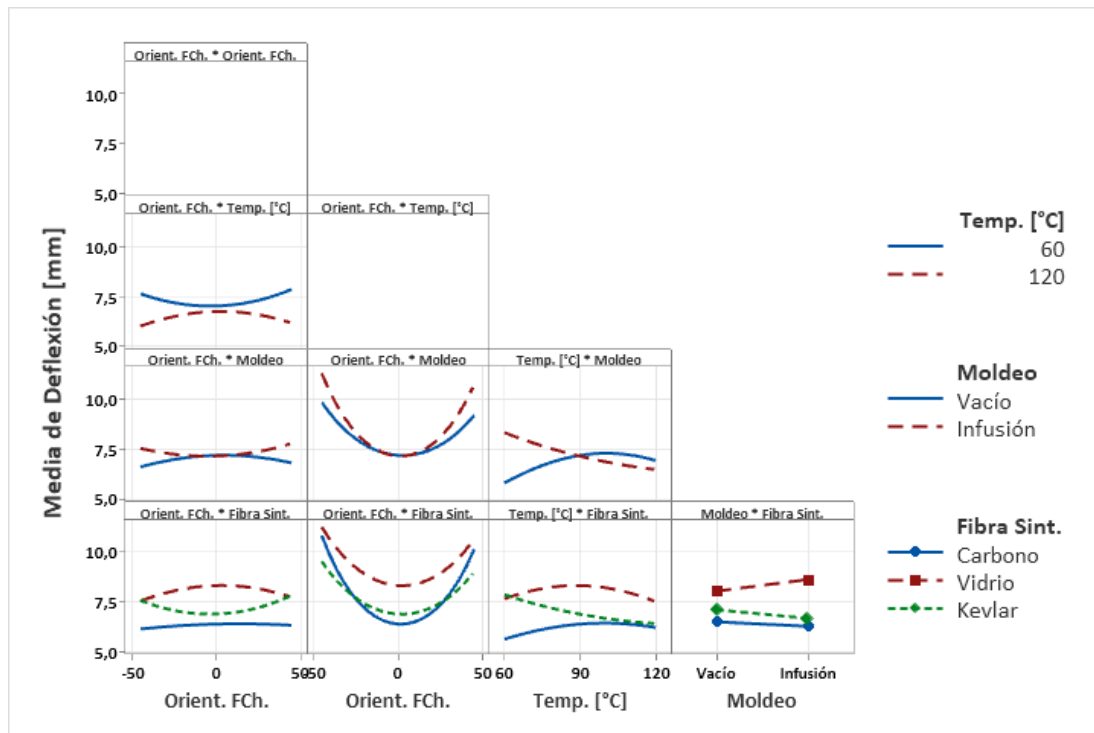


Figura 3.25. Gráfica de efectos principales para la deflexión.

### 3.10.4. Optimización individual de la deflexión

Empleado la función de deseabilidad, se obtiene el punto óptimo para el esfuerzo a flexión, mediante la combinación de los cinco factores estudiados. Los parámetros de entrada al igual que la respuesta de salida se muestran en la Tabla 3.27.

Tabla 3.27. Optimización individual para la deflexión.

Parámetros de entrada		Respuesta de salida		
Factores	Valor	Ensayo	Propiedad	Ajuste
Tipo de moldeo	Vacío			
Tipo de fibra sintética	Carbono			
Orient. f. chambira capa 1	- 45 °	Flexión	Deflexión	4,69 mm
Orient. f. chambira capa 2	2,273 °			
Temperatura	120 °C			

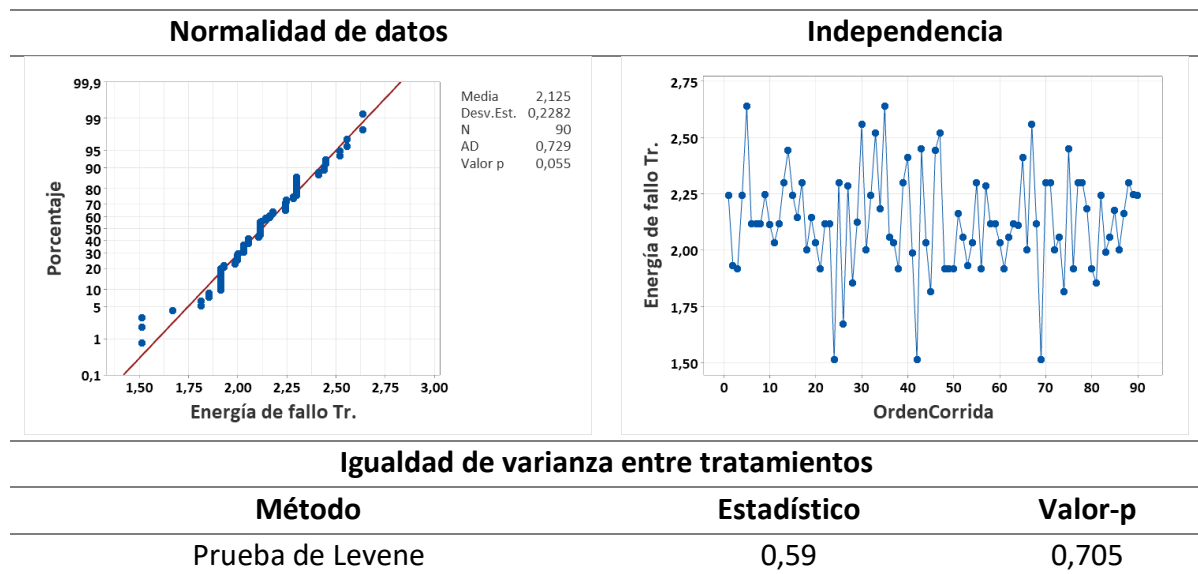
### 3.11. Análisis estadístico de la energía de impacto

#### 3.11.1. Verificación de supuestos de la energía de impacto

Se revisan los supuestos paramétricos en los datos obtenidos con los ensayos mecánicos, este proceso garantiza la aplicabilidad del análisis de la varianza, al ser esta una técnica estadística

paramétrica. Para cumplir con los supuestos se empleó un coeficiente de transformación de 0,5 para la transformación de Box-Cox.

Tabla 3.28. Verificación de supuestos en datos de la energía de impacto.



En la tabla antes presentada, se revisan la gráfica de probabilidad normal, la gráfica de los datos versus el orden de observación y la prueba de Levene, con lo que se consigue verificar los supuestos de normalidad, independencia de datos e igualdad de varianza, respectivamente. Al cumplirse los supuestos, se tiene certeza de al aplicar el análisis de varianza ANOVA, obtener resultados confiables.

### 3.11.2. Análisis de la varianza de la energía de impacto

Tras la verificación de supuestos, se desarrolla el ANOVA, con un modelo que incluye términos de segundo grado, el modelo tiene un coeficiente de determinación de 83,79 %. Se consideraron como términos principales de análisis la orientación de la primera y segunda capa de fibra de chambira, la temperatura, el tipo de fibra sintética y el tipo de moldeo. De ahí se derivan los términos de mayor grado y las interacciones que se consideran estadísticamente relevantes para el modelo a definir.

Tabla 3.29. Análisis de la varianza de la energía media de fallo.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	20	4,723	0,236	17,83	0,000
Orient. FCh. C1	1	0,063	0,063	4,73	0,033
Orient. FCh. C2	1	0,203	0,203	15,31	0,000

Temp.	1	0,877	0,877	66,26	0,000
Moldeo	1	0,000	0,000	0,00	1,000
Fibra Sint. C0	2	0,546	0,273	20,61	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1	1	0,420	0,420	31,69	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2	1	0,377	0,377	28,42	0,000
Temp.*Temp.	1	0,900	0,900	67,93	0,000
Orient. FCh. C1*Temp.	1	0,076	0,076	5,77	0,019
Orient. FCh. C1*Fibra Sint. C0	2	0,192	0,096	7,26	0,001
Orient. FCh. C2*Fibra Sint. C0	2	0,417	0,208	15,73	0,000
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1*Fibra Sint. C0	2	0,675	0,338	25,50	0,000
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2*Fibra Sint. C0	2	0,143	0,071	5,39	0,007
Temp.*Temp.*Fibra Sint. C0	2	0,430	0,215	16,21	0,000
Error	69	0,914	0,013		
Falta de ajuste	57	0,721	0,013	0,79	0,740
Error puro	12	0,193	0,016		
Total	89	5,636			

Con la adecuada verificación se tienen ya el modelo generado para ser considerado para predicción del punto óptimo. Este modelo cuenta con los términos descritos en la Tabla 3.29, los cuales son estadísticamente significativos con un grado de 5%.

$$Y_{ijklmn} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \zeta_m + (\alpha^2)_i + (\beta^2)_j + (\gamma^2)_k + (\alpha\gamma)_{ik} + (\alpha\zeta)_{im} + (\delta\zeta)_{lm} + (\alpha^2\zeta)_{im} + (\beta^2\zeta)_{jm} + (\gamma^2\zeta)_{km} + \varepsilon_{ijklmn}$$

### 3.11.3. Análisis de gráficos (Pareto y efectos)

Esquematizando la información de la tabla anterior, se tienen el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacción.

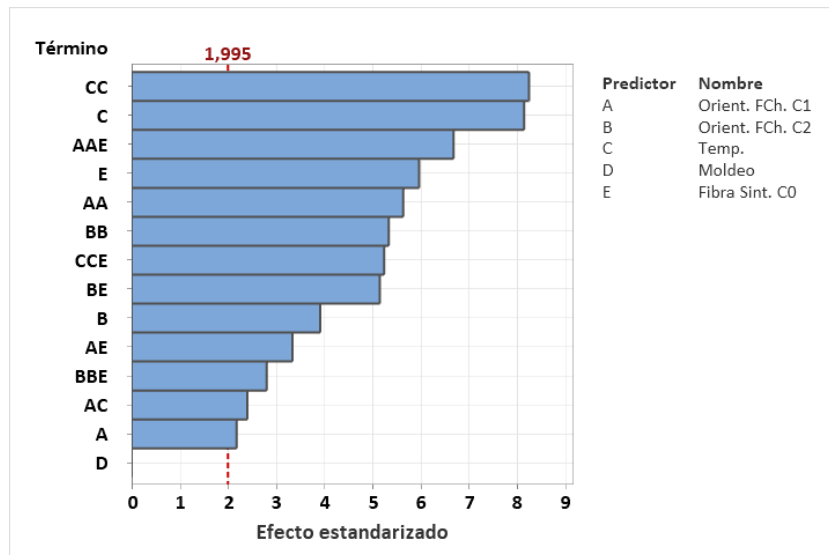


Figura 3.26. Diagrama de Pareto: efectos estandarizados de energía de impacto.

Los términos que más contribuyen es la interacción entre el término cuadrático de la orientación de la primera capa de fibra de chambira con y el tipo de fibra sintética, también es muy relevante el efecto cuadrático de la temperatura y luego el efecto lineal de la temperatura.

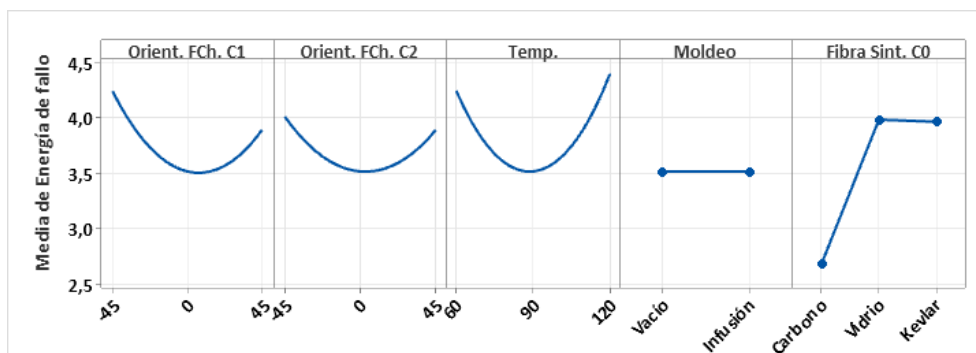


Figura 3.27. Gráfica de efectos principales para la energía media de fallo.

Dentro del gráfico de efectos principales, reforzando la información de la tabla del Análisis de la Varianza, se tiene una contribución sustancial del tipo de fibra sintética, debido a la pronunciada pendiente que presenta la gráfica de esta variable. A continuación, se tiene la contribución de la orientación de la capa 1.

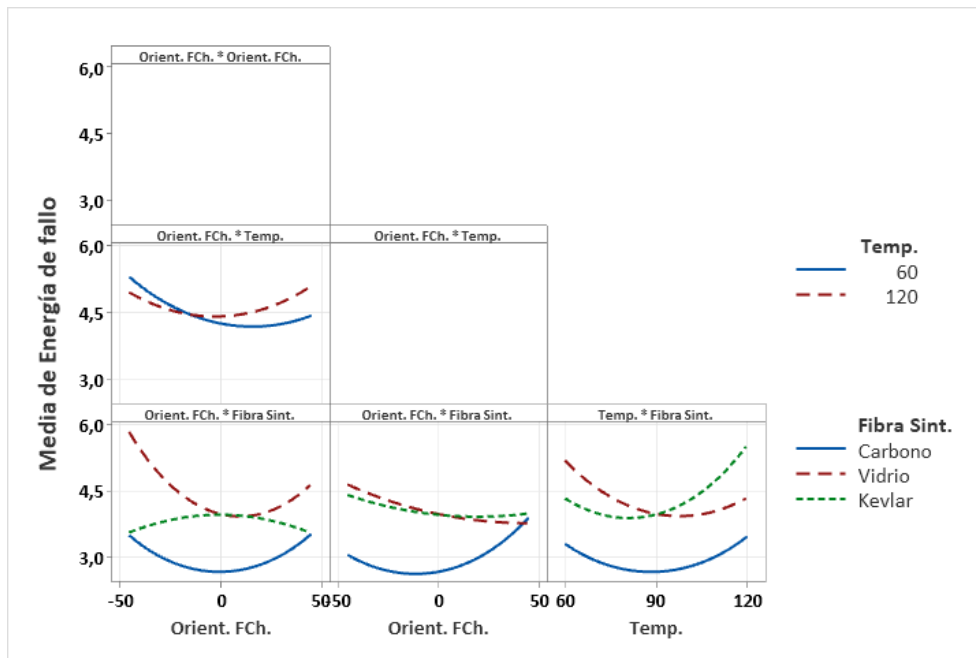


Figura 3.28. Gráfica de efectos principales para la energía media de fallo.

De manera esquemática, la interacción se presenta como la diferencia de las pendientes, entre cada gráfica particular, que envuelve la interacción de segundo grado. En esta gráfica se tiene la interacción significativa de la orientación de la segunda capa de fibra de chambira con el tipo de fibra sintética. En este caso se revisa como la relación de una variable sobre la otra, al cambiar los niveles de dichas variables.

#### 3.11.4. Optimización individual de la energía de impacto

Empleado la función de deseabilidad, se obtiene el punto óptimo para la energía media de fallo, mediante la combinación de los cinco factores estudiados. Los parámetros de entrada al igual que la respuesta de salida se muestran en la Tabla 3.30.

Tabla 3.30. Optimización individual para la energía media de fallo.

Parámetros de entrada		Respuesta de salida		
Factores	Valor	Ensayo	Propiedad	Ajuste
Tipo de moldeo	Infusión	Impacto	Energía media de fallo	8,50 J
Tipo de fibra sintética	Vidrio			
Orient. f. chambira capa 1	- 45 °			
Orient. f. chambira capa 2	- 45 °			
Temperatura	60 °C			



### 3.12. Optimización global de las propiedades mecánicas del híbrido en análisis

Con revisión y análisis de los datos de cada una de las propiedades mecánicas y con la optimización individual de las propiedades antes comentadas, se efectúa la optimización global empleando la optimización compuesta de las respuestas evaluadas. En la Tabla 3.31 se plasman los valores de los parámetros de entrada (factores) que optimizan las siete respuestas de salida (propiedades mecánicas), la combinación de factores presentada aprovecha de manera estratégica las propiedades analizadas.

Tabla 3.31. Optimización global.

<b>Parámetros de entrada</b>		
<b>Factores</b>		<b>Valor</b>
<b>Tipo de moldeo</b>		Infusión
<b>Tipo de fibra sintética</b>		Carbono
<b>Orientación - fibra de chambira capa 1</b>		19,55 °
<b>Orientación - fibra de chambira capa 2</b>		3,18 °
<b>Temperatura</b>		120 °C
<b>Respuestas de salida</b>		
<b>Ensayos</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Ajuste</b>
<b>Tracción</b>	Esfuerzo máximo [MPa]	118,01
	Módulo de tracción [MPa]	22692,43
	Elongación [%]	2,15
<b>Flexión</b>	Esfuerzo máximo [MPa]	71,19
	Módulo de flexión [MPa]	12842,78
	Deflexión [mm]	6,44
<b>Impacto</b>	Energía de impacto [J]	3,83

Para entender como influyen los factores de entrada sobre las respuestas de salida, de manera conjunta, se evalúa la función de deseabilidad a través de un análisis de la varianza sobre los datos de la deseabilidad global.

#### 3.12.1. Análisis de la función de deseabilidad

Para el análisis de la función de deseabilidad se efectúa el análisis de la varianza, este se dispone en la Tabla 3.32. Dentro de la tabla se incluye la contribución que cada fuente de variabilidad tiene sobre la deseabilidad global.

Tabla 3.32. Análisis de la varianza de la deseabilidad global.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	Contrib.
Regresión	23	0,4908	0,0213	27,36	0,000	<b>90,51%</b>
Orient. FCh. C1	1	0,0020	0,0001	0,17	0,680	0,37%
Orient. FCh. C2	1	0,0002	0,0013	1,63	0,206	0,03%
Temp.	1	0,0001	0,0256	32,88	0,000	0,02%
Moldeo	1	0,0214	0,0024	3,02	0,087	<b>3,94%</b>
Fibra Sint. C0	2	0,0760	0,0015	1,92	0,155	<b>14,02%</b>
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C1	1	0,0021	0,0050	6,37	0,014	0,39%
Orient. FCh. C2*Orient. FCh. C2	1	0,2758	0,2612	334,89	0,000	<b>50,86%</b>
Temp.*Temp.	1	0,0267	0,0267	34,20	0,000	<b>4,92%</b>
Orient. FCh. C1*Orient. FCh. C2	1	0,0042	0,0042	5,35	0,024	0,77%
Orient. FCh. C1*Temp.	1	0,0006	0,0006	0,71	0,403	0,10%
Orient. FCh. C2*Temp.	1	0,0003	0,0003	0,42	0,517	0,06%
Orient. FCh. C1*Moldeo	1	0,0016	0,0016	1,99	0,163	0,29%
Orient. FCh. C1*Fibra Sint. C0	2	0,0034	0,0017	2,20	0,119	0,63%
Orient. FCh. C2*Moldeo	1	0,0006	0,0006	0,81	0,372	0,12%
Orient. FCh. C2*Fibra Sint. C0	2	0,0041	0,0021	2,63	0,079	0,76%
Temp.*Moldeo	1	0,0039	0,0039	4,98	0,029	0,72%
Temp.*Fibra Sint. C0	2	0,0022	0,0011	1,43	0,247	0,41%
Moldeo*Fibra Sint. C0	2	0,0656	0,0328	42,06	0,000	<b>12,10%</b>
Error	66	0,0515	0,0008			9,49%
Falta de ajuste	54	0,0515	0,0010	*	*	<b>9,49%</b>
Error puro	12	0,0000	0,0000			0,00%
Total	89	0,5422				100,00%

El modelo generado con el análisis consta de términos lineales, cuadráticos e interacciones de dos factores. Dicho modelo explica el 90,51% de la variabilidad de las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto del material híbrido estudiado. El modelo se describe a continuación:

$$\begin{aligned}
 Y_{ijklmn} = & \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + \zeta_m + (\alpha^2)_i + (\beta^2)_j + (\gamma^2)_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} \\
 & + (\alpha\zeta)_{im} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\beta\zeta)_{jm} + (\gamma\delta)_{kl} + (\gamma\zeta)_{km} + (\delta\zeta)_{lm} \\
 & + \varepsilon_{ijklmn}
 \end{aligned}$$

En la Figura 3.29 se evidencian las fuentes de variabilidad del modelo y su respectiva contribución. La gráfica muestra con una porción más grande de la proyección solar a las fuentes que variabilidad que contribuye en mayor grado a las propiedades mecánicas estudiadas.

Se resalta el comportamiento curvo de los datos, haciendo referencia a la existencia de términos cuadráticos relevantes dentro del modelo. En la Figura 3.29 también se puede visualizar la proporción de la variabilidad que toma el error, este se entiende como el 9,49 % del total de la variabilidad de las propiedades mecánicas.

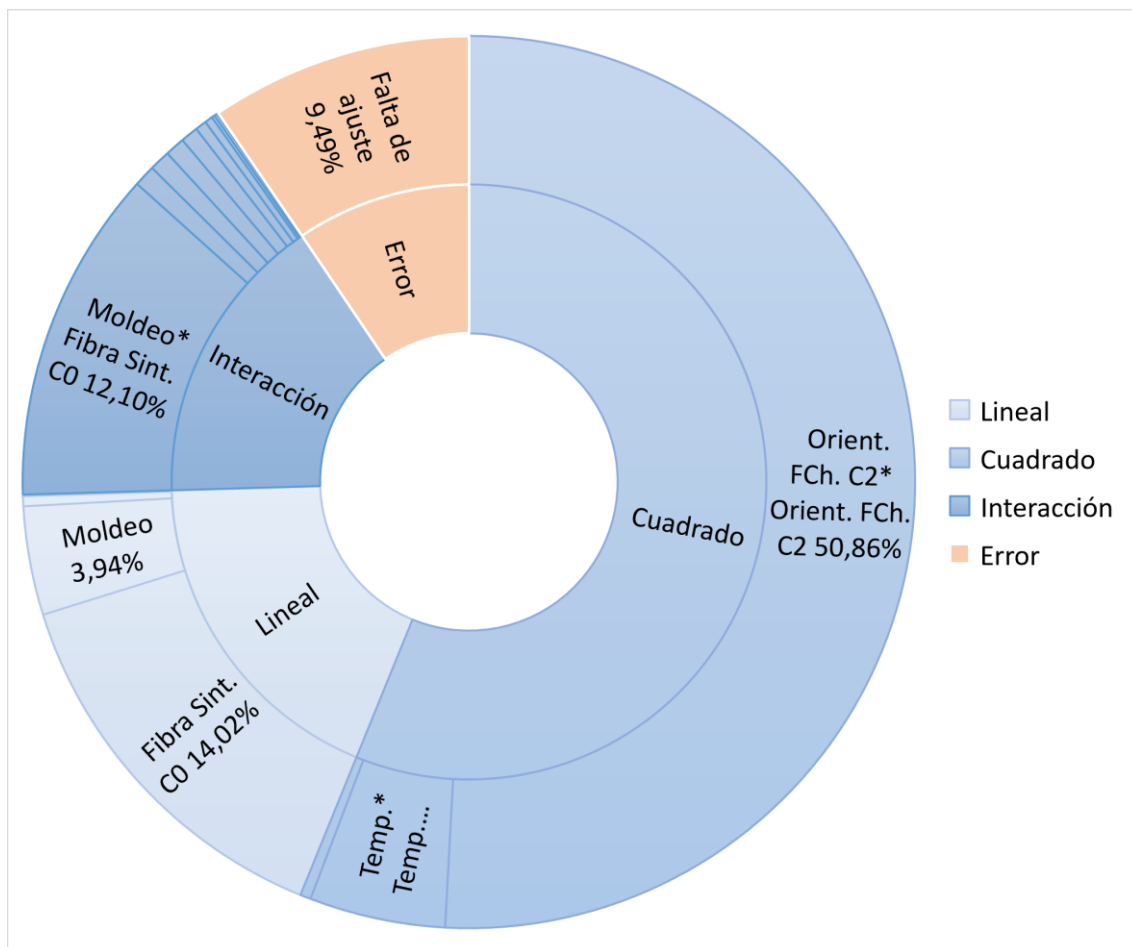


Figura 3.29. Contribución de cada fuente de variabilidad de la deseabilidad global.

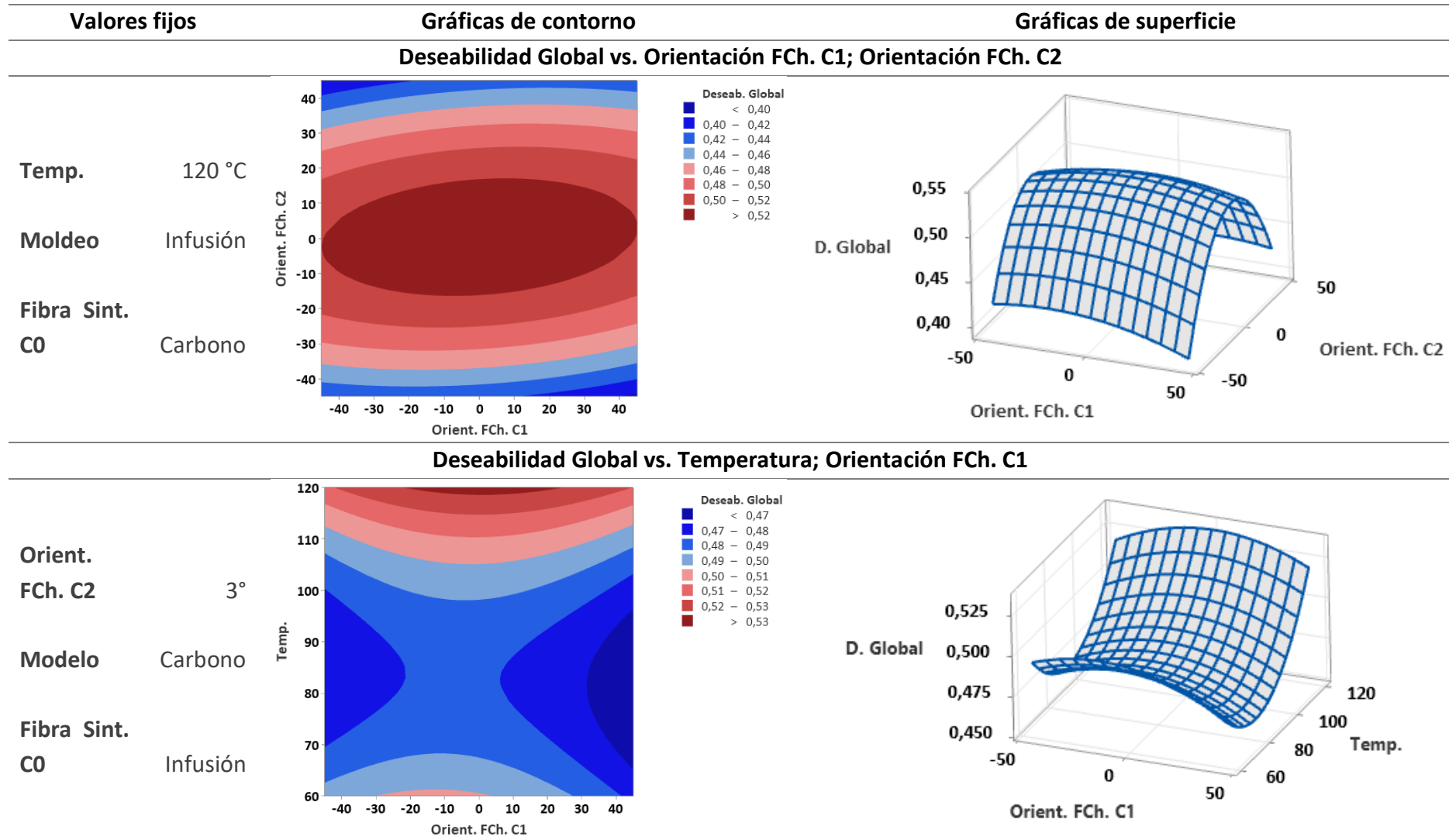
Hay que recordar que la deseabilidad global es el reflejo de las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto estudiadas. Por lo que se entiende que, principalmente, los efectos cuadráticos de la temperatura y los efectos del tipo de fibra influyen positivamente sobre la deseabilidad global; asimismo, los efectos cuadráticos de la orientación de la capa 2 y los efectos del tipo de moldeo influyen negativamente sobre la deseabilidad global.

### **3.12.2. Gráficas de contorno y de superficie**

Con el análisis realizado, se tienen las gráficas de contorno y las gráficas de superficie, ambos tipos de gráficas a partir de los puntos del diseño. Al emplear repetición de puntos al centro, se evaluó la curvatura del modelo y el comportamiento de este.

Se tiene presencia de curvatura en el modelo, la misma que ayuda a determinar una combinación óptima de parámetros de entrada, esta combinación ya fue revisada en la Tabla 3.31, sin embargo, en las gráficas presentadas en la Tabla 3.33, se tiene una revisión al comportamiento en los distintos puntos de la zona experimental, proyectados con el modelo que explica en un 86,53% la variabilidad de las propiedades a tracción, flexión e impacto.

Tabla 3.33. Gráficas de contorno y de superficie de la deseabilidad global



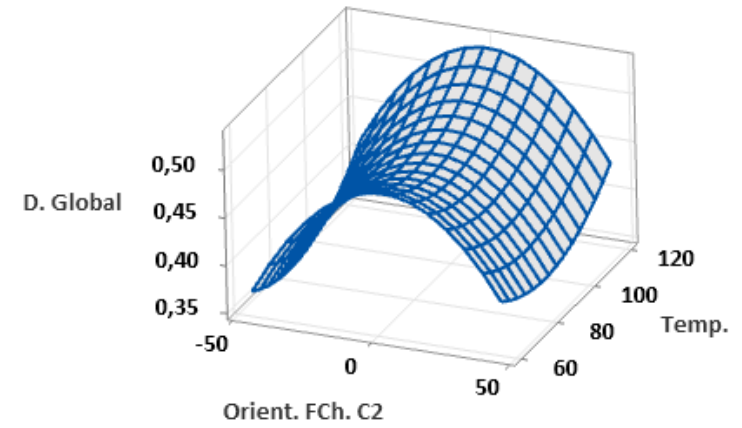
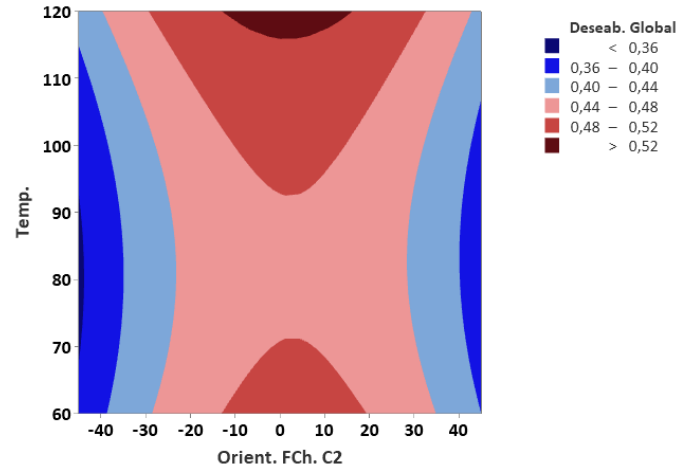
Valores fijos

Gráficas de contorno

Gráficas de superficie

Deseabilidad Global vs. Temperatura; Orientación FCh. C2

**Orient. FCh. C2** 20°  
**Modelo** Infusión  
**Fibra Sint. C0** Carbono



## **CAPÍTULO 4**

### **CONCLUSIONES**

#### **4.1. Respecto al diseño de experimentos aplicable**

Tras la investigación desarrollada, se consiguió aplicar el diseño experimental (DOE), que resulta de interés para conseguir la caracterización del material híbrido de matriz epoxi reforzada con fibra sintética y natural de chambira. Para esto se consideraron dos criterios: (i) el objetivo dentro del diseño de experimentos, y (ii) los factores que se iban a controlar con sus respectivos niveles.

Dentro del primer criterio, se evaluó como objetivo del diseño de experimentos la optimización de los factores, por lo que se consideró preciso emplear la MSR. Método que conlleva un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas para encontrar valores óptimos dentro del grupo de variables independientes que maximizan o minimizan la variable de respuesta. Para el segundo criterio, se tienen los factores y niveles definidos de la siguiente manera: orientación de la capa 1 y capa 2 de fibra natural (-45°, 0°, 45°), temperatura de secado (60°C, 90°C, 120°C), tipo de fibra sintética (carbono, Kevlar, vidrio) y tipo de moldeo (al vacío, por infusión). Con lo cual, se reforzó la selección por la característica de los factores cuantitativos de entrada.

Dentro de la MSR, se decidió emplear el DBB, el cual, debido al número de factores de entrada, es económicamente más eficiente, ya que se requieren menos tratamientos (90 combinaciones), respecto a utilizar un DCC (120 combinaciones). Cabe recalcar que, el DBB al ser un diseño de segundo orden, permitió estudiar los efectos lineales, efectos de interacción y, además, los efectos cuadráticos o de curvatura.

#### **4.2. Respecto a las propiedades mecánicas**

Se determinaron las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto del material híbrido de matriz epoxi reforzada con fibra sintética y natural de chambira. Esto se logró con los lineamientos generados a través del método estadístico empleado, ya que la caracterización se fundamenta en los números de tratamientos o combinaciones (90) y

sus respectivas réplicas (3). Es así como, en un principio, se dispone de la matriz de diseño con las especificaciones del método estadístico descrito al inicio de esta sección. Esta matriz alberga las combinaciones necesarias a caracterizar y con ello conseguir la superficie de respuesta y efectuar todo el análisis estadístico y optimización.

Así mismo, en la primera fase, se obtuvieron las probetas mediante el proceso de conformado al vacío, según la matriz de diseño ya determinada. La caracterización se realizó bajo normas ASTM D 3039 para tracción, ASTM D 7264 para flexión, ASTM D 5628 para impacto. Las propiedades obtenidas fueron: esfuerzos máximos, módulos, porcentaje de alargamiento, deflexiones y energía de fallo, según sea el caso. Para la segunda fase, se obtuvieron especímenes bajo la misma matriz de diseño con sus respectivos factores y niveles, pero esta vez considerando el proceso de conformado o moldeo por RTM (Moldeo por transferencia de resina por infusión). Los especímenes se sometieron a ensayos de caracterización mecánica a tracción, flexión e impacto, de manera similar a la primera fase.

#### **4.3. Respecto a la optimización de resultados**

Se analizó la optimización de los resultados de la caracterización del material híbrido. Este análisis empezó por la tabulación e ingreso de datos en Minitab® Statistical Software versión 21.1. Posteriormente, se verificaron los supuestos paramétricos y, en caso de no cumplirse, se optó por una transformación de Box-Cox, como el caso del módulo de elasticidad a tracción ( $\lambda = 0$ ), del módulo de elasticidad a flexión ( $\lambda = 0,3$ ), de la deflexión ( $\lambda = 0,28$ ), por tomar de ejemplos. Con ello, se logró cumplir con este requerimiento.

Para el análisis de la varianza se revisó la significancia calculada (valor p), la misma que se encontró por debajo de la significancia predefinida ( $\alpha = 0,05$ ) para las propiedades mecánicas: esfuerzo máximo a tracción ( $< ,001$ ), módulo de elasticidad a tracción ( $< ,001$ ), elongación ( $< ,001$ ), esfuerzo máximo a flexión ( $< ,001$ ), módulo de elasticidad a flexión ( $< ,001$ ), deflexión ( $< ,001$ ), energía media de fallo ( $< ,001$ ). Este hallazgo evidencia la existencia de casos particularmente mejores, con lo que fue objetivo identificarlos.



Luego del análisis de la varianza, se efectuó la optimización individual y global de las propiedades mecánicas, con la ayuda de la función de deseabilidad. La optimización global permitió determinar la configuración de factores y niveles apropiados y óptimos para el mejor rendimiento del material aprovechando adecuadamente todas las propiedades evaluadas. Esta configuración es: orientación de la primera capa de fibra de chambira a 19,55 °, orientación de la segunda capa de fibra de chambira a 3,18 °, temperatura de secado de 120 °C, el tipo de fibra sintética es carbono y el tipo de moldeo por transferencia de resina por infusión. Las propiedades que se obtienen con la configuración antes descrita: esfuerzo máximo a la tracción de 118,01 MPa, módulo de elasticidad a la tracción de 22692,43 MPa, elongación de 2,15 %, esfuerzo máximo a la flexión de 71,19 MPa, módulo de elasticidad a la flexión de 12842,78 MPa, deflexión de 6,44 mm y energía media de fallo de 3,83 J.

#### **4.4. Respecto a la calidad del modelo**

Una de las ventajas de aplicar una metodología estadística fue la de evaluar la calidad del modelo generado por la aplicación del diseño de Box-Behnken. Es así como, en primera instancia, se tiene el coeficiente de determinación para los modelos individuales de cada una de las propiedades mecánicas evaluadas, que van del 65,19 % al 87,64 %.

Se tiene también el análisis en conjunto de las siete propiedades mecánicas, para el cual, el análisis de la función de deseabilidad cumple un rol fundamental. En este caso se tiene un coeficiente de determinación para el modelo, el cual explica el 90,51 % de la variabilidad de las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto del material híbrido de matriz epoxi reforzada con fibra sintética y natural de chambira. Además, se puede revisar que, los componentes en el modelo que producen mayores efectos sobre las propiedades mecánicas del compuesto híbrido son: el efecto cuadrático de la orientación de la segunda capa de fibra de chambira (50,86 % de la variabilidad), el efecto lineal del tipo de fibra sintética (14,02 % de la variabilidad), el efecto de la interacción entre el tipo de moldeo y el tipo de fibra sintética (12,10 % de la variabilidad) el efecto cuadrático de la temperatura (4,92 % de la variabilidad) y el efecto lineal del tipo de moldeo (3,94 % de la variabilidad).

## Referencias Bibliográficas

- [1] O. Faruk and M. S. Ain, "Biofiber reinforced polymer composites for structural applications," in *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering*, Elsevier, 2013, pp. 18–53. doi: 10.1533/9780857098955.1.18.
- [2] K. Friedrich and A. A. Almajid, "Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 20, no. 2, pp. 107–128, Apr. 2013, doi: 10.1007/s10443-012-9258-7.
- [3] S. Mazumdar, *Composites Manufacturing*. CRC Press, 2001. doi: 10.1201/9781420041989.
- [4] J. X. Liang and Y. T. Cai, "Application of Advanced Carbon Fiber Composite Material in Sport Equipments," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 217–219, no. 2nd International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering (ADME 2012), pp. 63–66, Nov. 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.217-219.63.
- [5] M. Moreira Arouche, S. Teixeira de Freitas, and S. de Barros, "On the influence of glass fiber mat on the mixed-mode fracture of composite-to-metal bonded joints," *Compos. Struct.*, vol. 256, p. 113109, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113109.
- [6] G. Ramakrishna, P. Kiran babu, K. Purushothaman, E. R. Sivakumar, and M. Sreenivasan, "An analysis on natural fiber composite materials," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, no. xxxx, pp. 6794–6799, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.767.
- [7] W. Miao, Z. Xin, Y. Qin, Y. Wang, and H. Chen, "Dynamic modeling of particle reinforced composites and its Charpy impact test verification," *Mater. Today Commun.*, vol. 30, p. 103040, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.103040>.
- [8] S. Srivastava and A. Tevatia, "Crack growth energetics to predict fatigue failures in particle-reinforced metal matrix composites (PRMMC)," *Int. J. Fatigue*, vol. 162, p. 106985, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106985>.
- [9] Gaurav, H. Gohal, V. Kumar, and H. Jena, "Study of natural fibre composite material and its hybridization techniques," *Mater. Today Proc.*, vol. 26, no. xxxx,

- pp. 1368–1372, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.277.
- [10] O. S. I. Fayomi, O. Okwilagwe, O. Agboola, S. O. Oyedepo, and A. P. I. Popoola, “Assessment of composite materials in advance application: A mini overview,” *Mater. Today Proc.*, vol. 38, no. xxxx, pp. 2402–2405, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.344.
- [11] C. Cerbu, H. Wang, M. F. Botis, Z. Huang, and C. Plescan, “Temperature effects on the mechanical properties of hybrid composites reinforced with vegetable and glass fibers,” *Mech. Mater.*, vol. 149, p. 103538, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103538>.
- [12] H. Hadiji *et al.*, “Damping analysis of nonwoven natural fibre-reinforced polypropylene composites used in automotive interior parts,” *Polym. Test.*, vol. 89, p. 106692, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106692>.
- [13] A. K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar, and R. Rimašauskiene, “Matrix materials used in composites: A comprehensive study,” *Mater. Today Proc.*, vol. 21, no. xxxx, pp. 1559–1562, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.086.
- [14] B. Cantor, F. P. E. Dunne, and I. C. Stone, Eds., *Metal and Ceramic Matrix Composites*. CRC Press, 2003. doi: 10.1201/9781420033977.
- [15] R. Liang and G. Hota, “Fiber-reinforced polymer (FRP) composites in environmental engineering applications,” in *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering*, Elsevier, 2013, pp. 410–468. doi: 10.1533/9780857098955.2.410.
- [16] H. J. Böhm and A. Rasool, “Effects of particle shape on the thermoelastoplastic behavior of particle reinforced composites,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 87, pp. 90–101, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2016.02.028.
- [17] S. Rani Borukati, B. Durga Prasad, and A. Ramesh, “Development and Charecterization of Natural Fiber /Carbon Fiber Reinforced Hybrid Composite Material,” *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 5394–5399, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.567.
- [18] F. M. AL-Oqla and M. S. Salit, “Material selection of natural fiber composites,” in *Materials Selection for Natural Fiber Composites*, Elsevier, 2017, pp. 107–168. doi: 10.1016/B978-0-08-100958-1.00005-0.

- [19] M. Ramesh, K. Palanikumar, and K. H. Reddy, "Comparative Evaluation on Properties of Hybrid Glass Fiber- Sisal/Jute Reinforced Epoxy Composites," *Procedia Eng.*, vol. 51, pp. 745–750, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.PROENG.2013.01.106.
- [20] F. M. AL-Oqla and S. M. Sapuan, "Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 66, pp. 347–354, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.10.050.
- [21] J. J. Gangloff, T. A. Cender, V. Eskizeybek, P. Simacek, and S. G. Advani, "Entrapment and venting of bubbles during vacuum bag prepreg processing," *J. Compos. Mater.*, vol. 51, no. 19, pp. 2757–2768, 2017, doi: 10.1177/0021998316676325.
- [22] B. Laxshaman Rao, Y. Makode, A. Tiwari, O. Dubey, S. Sharma, and V. Mishra, "Review on properties of banana fiber reinforced polymer composites," *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 2825–2829, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.558>.
- [23] J. Borah and N. Dutta, "Development and Properties Evaluation of Betel Nut Fibres Composite Material," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, Part 2, pp. 2229–2233, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.223>.
- [24] S. Krishnasamy *et al.*, "Recent advances in thermal properties of hybrid cellulosic fiber reinforced polymer composites," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 141, pp. 1–13, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.231>.
- [25] A. Karimah *et al.*, "A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 13, pp. 2442–2458, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.014>.
- [26] P. Manimaran, S. S. Saravanakumar, N. K. Mithun, and P. SenthamaraiKannan, "Physicochemical properties of new cellulosic fibers from the bark of *Acacia arabica*," *Int. J. Polym. Anal. Charact.*, vol. 21, no. 6, pp. 548–553, 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/1023666X.2016.1177699>.
- [27] G. Dorez, L. Ferry, R. Sonnier, A. Taguet, and J.-M. Lopez-Cuesta, "Effect of cellulose, hemicellulose and lignin contents on pyrolysis and combustion of

- natural fibers,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 107, pp. 323–331, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.03.017>.
- [28] J. Ahmad and Z. Zhou, “Mechanical Properties of Natural as well as Synthetic Fiber Reinforced Concrete: A Review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 333, p. 127353, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127353>.
- [29] C. G. Prabhakar, K. Anand Babu, P. S. Kataraki, and S. Reddy, “A review on natural fibers and mechanical properties of banyan and banana fibers composites,” *Mater. Today Proc.*, vol. 54, pp. 348–358, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.300>.
- [30] M. D. Pawar and R. Joshi, “Vibrational behaviour and mechanical properties of hybrid polymer matrix composites reinforced with natural fibres: A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 54, pp. 341–347, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.298>.
- [31] D. Jaiswal, G. L. Devnani, G. Rajeshkumar, M. R. Sanjay, and S. Siengchin, “Review on extraction, characterization, surface treatment and thermal degradation analysis of new cellulosic fibers as sustainable reinforcement in polymer composites,” *Curr. Res. Green Sustain. Chem.*, vol. 5, p. 100271, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100271>.
- [32] S. Shahinur and M. Hasan, “Natural Fiber and Synthetic Fiber Composites: Comparison of Properties, Performance, Cost and Environmental Benefits,” in *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, S. Hashmi and I. A. Choudhury, Eds. Oxford: Elsevier, 2020, pp. 794–802. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10994-4>.
- [33] R. A. Reddy, K. Yoganandam, and V. Mohanavel, “Effect of chemical treatment on natural fiber for use in fiber reinforced composites – Review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 33, pp. 2996–2999, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.982>.
- [34] D. Marczak, K. Lejcuś, J. Grzybowska-Pietras, W. Biniaś, I. Lejcuś, and J. Misiewicz, “Biodegradation of sustainable nonwovens used in water absorbing geocomposites supporting plants vegetation,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 26, p. e00235, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00235>.
- [35] A. Y. Al-Maharma, S. P. Patil, and B. Markert, “33 - Environmental impact analysis

- of plant fibers and their composites relative to their synthetic counterparts based on life cycle assessment approach,” in *Advances in Bio-Based Fiber*, S. M. Rangappa, M. Puttegowda, J. Parameswaranpillai, S. Siengchin, and S. Gorbatyuk, Eds. Woodhead Publishing, 2022, pp. 741–781. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824543-9.00022-0>.
- [36] R. Kumar, “Functionalities of ZnO reinforced thermoplastics composite materials: A state of the art review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 51, pp. 972–976, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.020>.
- [37] Y. Fang, L. Li, J.-B. Mawulé Dassekpo, and S.-H. Jang, “Heat transfer modelling of carbon nanotube reinforced composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 225, p. 109280, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109280>.
- [38] Y. Spiesschaert, C. Taplan, L. Stricker, M. Guerre, J. M. Winne, and F. E. Du Prez, “Influence of the polymer matrix on the viscoelastic behaviour of vitrimers” Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: 10.1039/d0py00114g,” *Polym. Chem.*, vol. 11, no. 33, pp. 5377–5385, 2020, doi: <https://doi.org/10.1039/d0py00114g>.
- [39] S. S. Al-Abbas *et al.*, “Influence of the polymer molecular weights on the electrical properties of Poly(vinyl alcohol) – Poly(ethylene glycols)/Graphene oxide nanocomposites,” *Mater. Today Proc.*, vol. 42, pp. 2469–2474, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.565>.
- [40] P. P. Kumar and M. Ruban, “Investigation on Mechanical Properties of Al5052/BN Metal Matrix Composite,” *Mater. Today Proc.*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.046>.
- [41] M. S. Mhaske and U. M. Shirsat, “An investigation of mechanical properties of aluminium based silicon carbide (AlSiC) metal matrix composite by different manufacturing methods,” *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 376–382, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.746>.
- [42] Y. Li, G. Yue, W. C. Tie, Q. Z. Zhu, and T. Yan, “Effect of different epoxide and hydroxyl ratios on the heat transport and melting points of graphene/paraffin,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 177, p. 121533, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121533>.

- [43] V. Dharini, S. Periyar Selvam, J. Jayaramudu, and R. Sadiku Emmanuel, "Functional properties of clay nanofillers used in the biopolymer-based composite films for active food packaging applications - Review," *Appl. Clay Sci.*, vol. 226, p. 106555, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106555>.
- [44] J. Li *et al.*, "Design and application of UHPC with high abrasion resistance," *Constr. Build. Mater.*, vol. 309, p. 125141, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125141>.
- [45] L. D. E. Pereira, M. P. Couto Neto, R. G. Pereira, and L. F. J. Schneider, "Influence of resin matrix on the rheology, translucency, and curing potential of experimental flowable composites for bulk-fill applications," *Dent. Mater.*, vol. 37, no. 6, pp. 1046–1053, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.03.003>.
- [46] X. Zhao *et al.*, "Recycling of natural fiber composites: Challenges and opportunities," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 177, p. 105962, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105962>.
- [47] A. Afzal, Z. Khaliq, S. Ahmad, F. Ahmad, A. Noor, and M. B. Qadir, "Development and characterization of biodegradable composite film," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 23, p. 101664, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101664>.
- [48] G. Ramanan, R. D. Akshatha, A. U. Manvi, B. A. Suhas, and D. K. Pruthvi, "Investigation of bio degradable natural fibers reinforced hybrid composites for aircraft structures," *Mater. Today Proc.*, vol. 52, pp. 1211–1215, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.039>.
- [49] N. KETATA, B. SEANTIER, N. GUERMAZI, and Y. GROHENS, "On the development of a green composites based on poly (lactic acid)/poly (butylene succinate) blend matrix reinforced by long flax fibers," *Mater. Today Proc.*, vol. 52, pp. 95–103, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.493>.
- [50] K. G. Melese, T. P. Naik, S. Gairola, and I. Singh, "2 - Joining techniques for polymer matrix composites," in *Joining Processes for Dissimilar and Advanced Materials*, P. Rakesh and J. P. Davim, Eds. Woodhead Publishing, 2022, pp. 11–32. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85399-6.00001-1>.
- [51] M. Akhshik, S. Panthapulakkal, J. Tjong, and M. Sain, "Life cycle assessment and

- cost analysis of hybrid fiber-reinforced engine beauty cover in comparison with glass fiber-reinforced counterpart," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 65, pp. 111–117, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.04.005>.
- [52] Y. Su, X. Zhang, D. Jing, and S. Zhang, "Effect of surface functionalization on the surface and inter-facial properties of thermoplastic-coated carbon fibers," *New Carbon Mater.*, vol. 36, no. 6, pp. 1169–1176, 2021, doi: [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(21\)60049-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(21)60049-5).
- [53] N. Preda *et al.*, "Functionalization of basalt fibers with ZnO nanostructures by electroless deposition for improving the interfacial adhesion of basalt fibers/epoxy resin composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 149, p. 106488, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106488>.
- [54] R.-S. Lin, Y. Han, and X.-Y. Wang, "Experimental study on optimum proportioning of Portland cements, limestone, metakaolin, and fly ash for obtaining quaternary cementitious composites," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, p. e00691, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00691>.
- [55] S. Licht, X. Liu, G. Licht, X. Wang, A. Swesi, and Y. Chan, "Amplified CO<sub>2</sub> reduction of greenhouse gas emissions with C<sub>2</sub>CNT carbon nanotube composites," *Mater. Today Sustain.*, vol. 6, p. 100023, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100023>.
- [56] N. A. Ramlee, J. Naveen, and M. Jawaaid, "Potential of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) and sugarcane bagasse fibers for thermal insulation application – A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 271, p. 121519, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121519>.
- [57] S. Islam and G. Bhat, "Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles," *J. Environ. Manage.*, vol. 251, p. 109536, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109536>.
- [58] B. Muralidhara, S. P. Kumaresh Babu, and B. Suresha, "Utilizing vacuum bagging process to prepare carbon fiber/epoxy composites with improved mechanical properties," *Mater. Today Proc.*, vol. 27, no. xxxx, pp. 2022–2028, 2019, doi: [10.1016/j.matpr.2019.09.051](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.051).
- [59] M. Wu, Y. Chen, G. Yu, Y. Gao, and M. Tong, "Investigations on the axial cutting



- force during drilling of carbon fiber composite material," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 232, no. 13, pp. 2430–2436, 2018, doi: 10.1177/0954405417690569.
- [60] S. Sharma, P. Sudhakara, S. Nijjar, S. Saini, and G. Singh, "Recent Progress of Composite Materials in various Novel Engineering Applications," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 14, pp. 28195–28202, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.063.
- [61] G. R. Kalagi, R. Patil, and N. Nayak, "Experimental Study on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composite Materials for Wind Turbine Blades," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 2588–2596, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.043.
- [62] S. Kumar, R. Purohit, and M. M. Malik, "Properties and Applications of Polymer Matrix Nano Composite Materials," *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4, pp. 3704–3711, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.148>.
- [63] S. Nayak, D. K. Jesthi, S. Saroj, and J. Sadarang, "Assessment of impact and hardness property of natural fiber and glass fiber hybrid polymer composite," *Mater. Today Proc.*, vol. 49, no. xxxx, pp. 497–501, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.079.
- [64] D. K. Jesthi and R. K. Nayak, "Influence of glass/carbon fiber stacking sequence on mechanical and three-body abrasive wear resistance of hybrid composites," *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 1, 2020, doi: 10.1088/2053-1591/ab6919.
- [65] V. Popineau, A. Céline, M. Le Gall, L. Martineau, C. Baley, and A. Le Duigou, "Vacuum-Bag-Only (VBO) Molding of Flax Fiber-reinforced Thermoplastic Composites for Naval Shipyards," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 28, no. 3, pp. 791–808, 2021, doi: 10.1007/s10443-021-09890-2.
- [66] M. Z. Rahman, K. Jayaraman, and B. R. Mace, "Vibration damping of flax fibre-reinforced polypropylene composites," *Fibers Polym.*, vol. 18, no. 11, pp. 2187–2195, 2017, doi: 10.1007/s12221-017-7418-y.
- [67] S. A. Setyabudi, M. A. Choiron, and A. Purnowidodo, "Effect of angle orientation lay-up on uniaxial tensile test specimen of Fiber carbon composite manufactured by using resin transfer moulding with vacuum bagging," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 494, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/494/1/012020.

- [68] H. Singh and G. S. Brar, "Characterization and Investigation of Mechanical Properties of Composite Materials used for Leaf Spring," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 5857–5863, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.183.
- [69] S. Prabhakaran, V. Krishnaraj, K. Shankar, M. Senthilkumar, and R. Zitoune, "Experimental investigation on impact, sound, and vibration response of natural-based composite sandwich made of flax and agglomerated cork," *J. Compos. Mater.*, vol. 54, no. 5, pp. 669–680, 2020, doi: 10.1177/0021998319871354.
- [70] D. K. Rajak, D. D. Pagar, R. Kumar, and C. I. Pruncu, "Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 6354–6374, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.09.068.
- [71] T. Gajjar, D. B. Shah, S. J. Joshi, and K. M. Patel, "Analysis of process parameters for composites manufacturing using vacuum infusion process," *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 1244–1249, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.112.
- [72] A. Levy and P. Hubert, "Vacuum-bagged composite laminate forming processes: Predicting thickness deviation in complex shapes," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 126, no. April, p. 105568, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105568.
- [73] Y. Ma, T. Centea, and S. R. Nutt, "Defect reduction strategies for the manufacture of contoured laminates using vacuum BAG-only prepregs," *Polym. Compos.*, vol. 38, no. 9, pp. 2016–2025, Sep. 2017, doi: 10.1002/pc.23773.
- [74] J. M. Maguire, K. Nayak, and C. M. Ó Brádaigh, "Novel epoxy powder for manufacturing thick-section composite parts under vacuum-bag-only conditions. Part II: Experimental validation and process investigations," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 136, no. April, p. 105970, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105970.
- [75] X. Y. Wei, J. Xiong, J. Wang, and W. Xu, "New advances in fiber-reinforced composite honeycomb materials," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 63, no. 8, pp. 1348–1370, 2020, doi: 10.1007/s11431-020-1650-9.
- [76] R. V. S. Reddy, D. Mohana Krishnudu, P. Rajendra Prasad, and P. V. Reddy, "Alkali Treatment Influence on Characterization of *Setaria Italic* (Foxtail Millet) Fiber

- Reinforced Polymer Composites Using Vacuum Bagging,” *J. Nat. Fibers*, vol. 00, no. 00, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1080/15440478.2020.1788494.
- [77] A. R. Chambers, J. S. Earl, C. A. Squires, and M. A. Suhot, “The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fibre composites developed for wind turbine applications,” *Int. J. Fatigue*, vol. 28, no. 10 SPEC. ISS., pp. 1389–1398, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.02.033.
- [78] L. K. Grunenfelder, A. Dills, T. Centea, and S. Nutt, “Effect of prepreg format on defect control in out-of-autoclave processing,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 93, pp. 88–99, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.10.027.
- [79] D. Zhang, D. Heider, and J. W. Gillespie, “Design and optimization of oven vacuum bag (OVB) processing for void air removal in high-performance thermoplastic composites,” *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 2020, doi: 10.1177/0892705720978248.
- [80] S. Y. Park, C. H. Choi, W. J. Choi, and S. S. Hwang, “A Comparison of the Properties of Carbon Fiber Epoxy Composites Produced by Non-autoclave with Vacuum Bag Only Prepreg and Autoclave Process,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 187–204, 2019, doi: 10.1007/s10443-018-9688-y.
- [81] M. Akif Yalcinkaya, G. E. Guloglu, M. Pishvar, M. Amirkhosravi, E. Murat Sozer, and M. Cengiz Altan, “Pressurized Infusion: A New and Improved Liquid Composite Molding Process,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 141, no. 1, Oct. 2018, doi: 10.1115/1.4041569.
- [82] S. Anilkumar, K. Arumugam, V. R. Mutyala, K. Kodanda Ram, and T. S. Krishna Kumar, “Investigation on mechanical properties of natural fiber-polymer composite materials,” *Mater. Today Proc.*, vol. 45, no. xxxx, pp. 6149–6153, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.466.
- [83] R. Jeyapragash, V. Srinivasan, and S. Sathiyamurthy, “Mechanical properties of natural fiber/particulate reinforced epoxy composites - A review of the literature,” in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2020, vol. 22, pp. 1223–1227. doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.146.
- [84] C. Nagaraj, D. Mishra, and J. Durga Prasad Reddy, “Estimation of tensile properties of fabricated multi layered natural jute fiber reinforced E-glass composite

- material,” *Mater. Today Proc.*, vol. 27, no. xxxx, pp. 1443–1448, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.864.
- [85] G. R. Arpitha, M. R. Sanjay, P. SenthamaraiKannan, C. Barile, and B. Yogesha, “Hybridization effect of sisal/glass/epoxy/filler based woven fabric reinforced composites,” *Exp. Tech.*, vol. 41, no. 6, pp. 577–584, 2017, doi: 10.1007/s40799-017-0203-4.
- [86] S. Vivek, K. Kanthavel, A. Torris, and V. Kavimani, “Effect of Bio-filler on Hybrid Sisal-Banana-Kenaf-Flax Based Epoxy Composites: A Statistical Correlation on Flexural Strength,” *J. Bionic Eng.*, vol. 17, no. 6, pp. 1263–1271, 2020, doi: 10.1007/s42235-020-0083-7.
- [87] F. Giglio and G. Savoja, “Vegetable Fibers for Composite Materials in Constructive Sector,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 225, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/225/1/012259.
- [88] S. Jambari, M. Y. Yahya, M. R. Abdullah, and M. Jawaid, “Woven Kenaf/Kevlar Hybrid Yarn as potential fiber reinforced for anti-ballistic composite material,” *Fibers Polym.*, vol. 18, no. 3, pp. 563–568, 2017, doi: 10.1007/s12221-017-6950-0.
- [89] Y. Kahraman and H. O. Ozturk, “Effects of glass fiber reinforcement on mechanical properties of composite frame materials,” *Emerg. Mater. Res.*, vol. 9, no. 3, pp. 805–811, 2020, doi: 10.1680/jemmr.20.00119.
- [90] P. Yukhymets, R. I. Dmytriienko, I. Ramadan, and S. N. Bukharov, “Experimental Characterization of Composite Material Properties,” pp. 227–237, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-56579-8\_15.
- [91] U. Zaheer, U. Zulfiqar, A. A. Khurram, and T. Subhani, “Improving the performance of conventional glass fiber epoxy matrix composites by incorporating nanodiamonds,” *Compos. Interfaces*, vol. 25, no. 11, pp. 1005–1018, 2018, doi: 10.1080/09276440.2018.1454145.
- [92] J. G. Paredes Salinas and V. D. Silva Barrionuevo, “Análisis de la réplica del material compuesto alternativo de matriz epoxi reforzada con fibras sintéticas para determinar las propiedades mecánicas en las superficies de vuelo en las aeronaves del CID-FAE,” 2020.

- [93] M. Sepe, "Temperatura de flexión por calor, parte 4: retos del análisis mecánico dinámico para medir propiedades de materiales," *Plast. Technol. México*, 2020, [Online]. Available: <https://www.pt-mexico.com/columnas/parte-4-temperatura-de-flexion-por-calor-vs-analisis-mecanico-dinamico>
- [94] I. Khurana, C. Pratap, S. Singh, A. Bansal, and R. Butola, "Experimental analysis of different GSM of glass fibre using dynamic mechanical analysis," *Mater. Today Proc.*, vol. 25, pp. 946–951, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.332.
- [95] M. K. Gupta and R. Singh, "Flexural and Dynamic Mechanical Analysis (DMA) of Polylactic Acid (PLA) Coated Sisal Fibre Reinforced Polyester Composite," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 6109–6114, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.216.
- [96] P. Prabhu, B. Karthikeyan, R. Ravi Raja Malar Vannan, and A. Balaji, "Dynamic mechanical analysis of Silk and Glass (S/G/S)/Pineapple and Glass (P/G/P)/Flax and Glass (F/G/F) reinforced *Lannea coromandelica* blender hybrid nano composites," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 15, pp. 2484–2496, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.09.068.
- [97] B. Taye Wondmagegnehu, V. Paramasivam, and S. K. Selvaraj, "Fabricated and analyzed the mechanical properties of textile waste/glass fiber hybrid composite material," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 7297–7303, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.984>.
- [98] G. Kastratović, A. Grbović, A. Sedmak, Ž. Božić, and S. Sedmak, "Composite material selection for aircraft structures based on experimental and numerical evaluation of mechanical properties," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 31, pp. 127–133, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.021>.
- [99] T. Batu and H. G. Lemu, "Investigation of mechanical properties of false banana/glass fiber reinforced hybrid composite materials," *Results Mater.*, vol. 8, p. 100152, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100152>.
- [100] D. S. Choudhari and V. J. Kakhandki, "Comprehensive study and analysis of mechanical properties of chopped carbon fibre reinforced nylon 66 composite materials," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 4596–4601, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.828>.

- [101] N. R. Yeole and V. Parthasarthy, "Design of experiments (DOE) for adsorptive desulfurization (ADS) of liquid fuels – A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 57, pp. 1613–1618, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.230>.
- [102] B. C. Y. Lee, M. S. Mahtab, T. H. Neo, I. H. Farooqi, and A. Khursheed, "A comprehensive review of Design of experiment (DOE) for water and wastewater treatment application - Key concepts, methodology and contextualized application," *J. Water Process Eng.*, vol. 47, p. 102673, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102673>.
- [103] V. B. Magdum, J. K. Kittur, and S. C. Kulkarni, "Surface roughness optimization in laser machining of stainless steel 304 using response surface methodology," *Mater. Today Proc.*, vol. 59, pp. 540–546, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.570>.
- [104] A. Abraham Eben Andrews, J. Jensin Joshua, G. Ravikumar Solomon, B. Gokul, and K. Srinath, "Optimizing machining parameters of carbon steel EN24 to minimize surface roughness and tool wear," *Mater. Today Proc.*, vol. 33, pp. 3902–3906, 2020, doi: [10.1016/j.matpr.2020.06.246](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.246).
- [105] D. K. Yadav, N. K. Dixit, D. Agarwal, and S. K. Khare, "Optimization of surface roughness by design of experiment techniques during CNC milling machining," *Mater. Today Proc.*, vol. 52, pp. 1919–1923, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.565>.
- [106] H. Gopinath and M. Shivashankar, "A Design of experiments Approach to Assess the Effect of Formulation and Process Variables on the Extrusion and Spheronization of abhrak bhasma Loaded spheroids," *Mater. Today Proc.*, vol. 15, pp. 238–246, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.196>.
- [107] G. Xiao and Z. Zhu, "Friction materials development by using DOE/RSM and artificial neural network," *Tribol. Int.*, vol. 43, no. 1, pp. 218–227, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.05.019>.
- [108] H. Gutierrez Pulido and R. De la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, Tercera Ed. México: McGRAW-HILL, 2012.
- [109] M. V. Krishna, G. B. Narasimha, N. Rajesh, and A. M. Xavior, "Optimization of Influential Parameters on Mechanical Behaviour of AlMg1 SiCu Hybrid Metal

- Matrix Composites using Taguchi Integrated Fuzzy Approach,” *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4, pp. 1464–1468, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.071>.
- [110] T. Odiaka, S. A. Akinlabi, N. Madushele, O. S. Fatoba, S. Hassan, and E. T. Akinlabi, “Statistical analysis of the effect of welding parameters on the tensile strength of titanium reinforced mild steel joints using taguchi’s DoE,” *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 1202–1206, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.240>.
- [111] G. Koronis, A. Silva, and S. Foong, “Predicting the flexural performance of woven flax reinforced epoxy composites using design of experiments,” *Mater. Today Commun.*, vol. 13, pp. 317–324, 2017, doi: [10.1016/j.mtcomm.2017.10.019](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.10.019).
- [112] C. Zhang *et al.*, “A new design of experiment method for model parametrisation of lithium ion battery,” *J. Energy Storage*, vol. 50, p. 104301, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104301>.
- [113] P. Ravichandran, C. Anbu, B. Meenakshipriya, and S. Sathiyavathi, “Process parameter optimization and performance comparison of AISI 430 and AISI 1018 in resistance spot welding process,” *Mater. Today Proc.*, vol. 33, pp. 3389–3393, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.197>.
- [114] R. S. Rana, R. Purohit, P. M. Mishra, P. Sahu, and S. Dwivedi, “Optimization of Mechanical Properties of AA 5083 Nano SiC Composites using Design of Experiment Technique,” *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, Part A, pp. 3882–3890, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.287>.
- [115] K. Y. Benyounis, *Procedure of Conducting an Experiment Using Response Surface Methodology for Manufacturing Process Modelling and Optimization*. Elsevier Ltd., 2019. doi: [10.1016/b978-0-12-803581-8.11594-2](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11594-2).
- [116] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons, 2017.
- [117] T. F. Guimarães, A. D. Lanchote, J. S. da Costa, A. L. Viçosa, and L. A. P. de Freitas, “A multivariate approach applied to quality on particle engineering of spray-dried mannitol,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 1094–1101, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2015.05.004>.
- [118] D. Sinkhonde, R. O. Onchiri, W. O. Oyawa, and J. N. Mwero, “Response surface methodology-based optimisation of cost and compressive strength of rubberised

- concrete incorporating burnt clay brick powder,” *Heliyon*, vol. 7, no. 12, p. e08565, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08565>.
- [119] K. Y. Benyounis and A. G. Olabi, “Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches – A reference guide,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 39, no. 6, pp. 483–496, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2007.03.012>.
- [120] A. Alaswad, K. Y. Benyounis, and A. G. Olabi, “Optimization Techniques in Material Processing,” in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04004-2>.
- [121] A. Jaisingh Sheoran and H. Kumar, “Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research,” *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 1659–1672, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.296>.
- [122] K. J. Narayana and R. Gupta Burela, “A review of recent research on multifunctional composite materials and structures with their applications,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 5580–5590, 2018, doi: [10.1016/j.matpr.2017.12.149](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.149).
- [123] E. Kadum Njim, S. H. Bakhy, and M. Al-Waily, “Optimization design of vibration characterizations for functionally graded porous metal sandwich plate structure,” *Mater. Today Proc.*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.235>.
- [124] A. Arectout *et al.*, “Optimization of the n-type HPGe detector parameters using the ‘design of experiments’ technique,” *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 189, p. 109733, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109733>.
- [125] S. Kulothungan, P. Lakshmanan, P. Krishnan, S. Palani, and A. Arumugam, “Assessment of factors influencing the transfer efficiency in electrostatic spray coating process,” *Mater. Today Proc.*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.283>.
- [126] R. M. Di Benedetto, G. F. Gomes, A. Janotti, A. C. A. Junior, and E. C. Botelho, “Statistical approach to optimize crashworthiness of thermoplastic commingled composites,” *Mater. Today Commun.*, vol. 31, p. 103651, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103651>.



- [127] M. A. Munawar *et al.*, “Investigation of functional, physical, mechanical and thermal properties of TiO<sub>2</sub> embedded polyester hybrid composites: A design of experiment (DoE) study,” *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, vol. 28, no. 3, pp. 266–274, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2017.12.005>.
- [128] H. Hanizam, M. S. Salleh, M. Z. Omar, and A. B. Sulong, “Optimisation of mechanical stir casting parameters for fabrication of carbon nanotubes–aluminium alloy composite through Taguchi method,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 2223–2231, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.02.008>.
- [129] A. R. Kafshgar, S. Rostami, M. R. M. Aliha, and F. Berto, “Optimization of Properties for 3D Printed PLA Material Using Taguchi, ANOVA and Multi-Objective Methodologies,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 34, pp. 71–77, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.011>.
- [130] J. Paredes, H. Vaca, H. Erazo, and C. Pérez, “Multi-response optimization of mechanical properties of hybrid (fiberglass / abaca woven) in polyester matrix using desirability function based on DOE,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 473, no. 1, 2019, doi: [10.1088/1757-899X/473/1/012020](https://doi.org/10.1088/1757-899X/473/1/012020).
- [131] C. J. Slebi-Acevedo, J. C. Ruge-Cárdenas, and D. Castro-Fresno, “An integrated DoE – Stochastic multi criteria decision-making analysis applied for experimental evaluation of fiber reinforced porous asphalt mixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 255, p. 119330, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119330>.
- [132] N. Feito, A. Muñoz-Sánchez, A. Díaz-Álvarez, and M. H. Miguelez, “Multi-objective optimization analysis of cutting parameters when drilling composite materials with special geometry drills,” *Compos. Struct.*, vol. 225, p. 111187, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111187>.
- [133] B. Singh, R. Kumar, and J. Singh Chohan, “Multi-objective optimization of 3D Printing process using genetic algorithm for fabrication of copper reinforced ABS parts,” *Mater. Today Proc.*, vol. 48, pp. 981–988, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.264>.
- [134] S. R. Rao, R. K. Mandava, and V. R. K. Rao, “Multi-objective optimization in turning of Al 7075-SiC composites using desirability analysis,” *Mater. Today Proc.*, vol. 56, pp. 1281–1289, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.256>.

- [135] M. Moradi, H. Arabi, and M. Shamsborhan, "Multi-objective optimization of high power diode laser surface hardening process of AISI 410 by means of RSM and desirability approach," *Optik (Stuttg).*, vol. 202, p. 163619, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163619>.
- [136] I. Abdulkadir, B. S. Mohammed, M. S. Liew, and M. M. A. Wahab, "Modelling and multi-objective optimization of the fresh and mechanical properties of self-compacting high volume fly ash ECC (HVFA-ECC) using response surface methodology (RSM)," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 14, p. e00525, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00525>.
- [137] P. Juan, S. Vinicio, V. Henry, E. Víctor, and A. Cesar, "Factorial approach for multiple optimization of mechanical properties of alternative composite material for manufacture/repair flight surfaces (WING TIP - FAIRING ASSY)/CIDFAE," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 4757–4761, 2021, doi: [10.1016/j.matpr.2020.11.256](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.256).
- [138] S. C. Das *et al.*, "Effect of stacking sequence on the performance of hybrid natural/synthetic fiber reinforced polymer composite laminates," *Compos. Struct.*, vol. 276, no. April, p. 114525, 2021, doi: [10.1016/j.compstruct.2021.114525](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114525).