

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

Análisis estadístico vía lenguaje Python del nivel de significancia de los valores de resistencia a la tracción, flexión y térmica para diferentes niveles de relleno de escoria de acería, tipo y contenido de refuerzo de fibras de maguey y chambira en la preparación de materiales compuestos a base de resina epoxi

Para obtener el título profesional de Ingeniero Metalurgista

Elaborado por

Percy Jhoan Mantilla Matta

 [0009-0004-8298-7415](https://orcid.org/0009-0004-8298-7415)

Asesor

Dra. Mery Cecilia Gómez Marroquín

 [0000-0003-3722-5708](https://orcid.org/0000-0003-3722-5708)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Mantilla Matta [1]
Referencia/Reference	[1] P. Mantilla Matta, “Análisis estadístico vía lenguaje Python del nivel de significancia de los valores de resistencia a la tracción, flexión y térmica para diferentes niveles de relleno de escoria de acería, tipo y contenido de refuerzo de fibras de maguey y chambira en la preparación de materiales compuestos a base de resina epoxi” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Mantilla, 2025)
Referencia/Reference	Mantilla, P. (2025). <i>Análisis estadístico vía lenguaje Python del nivel de significancia de los valores de resistencia a la tracción, flexión y térmica para diferentes niveles de relleno de escoria de acería, tipo y contenido de refuerzo de fibras de maguey y chambira en la preparación de materiales compuestos a base de resina epoxi</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mis padres, Percy Mantilla y Gloria Matta, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y dedicación, por su amor incondicional y por enseñarme que con perseverancia y determinación todo es posible.

Agradecimientos

Al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería por la subvención otorgada al proyecto de investigación formativa regular UNI 2024 (FIGMM-PF-25-2024) titulado: “Desarrollo de materiales compuestos de matriz polimérica con relleno de escoria de acería y refuerzo de fibras naturales de maguey y/o chambira para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas, visando su uso como protectores solares y separadores de ambientes en laboratorios” y el proyecto de investigación docentes FIGMM 2024, denominado: “Evaluación de propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz de poliéster reforzados con fibra de vidrio y/o maguey para aplicación en la industria automotriz” sin los cuales este trabajo no se hubiera podido iniciar ni culminar exitosamente.

A mi asesora, lideresa del Grupo de Investigación Siderurgia (Ironmaking and Steel making Research Group-laSMarg) y jefa del Laboratorio de Hornos y Combustibles FIGMM UNI, la Dra. Ing. Mery Cecilia Gómez Marroquín por la oportunidad de pertenecer a este grupo de trabajo, su apoyo incondicional en la conducción de las experiencias y la redacción final de mi tesis de ingeniero metalurgista.

A los miembros del Jurado Evaluador por sus acertadas observaciones y recomendaciones en la mejora de la presentación de esta tesis de ingeniero metalurgista.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería, por sus enseñanzas y conocimientos impartidos.

A mis colegas tesisistas, egresados, practicantes y estudiantes, también miembros de los proyectos de investigación involucrados: Kenny Salazar, Víctor Malaspina, Jonathan Ocares, Sandy Laveriano, Stephanie Mendoza, Valeria Olivera, Jeandet Cusihuaman, Williams Santamaría, Gerson Valderrama, Alexander Vásquez, Beto Ugarte, Christian Pérez, Héctor Cama, Renzo Zulueta, Antony Reyes, Jordy Alejo, Francis Cabrejos, Juan Gonzales, etc. por toda la ayuda proporcionada en la parte experimental de los proyectos en mención.

Resumen

La investigación sobre el reaprovechamiento alternativo del uso de fibras naturales maguey y chambira en materiales compuestos de matriz polimérica ha adquirido cada vez más importancia. Asimismo, el uso de escorias de acerías para relleno de matriz polimérica ha traído consigo un beneficio para la industria siderúrgica debido a que promueve la reutilización de sus residuos generados. Para la preparación de materiales compuestos, se eligió la técnica de laminación manual, seguidamente, se llevó a cabo la selección, preparación y caracterización completa de las materias primas (néctar y fibras de maguey, y fibra de chambira, escoria de acería y dos tipos de cascarillas de acero). Entre las principales técnicas de caracterización utilizadas se encuentran EFRX, EAAF, DRX, TGA-DTA, FTIR y MEB/SEM. El trabajo se inició con el establecimiento de un diseño de experimentos para evaluar el efecto individual y de sinergia múltiple de tres variables independientes, usando el método ANOVA, entre ellas: X_1 : Relleno de escoria de acería (0 y 5 %), X_2 : Tipo de refuerzo (fibra maguey o chambira) y X_3 : contenido de refuerzo (0, 5, 7.5 y 10 %) sobre las variables dependientes: Y_1 : resistencia a la tracción, Y_2 : resistencia a la flexión e Y_3 : resistencia térmica (análisis termogravimétrico DTG y TGA). La contrastación de la hipótesis general mostró que la variación en el porcentaje de relleno de escoria de acería, el tipo y contenido de refuerzo influyeron en las propiedades mecánicas del material, sin embargo, la mejora no fue uniforme en todas las condiciones evaluadas. En cuanto a las hipótesis específicas, la incorporación de un 5 % de escoria de acería no mostró una mejora significativa en la resistencia a la tracción en comparación con la muestra sin escoria, pues esta disminuyó de 45 a 35 MPa. No obstante, su presencia en combinación con fibras naturales permitió incrementar la resistencia a la flexión, destacando la fibra de chambira al 10 % de contenido de refuerzo y con 5 % de escoria de acería, con la mayor resistencia registrada de 66 MPa, lo que indicó que su uso fue beneficioso. Por otra parte, la influencia de fibras naturales en la matriz polimérica fue variable. Con un 5 % de fibra de chambira y maguey la resistencia a la tracción fue de 26

y 14 MPa, respectivamente. A pesar de ello, a mayores concentraciones de refuerzo (≥ 7.5 %), se observó una recuperación. En flexión, la ausencia de refuerzo mostró la menor resistencia (45 MPa), mientras que un mayor contenido de refuerzo mejoró los resultados, para 10 % de refuerzo de tanto fibra de maguey como fibra de chambira, la resistencia a la flexión alcanzó un 52 y 66 MPa, respectivamente. Este hallazgo indicó que el uso de este refuerzo mejoró la rigidez estructural del material, en consecuencia, un mayor contenido de refuerzo no siempre se traduce en un aumento lineal de la resistencia a la flexión, lo que se propone que la dispersión y adherencia de las fibras dentro de la matriz juegan un papel importante. En relación con la resistencia térmica, materiales compuestos E1 al E8, observaron valores muy similares de picos de descomposición térmica (entre 365.85 y 370.74 °C), sin embargo, los correspondientes a las fibras de maguey y chambira expresaron valores 315.70 y 334.13 °C, respectivamente. En el caso de las pérdidas totales de peso, las experiencias E1 al E8 fluctuaron entre 93 y 98 %, mientras que las fibras de maguey y chambira mostraron 88 y 95 % vía DTG, y 93.04 y 90.87 % vía análisis de proximidad. Si bien existen indicios de que el tipo de refuerzo de fibra chambira y maguey podría influir en la resistencia térmica, la falta de significancia global en los modelos de regresión lineal múltiple y análisis de varianza (ANOVA) no permitió establecer una relación concluyente entre las variables independientes y las variables dependiente.

Palabras clave — Fibra de maguey, fibra de chambira, epoxi modificado con escoria, análisis de varianza ANOVA, resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, resistencia térmica.

Abstract

The research on the alternative reuse of natural fibers from maguey and chambira in polymer matrix composites has gained increasing importance. Similarly, the use of steel mill slags as a filler for polymer matrices has brought benefits to the steel industry by promoting the reutilization of its generated waste. For the preparation of composite materials, the hand lay-up technique was chosen, followed by the selection, preparation, and complete characterization of raw materials (maguey nectar and fibers, chambira fiber, steel mill slag, and two types of steel scale). The main characterization techniques used include XRF, AAS, XRD, TGA-DTA, FTIR, and SEM. The study began with the establishment of an experimental design to evaluate both the individual and multiple synergistic effects of three independent variables using the ANOVA method: X_1 : steel mill slag filler (0 and 5 %), X_2 : type of reinforcement (maguey or chambira fiber), and X_3 : reinforcement content (0, 5, 7.5, and 10 %) on the dependent variables: Y_1 : tensile strength, Y_2 : flexural strength, and Y_3 : thermal resistance (thermogravimetric analysis - DTG & TGA). The validation of the general hypothesis showed that variations in the percentage of steel mill slag filler, as well as the type and content of reinforcement, influenced the mechanical properties of the material. However, the improvements were not uniform across all evaluated conditions. Regarding the specific hypotheses, incorporating 5 % steel mill slag did not significantly improve tensile strength compared to the sample without slag, as it decreased from 45 to 35 MPa. Nevertheless, its presence in combination with natural fibers increased flexural strength, with chambira fiber at 10 % reinforcement content and 5 % steel mill slag achieving the highest recorded strength of 66 MPa, indicating that its use was beneficial. On the other hand, the influence of natural fibers in the polymer matrix was variable. With 5 % chambira and maguey fiber, the tensile strength was 26 and 14 MPa, respectively. However, at higher reinforcement concentrations (≥ 7.5 %), a recovery was observed. In flexural strength, the absence of reinforcement resulted in the lowest resistance (45 MPa), whereas higher reinforcement content improved the results. At 10 %

reinforcement content, both maguey and chambira fibers reached flexural strengths of 52 and 66 MPa, respectively. This finding indicated that the use of these reinforcements improved the structural rigidity of the material. Consequently, a higher reinforcement content does not always lead to a linear increase in flexural strength, suggesting that fiber dispersion and adhesion within the matrix play a crucial role. In terms of thermal resistance, composite materials E1 to E8 exhibited very similar thermal decomposition peak values (ranging between 365.85 °C and 370.74 °C). However, the corresponding values for maguey and chambira fibers were 315.70 °C and 334.13 °C, respectively. Regarding total weight loss, experiences E1 to E8 fluctuated between 93 and 98 %, while maguey and chambira fibers showed 88 and 95 % via DTG and 93.04 and 90.87 % via proximate analysis. Although there are indications that the type of reinforcement (chambira and maguey fibers) may influence thermal resistance, the lack of overall significance in the multiple linear regression models and ANOVA did not allow for a conclusive relationship to be established between the independent variables and the dependent variables.

Keywords — Maguey fiber, chambira fiber, epoxy modified with slag, ANOVA variance analysis, tensile strength, flexural strength, thermal resistance.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract.	vii
Introducción	xxi
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Antecedentes referenciales	1
1.2 Planteamiento de la realidad problemática	8
1.3 Problemas	10
1.3.1 Problema general	10
1.3.2 Problemas específicos	10
1.4 Objetivos	10
1.4.1 Objetivo General	10
1.4.2 Objetivos Específicos	11
1.5 Hipótesis	11
1.5.1 Hipótesis general	11
1.5.2 Hipótesis específicas	11
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual	13
2.1 Marco teórico	13
2.1.1 Materiales compuestos o composites	13
2.1.2 Refuerzos de fibras	13
2.1.3 Resinas o polímeros termoestables	17
2.1.4 Relleno para modificación de resinas	19
2.1.5 Fases de los materiales compuestos	20
2.1.6 Clasificación de los materiales híbridos	23
2.1.7 Fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica	25
2.1.8 Métodos de fabricación de materiales compuestos	27
2.1.9 Determinación de las propiedades mecánicas	30

2.1.10	Tipos de ensayos mecánicos	31
2.2	Marco conceptual.....	32
2.2.1	Materiales compuestos	32
2.2.2	Materiales híbridos.....	32
2.2.3	Fibras.....	33
2.2.4	Resinas.....	39
2.2.5	Residuos siderúrgicos.....	41
2.2.6	Ensayos mecánicos	44
2.2.7	Métricas de evaluación de modelos estadísticos.....	44
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		46
3.1	Colecta de las materias primas	46
3.2	Procesamiento de las materias primas.....	46
3.2.1	Maguey y fibras de Chambira.....	46
3.2.2	Escorias de acería	48
3.2.3	Cascarilla de acero	50
3.3	Determinación de propiedades físicas de las materias primas	51
3.3.1	Cálculo de la densidad real	51
3.3.2	Cálculo de la densidad aparente	51
3.3.3	Cálculo de la porosidad.....	52
3.4	Análisis de proximidad o inmediato de carbones.....	52
3.4.1	Determinación de la humedad.....	52
3.4.2	Determinación de material volátil	53
3.4.3	Determinación de cenizas	53
3.4.4	Determinación del carbón fijo.....	54
3.5	Caracterización de las materias primas.....	55
3.5.1	Néctar o sumo de Maguey	55
3.5.2	Fibras de Maguey y Chambira	55
3.5.3	Escorias de acería y cascarillas de acero	57

3.6	Caracterización de materiales compuestos	58
3.6.1	SEM/MEB-EDS del experimento E3.....	58
3.6.2	Análisis FTIR.....	58
3.6.3	Análisis termogravimétrico	58
3.7	Confección de moldes de acero de acuerdo con Normas ASTM.....	59
3.8	Diseño de experimentos para preparación de probetas	61
3.9	Preparación de la resina epóxica	62
3.10	Preparación de las mezclas de materiales compuestos	65
3.11	Ensayos mecánicos de materiales compuestos	69
3.11.1	Ensayos de tracción.....	69
3.11.2	Ensayos de flexión	69
3.12	Análisis, interpretación y tratamiento estadístico de datos experimentales.....	69
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados		70
4.1	Determinación de propiedades físicas de materias primas.....	70
4.1.1	Pencas, néctar y fibras de Maguey, y fibras de Chambira.....	70
4.1.2	Escorias de acería y cascarillas de acero	70
4.1.3	Resinas,polyester,fibras de vidrio MAT 450, velo superficie y Woven Roving 800 .	71
4.2	Caracterización de materias primas	73
4.2.1	Fibras Maguey, néctar de Maguey y Chambira	73
4.2.2	Escorias de acería y cascarillas de acero	81
4.3	Cálculos de las Cantidades de Materias Primas para colocado en el Molde	85
4.4	Caracterización de los materiales compuestos	86
4.4.1	Análisis vía SEM/MEB - EDS de muestra del experimento 3.....	86
4.4.2	Análisis de Espectros FTIR	88
4.4.3	Análisis termogravimétricos	91
4.4.4	Análisis estadísticos de ensayos mecánicos y termogravimétricos	95
4.5	Producción de protectores solares y separadores de ambientes en laboratorios	137
Conclusiones		139

Recomendaciones	141
Referencias bibliográficas	142
Anexos.....	153

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Clasificación de fibras en función de su origen.....	13
Tabla 2: Diferentes presentaciones de la fibra de vidrio.....	15
Tabla 3: Fibras naturales de acuerdo de las partes de extracción de la planta de origen	16
Tabla 4: Características de las fibras vegetales.....	17
Tabla 5: Clasificación de resinas o polímeros termoestables basado en la temperatura de uso.....	18
Tabla 6: Resumen de las características de las resinas.....	41
Tabla 7: Clasificación de residuos siderúrgicos.....	42
Tabla 8: Dimensiones de probetas de material compuesto para los distintos ensayos mecánicos según normas ASTM.....	60
Tabla 9: Diseño experimental seguido para la fabricación de las probetas de material compuesto.....	62
Tabla 10: Parámetros de curado de la resina C.....	64
Tabla 11: Determinaciones físicas de biomásas derivadas y fibras naturales: muestras de ML, MN, FM y FC.....	70
Tabla 12: Propiedades físicas de las escorias de acería (EA) y cascarillas de acero (CA).....	71
Tabla 13: Propiedades de la resina Epóxica Premium antes del endurecimiento.....	71
Tabla 14: Propiedades de la Resina Epóxica Premium después del endurecimiento.....	71
Tabla 15: Propiedades de la resina Poliéster Insaturada ANYPOL - 100.....	72
Tabla 16: Propiedades de la fibra de vidrio MAT 450.....	72
Tabla 17: Propiedades de la fibra woven roving 800 o fibra de vidrio WR 800.....	73
Tabla 18: Análisis químicos y otros controles realizados en fibras de maguey, néctar de maguey y fibras de chambira.....	73
Tabla 19: Búsqueda de bandas coincidentes entre el ensayo FTIR de FM y otras sustancias orgánicas.....	75

Tabla 20: Búsqueda de bandas coincidentes entre el ensayo FTIR de FC y otras sustancias orgánicas.....	77
Tabla 21: Correlación entre los espectros de frecuencias de absorción y los Tipo de vibración y estiramiento de grupos funcionales en la hemicelulosa, y esqueletos aromáticos de lignina.....	78
Tabla 22: Análisis de proximidad de fibras de maguey (FM) y de chambira (FC).....	80
Tabla 23: Análisis químicos de las muestras de escoria de acería (EA) y cascarillas de acero de las cosechas 2022 y 2024	81
Tabla 24: Obtención de la resina C de acuerdo con la ecuación 1 para 0% fibras	85
Tabla 25: Cálculos de la obtención de la resina C de acuerdo con la ecuación 2 para 5% fibras	85
Tabla 26: Cálculos de la obtención de la resina C de acuerdo con la ecuación 2 o 3 para 7.5% fibras	85
Tabla 27: Cálculos de la obtención de la resina C de acuerdo con la ecuación 2 o 3 para 10% fibras	86
Tabla 28: Composición química promedio obtenida mediante EDS	87
Tabla 29: Resumen de resultados de análisis termogravimétricos.....	94
Tabla 30: Comparación de las dimensiones de las probetas para ensayo de tracción por cada experimento.....	95
Tabla 31: Resultados de las pruebas de tracción para los materiales compuestos preparados	96
Tabla 32: Interacción de variables independientes para ensayo de tracción - ANOVA .	103
Tabla 33: Resumen de las regresiones de los modelos de interacción para ensayo de tracción	104
Tabla 34: Comparación de las dimensiones de las probetas para ensayo de flexión por cada experimento	109
Tabla 35: Resultados de las pruebas de flexión para los materiales compuestos preparados	109

Tabla 36: Interacción de variables independientes para ensayo de flexión - ANOVA de Welch	116
Tabla 37: Resumen de las regresiones de los modelos de interacción para ensayo de flexión.....	116
Tabla 38: Interacción de variables independientes para pérdida de peso TGA (%) – ANOVA	134
Tabla 39: Resumen de las regresiones de los modelos de interacción para pérdida de peso TGA (%)	135

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Interacciones presentes en materiales compuestos híbridos relacionadas con su fuerza relativa.....	23
Figura 2: Diferentes tipos de materiales híbridos	25
Figura 3: Resumen de los procesos de fabricación de los materiales compuestos según los materiales de partida.....	27
Figura 4: Método de impregnación manual	28
Figura 5: Método de proyección (Spray-up)	29
Figura 6: Procedimiento de moldeo con saco: (a) a vacío y (b) en autoclave.....	29
Figura 7: Enrollamiento de filamentos.....	30
Figura 8: Dimensiones de probeta (mm), de acuerdo con el ASTM D3039 International, para ensayos de tracción.....	31
Figura 9: Dimensiones de probeta (mm), de acuerdo con el ASTM D790 internacional, para ensayos de flexión	31
Figura 10: Glucopiranososa unidad de celulosa	34
Figura 11: Configuración estérica de la celulosa.....	34
Figura 12: Celulosa: (β -D-glucopiranososa).....	35
Figura 13: Fibra de Maguey, material natural extraído de las hojas de las plantas del género Sisal (Agave Sisalana).....	38
Figura 14: Fibra de Chambira proviene de la especie <i>Astrocaryum chambira</i>	39
Figura 15: Codificación y toma de medidas a las pencas de maguey	47
Figura 16: Preparación mecánica de las fibras de maguey en el Laboratorio de Hornos y Combustibles de la FIGMM UNI	48
Figura 17: Preparación mecánica de las escorias de acería realizado en el Laboratorio de Hornos y Combustibles de la FIGMM UNI	49
Figura 18: Preparación mecánica de las escorias de acería realizado en el Laboratorio de Hornos y Combustibles de la FIGMM UNI	50

Figura 19: Análisis inmediato de carbones de las fibras de maguey y chambira respectivamente	55
Figura 20: Molienda de la fibra de Maguey y de Chambira	56
Figura 21: Moldes de acero inoxidable y sus perspectivas para la preparación de láminas para corte de probetas de materiales compuestos	59
Figura 22: Seis moldes codificados como A1, B2, C3, D4, E5 y F6 con sus tapas y contratapas, así como pernos de seguridad correspondientes.....	60
Figura 23: Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción según norma ASTM D3039.....	61
Figura 24: Dimensiones de la probeta para ensayo de flexión según norma ASTM D790.....	61
Figura 25: Muestras de las resinas epóxicas tipo A y B junto al peróxido de Meck (catalizador)	63
Figura 26: Galón de desmoldante Glucom, thinner acrílico reforzado y alcohol isopropílico	63
Figura 27: Peso de la fibra de maguey y chambira en balanza digital milimétrica	66
Figura 28: Moldes encerados parte inferior (tapa) y superior (contratapa)	66
Figura 29: (a) Mezcla (b) Pesado y (c) adición de escoria de acería a la mezcla de resinas A y B	67
Figura 30: Alisado, colocado de fibras y vertimiento de la mezcla de resina C modificada en el molde con fibras	67
Figura 31: Desmoldeo del material compuesto preparado	68
Figura 32: Probetas del material compuesto ya cortadas mediante corte laser.....	68
Figura 33: Análisis FTIR de la fibra de Maguey.....	74
Figura 34: Análisis FTIR de la fibra de Chambira.....	76
Figura 35: Análisis termogravimétrico TGA y DTG de la fibra de maguey (MF)	79
Figura 36: Análisis termogravimétrico TGA y DTG de la fibra de chambira (FC).....	80

Figura 37: Difractogramas de los análisis DRX de escorias de acería 2024 (a) y cascarillas de acero de las cosechas 2022 (b) y 2024(c)	83
Figura 38: Micrografías de la muestra E3 resina epoxi, fibra maguey y relleno de escoria a magnificaciones de 612X y 5000X	86
Figura 39: Micrografías de fibras sobresaliendo por los laterales la muestra Resina epoxi.....	87
Figura 40: Análisis FTIR de las muestras E1 al E8: (a)E1, (b)E2, (c)E3, (d)E4, (e)E5, (f)E6, (g)E7 y (h)E8	88
Figura 41: Análisis termogravimétricos de las muestras E1 al E8	92
Figura 42: Resistencia a la tracción máxima en MPa para cada una de las muestras preparadas de material compuesto	97
Figura 43: Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para el ensayo de tracción	98
Figura 44: Gráfico de residuos para ensayo de tracción	99
Figura 45: Matriz de correlación para ensayo de tracción (Heat Map)	100
Figura 46: Gráfico Q-Q y test de Shapiro-Wilk para la normalidad de datos en ensayo de tracción.....	101
Figura 47: Grafica de Cajas (Boxplot), media, desviación estándar y Test de Levene para ensayo de tracción	102
Figura 48: Regresión del modelo 4 para ensayo de tracción.....	105
Figura 49: Análisis de varianza (ANOVA) del modelo 4 para ensayo de tracción.....	105
Figura 50: Grafica de variación de la resistencia a la tracción en función a la interacción de relleno de escoria y tipo de refuerzo	106
Figura 51: Grafica de variación de la resistencia a la tracción en función a la interacción de relleno de escoria y contenido de refuerzo	107
Figura 52: Grafica de variación de la resistencia a la tracción en función a la interacción de contenido y tipo de refuerzo	108
Figura 53: Resistencia a la flexión máxima en MPa para cada una de las muestras preparadas de material compuesto	110

Figura 54: Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para ensayo de flexión....	111
Figura 55: Gráfico de residuos para ensayo de flexión	112
Figura 56: Matriz de correlación para ensayo de flexión (Heat Map).....	113
Figura 57: Gráfico Q-Q y test de Shapiro-Wilk para la normalidad de datos en ensayo de flexión	114
Figura 58: Grafica de Cajas (Boxplot), media, desviación estándar y Test de Levene para ensayo de flexión.....	115
Figura 59: Regresión del modelo 3 para ensayo de flexión.....	117
Figura 60: Análisis de varianza (ANOVA de Welch) del modelo 3 para ensayo de flexión	118
Figura 61: Grafica de variación de la resistencia a la flexión en función a la interacción de relleno de escoria y tipo de refuerzo	119
Figura 62: Grafica de variación de la resistencia a la flexión en función a la interacción de relleno de escoria y contenido de refuerzo	120
Figura 63: Grafica de variación de la resistencia a la flexión en función a la interacción de contenido y tipo de refuerzo	121
Figura 64: Resistencia a la tracción y flexión máxima en MPa para cada una de las muestras preparadas de material compuesto.....	122
Figura 65: Aproximación de curvas tensión deformación para cada una de las muestras preparadas de material compuesto	123
Figura 66: Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para picos endotérmicos °C (DTG)	124
Figura 67: Gráfico de residuos para picos endotérmicos °C (DTG).....	125
Figura 68: Matriz de correlación para picos endotérmicos DTG (Heat Map)	126
Figura 69: Gráfico Q-Q y test de Shapiro-Wilk para la normalidad de datos en picos endotérmicos °C (DTG)	127
Figura 70: Grafica de Cajas (Boxplot), media, desviación estándar y Test de Levene para picos endotérmicos °C (DTG).....	128

Figura 71: Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para pérdida de peso % (TGA)	129
Figura 72: Gráfico de residuos para pérdida de peso % (TGA).....	130
Figura 73: Matriz de correlación para pérdida de peso TGA % (Heat Map)	131
Figura 74: Gráfico Q-Q y test de Shapiro-Wilk para la normalidad de datos en pérdida de pesos (TGA)	132
Figura 75: Grafica de Cajas (Boxplot), media, desviación estándar y Test de Levene para pérdida de pesos (TGA)	133
Figura 76: Regresión lineal del modelo 5 para pérdida de peso TGA (%)	136
Figura 77: Análisis de varianza(ANOVA)del modelo 5 para pérdida de peso TGA(%) ..	137
Figura 78: Materiales compuestos que sirvieron para la preparación de los prototipos de paneles.....	138
Figura 79: Grupo de estudiantes e investigadores del GI Siderurgia FIGMM UNI, que trabajaron el proyecto FIGMM-PFR-25-2024.....	138

Introducción

En los últimos años, la búsqueda de alternativas sostenibles para la fabricación de materiales compuestos ha cobrado gran relevancia en diversas áreas de investigación. El uso de fibras naturales como el maguey y la chambira, así como la reutilización de residuos industriales como la escoria de acería, representan una oportunidad para desarrollar materiales con propiedades mejoradas y un menor impacto ambiental. En este contexto, el presente trabajo de investigación se enfoca en la preparación y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales y relleno de escoria de acería, evaluando sus propiedades mecánicas y térmicas mediante herramientas estadísticas avanzadas.

El Capítulo I establece el marco contextual de la investigación, presentando los antecedentes sobre el tratamiento y caracterización de fibras naturales y residuos siderúrgicos en la fabricación de materiales compuestos. Asimismo, se plantea la problemática en el Perú, donde las investigaciones en este campo aún son limitadas en comparación con otros países de la región. Se definen las hipótesis y los objetivos principales, el cual consiste en analizar estadísticamente, a través del lenguaje Python, la significancia de las propiedades de resistencia a la tracción, flexión y térmica en función de diferentes niveles de relleno de escoria de acería, tipo y contenido de refuerzo de fibras de maguey y chambira en la preparación de materiales compuestos a base de resina epoxi.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico necesario para comprender los fundamentos de los materiales compuestos, los refuerzos de fibras naturales y sintéticas, los distintos tipos de rellenos, los métodos de fabricación empleados, así como las propiedades mecánicas y los criterios para la evaluación de modelos estadísticos.

En el Capítulo III, se describe la metodología experimental utilizada en la investigación. Se detalla la obtención y preparación de las materias primas, incluyendo el procesamiento de las fibras de maguey, chambira y de los residuos siderúrgicos. Se presentan las técnicas de caracterización aplicadas, como la espectroscopia de

fluorescencia de rayos X (EFRX), espectroscopia de absorción atómica (EAAF), análisis termogravimétrico (TGA-DTA), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y microscopía electrónica de barrido (MEB/SEM). Además, se describe el diseño experimental basado en normas ASTM para la fabricación de probetas y la ejecución de ensayos mecánicos de tracción y flexión.

El Capítulo IV abarca el análisis y discusión de los resultados obtenidos. Se presentan los valores de las propiedades físicas de las materias primas y materiales compuestos, la caracterización química y estructural, y los ensayos mecánicos. Asimismo, se realizan análisis estadísticos avanzados, como ANOVA y regresión lineal múltiple, empleando lenguaje Python, con el fin de evaluar la influencia de los factores experimentales sobre la respuesta del material. Finalmente, las conclusiones del estudio permitirán establecer el impacto del tipo y contenido de refuerzo, así como del relleno de escoria, en el comportamiento mecánico y térmico de los materiales compuestos. Se espera que los resultados de esta investigación contribuyan al desarrollo de nuevos materiales sostenibles con aplicaciones potenciales en diversas industrias.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Antecedentes referenciales

Los materiales compuestos han sido ampliamente estudiados debido a su capacidad de ofrecer una combinación óptima en sus propiedades mecánicas. La calidad y las propiedades finales de estos materiales dependen en gran medida de la selección, caracterización y preparación. Toledo y Torres (2024), investigaron el efecto de tratamientos químicos superficiales de las fibras de agave en las propiedades mecánicas de compuestos de resina poliéster, como la resistencia al impacto y a la tracción, para esto se emplearon técnicas de caracterización física y de microscopía óptica para evaluar los cortes de fibras antes y después de tratar con hidróxido de potasio (KOH) así como una combinación de hidróxido de potasio (KOH) con aminopropiltrimetoxisilano (KOH-Silano). Los resultados en la resistencia a la tracción, observaron una mayor adherencia de fibras de agave y la matriz poliéster utilizando hidróxido de potasio (KOH); sin embargo, la adición de Silano evidenció una mayor unión, potenciando la resistencia a la tracción de los compuestos. Ello, también se comprobó con los resultados a la resistencia al impacto, el Silano como agente de acople en el tratamiento generó un efecto positivo adicional en la mejora de la tenacidad de compuestos.

En esa misma línea, Epiqueñ, Saavedra, M., *et al.* (2020), evaluaron la influencia de la concentración de NaOH (100, 200 y 300 g/L de NaOH) del proceso de mercerización a 25 °C por 1 h, y del porcentaje en peso (15, 20 y 25%) de fibras de aguaje (*Mauritia flexuosa*) sobre la resistencia al impacto en un material compuesto de matriz de poliéster. Así mismo fueron evaluados los compuestos reforzados con fibra sin tratamiento, todas las fibras fueron caracterizadas antes y después del tratamiento mediante la caracterización química, porcentaje de absorción, microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) a fin de determinar de forma indirecta la modificación de los compuestos químicos de las fibras vegetales. Los resultados mostraron que a mayor concentración de NaOH se obtuvo una disminución de

compuestos como lignina y hemicelulosa (estos dos últimos de mayor interés desde el punto de vista de propiedades mecánicas de las fibras) mientras que el contenido de celulosa aumentó. Adicionalmente, se evidenció que, a mayor concentración de NaOH, el carácter hidrofílico de la fibra disminuyó. Por otro lado, mediante FTIR, se identificó que los grupos funcionales relacionados a la composición de la fibra varían antes y después de la mercerización. Mientras que la microscopía electrónica de barrido (SEM) mostró cambios morfológicos de la fibra en donde se observó impurezas, ceras y grasas para la que estaba sin tratamiento y una superficie más rugosa y libre de impurezas para las tratadas. El mayor valor de resistencia al impacto fue el obtenido por los compuestos reforzados con 25 % de fibra sin tratamiento con un valor promedio de 39.62 kJ/m², valor que representa un aumento del 298.34 % con respecto a la resistencia al impacto de la matriz poliéster sin refuerzo. Se concluyó que el porcentaje en peso de fibra incrementó la resistencia al impacto mientras que el tratamiento químico aumentó la adhesión de fibra-matriz e influyó en el mecanismo de falla de los compuestos de matriz poliéster, sin embargo, disminuyó la resistencia al impacto, siendo así que los compuestos reforzados con 25 % de fibra y tratados con 100, 200 y 300 g/L de NaOH reportaron valores promedios de resistencia al impacto de 23.02, 28.01 y 20.48 kJ/m² respectivamente.

Asimismo, Walter, A., *et al.* (2020), utilizaron la fibra de coco natural como refuerzo en un compuesto a base de resina epoxi. El objetivo principal de esta investigación fue estudiar el efecto de la orientación y la longitud de la fibra en las propiedades mecánicas del compuesto reforzado con fibra de coco. El compuesto de fibra de coco, orientadas de forma aleatoria y alineadas se desarrollaron usando longitudes que variaron en tres niveles (30, 40 y 50 mm). Las fibras de coco fueron tratadas con una solución de NaOH al 5 % antes de añadirlas a la resina epoxi. El compuesto se confeccionó con una fracción de volumen de fibra de 25 % en relación con la resina epoxi (75 %) mediante la técnica de laminado manual. Se determinaron que propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, flexión, impacto y dureza, mejoraron debido al aumento de la longitud de la fibra. Se observó que, con el cambio de orientación de la fibra de aleatoria a alineada, los valores

de dureza se redujeron, mientras que la resistencia a la tracción, flexión e impacto mejoraron.

De acuerdo con Sandeep, B., *et al.* (2024), el uso de fibras de cáscara de limón dulce (*Citrus limetta*) para desarrollar y caracterizar un compuesto de matriz polimérica. Las fibras se extrajeron, purificaron y recubrieron con resina epoxi, para luego transformarlas en compuestos mediante el método de laminado manual, así como curarlas en un horno. Las pruebas mecánicas, incluyeron dureza, resistencia a la tracción, compresión e impacto, para evaluar los compuestos elaborados. Se comprobó que el refuerzo de fibra mejoró significativamente la estabilidad mecánica, con una resistencia a la compresión y tracción máxima que alcanzaron los 231.39 y los 22.68 MPa, respectivamente. También se realizó un análisis microestructural mediante microscopía electrónica de barrido (MEB/SEM) y pruebas de absorción de humedad. Además, se utilizó el *software Ansys Workbench* para realizar más análisis estadísticos. Se concluyó que las fibras de cáscara de limón dulce (*Citrus limetta*) son materiales de refuerzo viables para los compuestos de matriz polimérica, que ofrecen propiedades mecánicas mejoradas.

Según Hanhan, I., *et al.* (2019), los compuestos de fibra discontinua son ventajosos para producir componentes de tamaño pequeño y mediano, debido a sus propiedades como peso ligero y alta rigidez, para ello compararon un estudio no destructivo de rayos X con microscopía óptica destructiva para caracterizar los atributos microestructurales de la fracción de volumen, porosidad, distribución de la orientación y la longitud de la fibra de vidrio discontinuas en una matriz de polipropileno. Se concluyó que la fracción de volumen y la relación de aspecto promedio de la fibra de vidrio coincidían bien, mientras que la orientación y la detección de porosidad de la fibra de vidrio tenían diferencias pequeñas pero significativas.

El uso de fibras de agave en materiales compuestos de matriz polimérica ha tomado relevancia en los últimos años. Aravinth, K., *et al.* (2023), exploraron las propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados con fibra de agave, conocida también como maguey, en una matriz de resina epoxi. Para esto se trataron fibras de agave con

una solución alcalina de NaOH al 5 % (p/v) y prepararon 18 laminados de material compuesto, con combinaciones distintas de orientación, longitud y fracción volumétrica, para someterlos a ensayos mecánicos. En pruebas de tensión, las fibras orientadas a 45° presentaron valores más altos, 31.73 MPa. En cuanto a las pruebas de flexión, las fibras con orientación de 45° también exhibieron un valor máximo de 43.96 MPa. Se observó que el aumento en la longitud de la fibra mejoró las propiedades mecánicas, siendo que las de 60 cm mostraron los mejores resultados tanto en tensión (28.98 MPa) como en flexión (39.02 MPa).

Abdellah *et al.* (2023), evaluaron los efectos de la fibra de palmera datilera (DPF) en un material híbrido conformado con esta fibra y lana de oveja en matriz poliéster. Para este efecto se prepararon materiales compuestos de alto rendimiento y bajo costo para su reuso en la construcción, sistemas de aislamiento, piezas de automóviles y muebles para el hogar. El DPF se trató usando una solución de NaOH al 5 %; y la lana de oveja se limpió con agua caliente a 50 °C y detergentes. Las muestras compuestas se prepararon con diferentes contenidos de fibra (0, 10, 20 y 30 % (p)) usando una técnica de moldeo por compresión. El efecto del refuerzo de fibra se analizó en términos de las propiedades mecánicas (tracción, flexión, impacto y dureza), y la densidad del compuesto. Además, se realizó un estudio de microscopía electrónica de barrido (MEB/SEM) en las fibras, antes y después del tratamiento, y se examinaron las superficies fracturadas de todas las muestras compuestas después de las pruebas de tracción. Los resultados de ensayos mecánicos mostraron que el poliéster reforzado híbrido 20 % DPF/lana de oveja (p/p) fue el óptimo. La resistencia máxima a la tracción y el módulo de elasticidad lineal (Young) fueron 27 MPa y 3.69 GPa, respectivamente. La resistencia a la flexión y el módulo de flexión final fueron 35.4 y 2507 MPa, respectivamente. La resistencia al impacto fue de 39.5 kJ/m² y la dureza alcanzó un valor de 64 HB. El estudio MEB/SEM también denotó una buena adhesión y unión interfacial entre las fibras híbridas de DPF/lana de oveja y la matriz de poliéster, particularmente con un contenido de fibra del 20 %.

Por su parte, Kumari *et al.* (2022), examinaron el efecto de la adición de aserrín en materiales compuestos de matriz epoxi con refuerzo de fibras de plátano - sisal (agave). Asimismo, se prepararon tres muestras de compuestos (S-I, S-II, S-III) con diferentes composiciones de fibra de plátano, sisal y aserrín, utilizando un método de laminación manual. Las resistencias a la tensión para S-I, S-II, y S-III fueron 17.50, 17.32 y 17.19 MPa, respectivamente. Se registraron resistencias a la compresión de 243.8 MPa para S-I, 242.9 MPa para S-II y 242.2 MPa para S-III. Las resistencias a la flexión fueron de 195.3, 194.7 y 194.2 MPa para S-I, S-II y S-III respectivamente. Se midieron resistencias al impacto de 31.09, 30.90 y 30.20 kJ/m² para S-I, S-II y S-III, respectivamente. Asimismo, los valores de dureza Brinell para S-I, S-II y S-III fueron 25.05, 24.93 y 24.86 HB, respectivamente. Sus resultados indicaron que la incorporación de aserrín mejoró las propiedades mecánicas y la resistencia a la absorción de agua del material compuesto.

Por otro lado, investigando refuerzos de matrices poliméricas, De Melo *et al.* (2019) estudiaron la reutilización de polvo de fibra de sisal (agave), contaminado por aceite industrial, resultante de las actividades de una industria textil brasileña. Con el objetivo de reutilizar los residuos de polvo de fibra de sisal contaminados y perjudiciales para el medio ambiente, evaluaron el potencial del uso del polvo de fibra de sisal como refuerzo en composites. Para esto, se fabricaron probetas para estudiar el comportamiento mecánico de compuestos poliméricos naturales a base de resina de poliéster, elaborados mediante planificación experimental (cuyas variables operacionales fueron: granulometría de polvo de sisal y contenido de fibra con o sin estireno). La condición que exhibió altos resultados de comportamiento mecánico independiente de la adición de estireno fueron el tamaño de partícula y el contenido de fibra, 1680 µm y 2.5 %, respectivamente. Por lo tanto, los mejores resultados de resistencia a la tensión fueron 0.59 MPa, deformación, 5.68 %, tenacidad, 2.01 E⁻⁰⁵ MJ/m³, y energía de rotura, 14 J, para el compuesto reforzado con polvo de sisal.

En esa misma línea, Godara y Singh (2021), estudiaron los compuestos de resina epoxi reforzados con fibra de vidrio, debido a sus destacadas propiedades mecánicas y

tribológicas. Para esto, se prepararon materiales compuestos de fibra de vidrio mediante la técnica de laminado manual, un método comúnmente utilizado. Se evaluaron y analizaron las propiedades mecánicas, como resistencia a la tracción, compresión y flexión, también, se realizó una prueba de erosión para determinar su comportamiento frente al desgaste. Además, se usó del polvo de piedra Kota como material de relleno, cuya influencia en el compuesto y su caracterización fueron evaluadas. Los resultados demostraron que una cantidad de relleno (5 % en peso) mejoró la resistencia al desgaste, sin embargo, un incremento de esta misma cantidad observó un efecto adverso, además la resistencia a la tracción resultó directamente proporcional con el contenido de relleno (hasta un 10 % en peso).

Las propiedades mecánicas de materiales compuestos híbridos utilizando fibras naturales, tales como bambú, yute, kenas, sisal, cáñamo y abaca, fueron investigadas por Bernardo A. Oliver Borrachero (2021). Este estudio le ayudó a extraer las propiedades mecánicas necesarias para realizar un modelo MEF (Método de Elementos Finito) uniaxial en el *software* ANSYS ACP, comparando resultados con distintas orientaciones de fibras. Tras esto, el autor dimensionó un componente utilizando el modelo MEF uniaxial para un estudio multiaxial. Este componente ha sido fabricado y posteriormente ensayado en un banco de fatiga con la finalidad de contrastar los resultados del *software* con los obtenidos empíricamente, y a su vez validar la aplicación.

El uso de fibra de otros materiales como pedúnculo de plátano combinada con yute, como refuerzo de material compuesto fueron investigados detalladamente por Durai *et al*, (2023). Ellos analizaron cómo la combinación y proporción de estas fibras naturales influyeron en las propiedades como la tensión, flexión, impacto, absorción de agua y análisis mecánico dinámico. Los autores elaboraron nueve tipos de materiales compuestos distintos utilizando una mezcla de estas fibras en diferentes proporciones. Después de ensayarlos, los mejores resultados destacaron que la combinación de yute y fibra de pedúnculo de plátano en una proporción de 75 y 25 %, respectivamente. Esto mejoró significativamente las propiedades mecánicas y funcionales del compuesto. Se observó un

aumento en la resistencia a la tensión y flexión con esta mezcla de fibras, alcanzando la máxima resistencia de tensión y flexión igual a 35.17 y 56.19 MPa, respectivamente. La muestra elaborada también mostró la mayor resistencia al impacto de 149.7 J/m y una absorción de agua del 6.9 %.

Mostafa, A., *et al.* (2016), estudiaron la influencia de la carga de *BFS* (*Blast Furnace Slag*), el tipo de *BFS* utilizado y el tamaño de las micropartículas de *BFS* empleadas en diferentes propiedades reológicas, mecánicas y térmicas de los materiales compuestos de polipropileno y poliestireno. Quiere decir que la adición de relleno mejoró las propiedades reológicas del material, pero no hubo ningún efecto al variar el tamaño de partícula y el tipo de relleno en las propiedades ya mencionadas. Además, descubrieron que la adición de *BFS* disminuyeron las propiedades mecánicas. Sin embargo, los composites preparados con *BFS* refrigerado por aire mostraron los valores de resistencia relativamente más altos que los con *BFS* granulado, además aumentó ligeramente la temperatura de cristalización, pero redujo la entalpia de cristalización de estos polímeros.

Por otro lado, Padhi, P., *et al.* (2015), prepararon dos conjuntos de materiales compuestos, uno con polipropileno y compuesto *BFS*, y otro con polipropileno, fibra de vidrio corta y compuesto *BFS*. La fibra de vidrio se mantuvo constante y el contenido de *BFS* varió en peso. Se evaluaron y compararon las propiedades mecánicas y tribológicas de los materiales, resultando que las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y flexión se redujeron con la carga de *BFS*, mientras que la dureza del material aumentó con la carga de *BFS*. Sin embargo, la inclusión de fibra de vidrio corta mejoró todas las propiedades mecánicas del *composite*. Finalmente, en el estudio de propiedades de desgaste por deslizamiento, la inclusión de la fibra de vidrio corta y *BFS* optimizaron apreciablemente la resistencia al desgaste de los *composites*.

En el Perú, Palomino (2022), analizó las propiedades físicas y mecánicas de bloques de concreto reforzados con fibra de maguey. Para este objetivo se evaluaron un total de 144 bloques de concreto incorporando fibra de maguey en porcentajes de 0.7, 1.4 y 2.1 %. Los resultados indicaron que las propiedades físicas variaron y las propiedades

mecánicas mejoraron notablemente en los porcentajes mencionados de fibra de maguey. En esa misma línea, Haro y Ramírez (2024), evaluaron fibras naturales de cabuya y fibras de vidrio, así mismo el porcentaje de peso de fibras cortas de cabuya en compuestos de matriz de resina poliéster, analizaron algunas propiedades mecánicas, como energía de impacto. Los resultados evidenciaron que la adición de 30 % fibras de cabuya en compuestos de matriz poliéster mejoró la resistencia al impacto, llegando a obtener una energía máxima de 14.87 J. Este valor estaba muy próximo a los compuestos con 30 % de fibra de vidrio, el cual alcanzó su máxima energía de impacto de 15.82 J.

1.2 Planteamiento de la realidad problemática

La sustitución de fibras sintéticas (generalmente de vidrio) por fibras naturales ha sido objeto de intensas investigaciones en las últimas décadas, en particular como refuerzo de materiales compuestos. Entre ellas están las fibras de sisal o maguey, que se extraen de la planta *Agave sisalana*, estas especies vegetales destacan por sus buenas propiedades mecánicas, cultivo sencillo y coste razonable.

Los polímeros reforzados con fibras naturales fueron estudiados intensamente en una amplia gama de aplicaciones en la ciencia de los materiales. En este sentido, las fibras naturales se han convertido en un recurso atractivo para diferentes industrias, dentro de las cuales se puede destacar la industria de los materiales compuestos. Las fibras naturales son recursos renovables que pueden ser obtenidos de animales o vegetales y presentan múltiples ventajas, como su bajo costo y peso, biodegradabilidad y altas propiedades específicas.

En el Perú, fibras naturales como el maguey (*agave americana L. o sisalana*) procedente de la región sierra central, así como, la chambira (*astrocaryum chambira*), palmera amazónica, han sido utilizadas con fines artesanales, medicinales, alimenticios, de limpieza, biocidas, incluso hasta se usaron para confección de sogas que llaman “cabuya” y para construir maromas que sirven en los puentes; además de bayetas, suelas y zapatos, construcción utilizando las hojas acanaladas para techos y vigas, como fibras textiles y cercos naturales.

Como se sabe, los materiales compuestos son ampliamente utilizados en una variedad de industrias, principalmente en las de avanzada como son la automotriz y aeroespacial, a pesar de que en el Perú existen investigaciones insipientes sobre materiales compuestos, también es sabido que no existe información disponible sobre un pilotaje o manufactura industrial de estas fibras naturales como refuerzos de materiales compuestos de base polimérica, o sea este tipo de trabajos aún están categorizados como exploratorios en comparación a otros países latinoamericanos como Brasil, Colombia, Argentina, Ecuador y Chile. Razón por la cual la presente investigación no solo consistió en la caracterización completa de todas las materias primas utilizadas y disponibles para este fin en el Laboratorio de Hornos y Combustibles FIGMM UNI, así como la caracterización de las muestras de materiales compuestos desarrollados que contenían una matriz preparada a base de resina epoxi modificada con escoria de acería y reforzadas con fibras naturales maguey y chambira de acuerdo a un diseño de experimentos predeterminado, para luego estos ocho tipos de mezclas ser laminadas manualmente en moldes metálicos preparar probetas de dimensiones normatizadas que fueron ensayadas para evaluar su resistencia a la tracción, flexión, y térmica, y finalmente analizar estadísticamente vía lenguaje *Python* el nivel de significancia de los valores de resistencia a la tracción, flexión y térmica para diferentes niveles de relleno de escoria de acería, tipo y contenido de refuerzo de fibras de maguey y chambira en la preparación de materiales compuestos a base de resina epoxi como parte del plan de trabajo de un proyecto de investigación formativa VRI UNI 2024 (FIGMM-PF-25-2024) titulado: “Desarrollo de materiales compuestos de matriz polimérica con relleno de escoria de acería y refuerzo de fibras naturales de Maguey y/o Chambira para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas, visando su uso como protectores solares y separadores de ambientes en laboratorios” que financio completamente esta tesis.

1.3 Problemas

1.3.1 Problema general

¿Cómo un análisis estadístico vía lenguaje *Python* del nivel de significancia de los valores de los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo influirá en resistencia a la tracción, flexión y térmica - picos endotérmicos (DTG) y pérdida de peso (TGA)?

1.3.2 Problemas específicos

1.3.2.1 Problema específico 1. ¿Cómo un análisis estadístico vía lenguaje *Python* del nivel de significancia de los valores de los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo influirá en resistencia a la tracción?

1.3.2.2 Problema específico 2. ¿Cómo un análisis estadístico vía lenguaje *Python* del nivel de significancia de los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo influirá en los valores de resistencia a la flexión?

1.3.2.3 Problema específico 3. ¿Cómo un análisis estadístico vía lenguaje *Python* del nivel de significancia de los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo influirá en la resistencia térmica - valores de los picos endotérmicos (DTG)?

1.3.2.4 Problema específico 4. ¿Cómo un análisis estadístico vía lenguaje *Python* del nivel de significancia de los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo influirá en la resistencia térmica - valores de pérdidas de peso (TGA)?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar estadísticamente vía lenguaje *Python* el nivel de significancia de los valores de resistencia a la tracción, flexión y térmica para diferentes niveles de relleno de escoria de acería, tipo y contenido de refuerzo de fibras de maguey y chambira en la preparación de materiales compuestos a base de resina epoxi.

1.4.2 Objetivos Específicos

1.4.2.1 Objetivo específico 1. Analizar estadísticamente vía lenguaje *Python* el nivel de significancia de los valores de resistencia a la tracción para diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo.

1.4.2.2 Objetivo específico 2. Analizar estadísticamente vía lenguaje *Python* el nivel de significancia de los valores de resistencia a la flexión para diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo.

1.4.2.3 Objetivo específico 3. Analizar estadísticamente vía lenguaje *Python* el nivel de significancia de los valores de los picos endotérmicos (DTG) para diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo.

1.4.2.4 Objetivo específico 4. Analizar estadísticamente vía lenguaje *Python* el nivel de significancia de los valores de la pérdida de pesos (TGA) para los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

- H_0 : No existe una diferencia significativa en la resistencia a la tracción, flexión, DTG y TGA entre los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo.
- H_a : Al menos uno de los factores (relleno de escoria, tipo de refuerzo o contenido de refuerzo) o sus interacciones tiene un efecto significativo en la resistencia a la tracción flexión, DTG y TGA.

1.5.2 Hipótesis específicas

Hipótesis específica 1

- H_0 : No existe una diferencia significativa en la resistencia a la tracción entre los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo.
- H_a : Al menos uno de los factores (relleno de escoria, tipo de refuerzo o contenido de refuerzo) o sus interacciones tiene un efecto significativo en la resistencia a la tracción.

Hipótesis específica 2

- H_0 : No existe una diferencia significativa en la resistencia a la flexión entre los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo.
- H_a : Al menos uno de los factores (relleno de escoria, tipo de refuerzo o contenido de refuerzo) o sus interacciones tiene un efecto significativo en la resistencia a la flexión.

Hipótesis específica 3

- H_0 : No existe una diferencia significativa en los valores de los picos endotérmicos (DTG) entre los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo.
- H_a : Al menos uno de los factores (relleno de escoria, tipo de refuerzo o contenido de refuerzo) o sus interacciones tiene un efecto significativo en los picos endotérmicos (DTG).

Hipótesis específica 4

- H_0 : No existe una diferencia significativa en la pérdida de pesos (TGA) entre los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo.
- H_a : Al menos uno de los factores (relleno de escoria, tipo de refuerzo o contenido de refuerzo) o sus interacciones tiene un efecto significativo en la pérdida de pesos (TGA).

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Materiales compuestos o composites*

La elaboración de materiales compuestos o *composites* busca optimizar la combinación de sus propiedades mecánicas, como la rigidez, tenacidad, resistencia a la tracción y al impacto, tanto en condiciones de temperatura ambiente como a altas temperaturas. Aunque a simple vista pueden parecer uniformes, a nivel microscópico están formados por dos o más materiales distintos. Las características de estos compuestos dependen de la interacción sinérgica entre las propiedades de sus componentes, así como de las proporciones relativas, distribución, forma, tamaño y orientación del material de refuerzo o carga dentro de la matriz. La cantidad de refuerzo o carga se mide como una fracción en términos de volumen o peso respecto al total del material compuesto. Además, la manera en que este material se distribuye en la matriz determina la uniformidad del sistema mientras que su geometría y orientación afectan la anisotropía del compuesto (Smith y Hashemi, 2008).

2.1.2 Refuerzos de fibras

Las funciones de un material de refuerzo son diversas, como soportar las tensiones aplicadas al compuesto, aumentar las características mecánicas de la matriz, mitigar fallos con el aumento de temperatura y frenar o detener la propagación de grietas a través del compuesto (Haro Blas y Ramírez Ríos, 2024). Entre los tipos de fibras, se pueden mencionar en la Tabla 1.

Tabla 1

Clasificación de fibras en función de su origen

	Fibras cerámicas (Carburo de silicio, Alúmina-Zircona, basalto, etc.)
Fibras de origen mineral	Fibras Metálicas
	Fibras de origen inorgánico (Carbono, Vidrio y Boro)
Fibras de origen de origen orgánico	Aramida, Polietileno, etc.

Nota. De "Materiales Compuestos" de A., Miravete, 2000, Zaragoza, España

2.1.2.1 Fibra artificial o sintética. Una fibra sintética se refiere a un tipo de tejido fabricado de manera artificial a través de procedimientos químicos, en contraposición a las fibras naturales que se derivan de origen animal o vegetal. Estas, son producidas a partir de polímeros, principalmente originados del petróleo y otros compuestos químicos. Las fibras sintéticas se elaboran a partir de materiales como acrílico, nylon, aramida, poliéster, carbón, polietileno y polipropileno, siendo estas dos últimas la más empleadas en el sector de la construcción. Una de sus principales características es su notable resistencia a la tensión. Estas fibras se clasifican en dos categorías según su módulo de elasticidad: Fibras de alto módulo de elasticidad y fibras de bajo módulo de elasticidad (Huamani, O., 2024).

El uso de compuestos de fibra sintética es inevitable en las industrias de fabricación y producción porque sus propiedades son conocidas por ser mejores que las de la fibra natural. La fibra sintética se ha utilizado para fabricar productos compuestos de matriz polimérica de alto rendimiento, como componentes aeroespaciales, piezas de automóvil y paneles de construcción las más utilizadas en la industria de los compuestos son las de vidrio, carbono y aramida (Rahman, R., *et al.*, 2019).

Por ejemplo, las fibras de vidrio se distinguen por su capacidad incombustible, resistencia química y estabilidad, y son impenetrables para insectos, roedores y hongos. Para su utilización en aislamientos térmicos y aplicaciones acústicas, se producen a partir del material vidrio con una concentración de álcali reducida. Adicionalmente, la resina que contiene la fibra de vidrio le otorga resistencia frente a la erosión química, evitando así su degradación, por otro lado, debido a su peso específico bajo, es fácil de manipulación (Haro, P. & Ramírez, D., 2024).

Existen diversos tipos de fibras de vidrio que se distinguen principalmente por su composición química, lo que les confiere propiedades específicas. A continuación, los diferentes tipos de fibras de vidrio:

- Vidrio E (eléctrico), originalmente desarrollado para aplicaciones eléctricas, es el más económico de los tipos disponibles,

- Vidrio R (resistencia) o S (*strength*), ofrecen una mayor resistencia en comparación con el vidrio – E. Son comunes en sectores como la aviación, el espacio y la industria armamentista,
- Vidrio A (alto contenido en álcali), aunque menos resistente mecánicamente que los anteriores, sigue teniendo aplicaciones específicas,
- Vidrio B (Boro), este tipo es elaborado con borosilicato de calcio y bajo contenido en álcali y combina excelentes propiedades eléctricas con una gran durabilidad,
- Vidrio C (*chemical*), destaca por su alta resistencia química y se sitúa en cuanto a propiedades mecánicas entre los vidrios A y E,
- Vidrio D (dieléctrico), debido a sus características dieléctricas, se emplea en aplicaciones electrónicas y de telecomunicaciones, como radares y ventanas electromagnéticas, y
- Vidrio X, formulado con base de Li_2O , es especialmente valorado por su transparencia a los rayos X (Morales, 2008).

Además, es importante tener en cuenta la presentación industrial de la fibra de vidrio (Tabla 2), debido a que las propiedades de los materiales compuestos dependen básicamente de la relación volumétrica fibra/matriz y de la ordenación de las fibras en la matriz.

Tabla 2

Diferentes presentaciones de la fibra de vidrio

MAT	Superficie e Hilos cortados o continuos
ROVING	Directo, Ensamblado, Spun roving voluminizado y Texturizado
TEJIDO	Equilibrado, Orientado y Unidireccional
HILOS CORTADOS	Refuerzos termoplásticos, refuerzo escayolas y usos varios
VARIOS	Fibra molida y Complejos Mat-Tejido

Nota. De “Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nano fibras de carbono para aplicaciones tecnológicas,” de: G. Morales, 2008, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, España.

2.1.2.2 Fibras de origen natural. Las fibras naturales son materiales con forma de filamentos o hebras que pueden ser de origen vegetal o animal, además el uso de estas fibras ha beneficiado a la humanidad, pues ha satisfecho las necesidades básicas, como vestimenta, calzado y alimentación (Camacho, H. *et al*, 2022).

Las fibras vegetales se extraen de diferentes partes de las plantas de las que proceden, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Fibras naturales de acuerdo de las partes de extracción de la planta de origen

Parte de Extracción	Fibra
Semillas	Algodón y Kapok
Frutos	Luffa y Bonote (Mesocarpio de coco)
Tallo	Yute, Kenaf, Lino, Cábamo y Ramio
Hojas	Sisal, Agave y Henequén

Nota. De “Fibras naturales y la radiación gamma en la elaboración de materiales compuestos,” de H. Camacho, G. Martínez, L. Ávila, & P. Montes de Oca, 2022, *Materiales Avanzados y Nanomateriales: Aprovechamiento de fuentes naturales y sus beneficios al medio ambiente*, p. 97 (<https://doi.org/10.3926/oms.409.04>). De dominio público.

Las fibras vegetales contienen compuestos orgánicos claves como son la celulosa, hemicelulosa y lignina, principalmente.

Además, existen en menor medida otros compuestos como la pectina, ceras, proteínas, cenizas y sales inorgánicas, entre otros.

En cambio, factores como la edad, origen y condiciones meteorológicas durante el desarrollo de la planta, así junto con el proceso de obtención, establecen el porcentaje de los componentes (Luna y Lizarazo, 2022).

En la Tabla 4 se presentan las características de fibras naturales de origen vegetal.

Tabla 4*Características de las fibras vegetales*

Fibras	Composición	Características	Principales aplicaciones
Agave	Celulosa: 41% Lignina: 9% Hemicelulosa: 14%	Longitud (fibra corta): 44-105 μm Longitud (fibra larga): 300-425 μm Módulo de Young: 2.6 – 2.9 GPa	Industria tequilera y materiales compuestos.
Yute (<i>Corchorus capsularis</i>)	Celulosa: 57-64% Lignina: 11-16% Hemicelulosa: 21-25%	Longitud: 1-4m Diámetro: 17-20 μm Alta resistencia a la tracción Baja conductividad térmica Aislante Moderada retención de humedad	Industria textil, arpillera y materiales compuestos.
Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i>)	Celulosa y Lignina	Longitud: 0.6-2.5mm Diámetro: 3-12 μm Módulo de Young: 21-60 GPa	Industria papelera, embalaje, forraje, revestimiento.

Nota. Adaptado de “Fibras naturales y la radiación gamma en la elaboración de materiales compuestos,” de H. Camacho, G. Martínez, L. Ávila, & P. Montes de Oca, 2022, *Materiales Avanzados y Nanomateriales: Aprovechamiento de fuentes naturales y sus beneficios al medio ambiente*, p. 97 (<https://doi.org/10.3926/oms.409.04>). De dominio público.

2.1.3 Resinas o polímeros termoestables

Las resinas o polímeros termoestables son materiales orgánicos de elevado peso molecular, caracterizados por una estructura tridimensional reticulada que surge de reacciones químicas de polimerización, ya sea por adición o condensación de compuestos base. Durante el proceso de curado, las cadenas moleculares se enlazan de manera permanente, formando una red sólida que incrementa significativamente el peso molecular. Este cambio transforma la resina líquida en un material rígido y resistente, aunque con cierta fragilidad inherente. Su estructura reticulada les confiere propiedades únicas, como estabilidad térmica, resistencia química, y alta capacidad para soportar cargas mecánicas sin deformarse permanentemente, lo que los hace ideales para aplicaciones en sectores como la automoción, aeronáutica, y construcción. Además, su naturaleza irreversible tras el curado los distingue de los polímeros termoplásticos, ya que no pueden ser reformados ni reprocesados mediante calentamiento (Jones y Ashby, 2009).

Dentro de los polímeros termoestables empleados como matrices en forma de resinas, se incluyen materiales como los poliésteres, epóxicos, ésteres vinílicos,

melamínicos, fenólicos, poliuretanos, entre otros (Michaeli, *et al.*, 1989). El curado de estas resinas es un proceso complejo que implica varias etapas, en las cuales las moléculas inicialmente se alargan de forma lineal, posteriormente se ramifican y finalmente se entrelazan, formando una red tridimensional de peso molecular extremadamente alto. Durante este proceso, ocurre la gelificación, un cambio repentino e irreversible en el que el material pasa de un estado líquido a viscoso a un gel elástico, indicando la formación de la estructura reticulada (Kessler, *et al.*, 2000). La clasificación de la matriz de los polímeros termoestables según su temperatura a utilizar se puede clasificar como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5

Clasificación de resinas o polímeros termoestables basado en la temperatura de uso

Medias Temperaturas	Vinil éster y Epoxi
Bajas Temperaturas	Poliéster Isoftalico Ortoftalico
Medias – Altas Temperaturas	Fenólica
Altas Temperaturas	Bismaleimida, Poliimida Esteres cianato y Poliéteramida

Nota. De “Influencia de la secuencia de hibridación y porcentaje de peso de fibras cortas de cabuya sobre la energía de impacto de un compuesto de matriz poliéster.” de P., Haro Blas & D., Ramírez Ríos, 2024, [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo], Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Trujillo. De dominio público.

2.1.3.1 Resina epóxica. En el caso de la resina epoxi, ésta es utilizada ampliamente en los campos de equipos eléctricos y dispositivos electrónicos debido a sus excelentes propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas. Sin embargo, su estructura de interconexión covalente tridimensional interna presenta barreras para su degradabilidad y reciclaje porque los enlaces covalentes no se pueden romper fácilmente. Con la sustitución de equipos eléctricos y dispositivos electrónicos, habrá cada vez más resinas epoxi y sus compuestos para tratar y el reciclaje eficaz es de gran importancia para la conservación de recursos y la protección del medio ambiente (Feng, Y. *et al.*, 2024).

2.1.3.2 Resina poliéster. Como el polímero termoendurecible más productivo, la resina de poliéster insaturado (UPR) y sus compuestos eran difíciles de reciclar químicamente debido a la barrera de transferencia de masa en la estructura de red densa.

Por lo general, se aplicaban altas temperaturas/presiones y trituración mecánica para mejorar la transferencia de masa durante los procesos de ciclado químico, pero a costa de la selectividad de la reacción y la integridad de la fibra. Aquí, se observó un efecto de fragmentación único de los solventes apróticos en UPR, que es una solvatación no reactiva que tiene el potencial de reemplazar la fragmentación mecánica y mejorar la reciclabilidad de UPR y sus materiales compuestos. Se descubrió que la solvatación se basaba en el enlace de hidrógeno entre el solvente y el grupo éster de UPR a través de los parámetros de solubilidad de Hansen y la simulación de dinámica molecular. Fue la fuerza intermolecular entre los grupos de poliéster de UPR la que se destruyó, lo que llevó a la fragmentación de UPR en un polvo de tamaño micrométrico. El efecto de fragmentación también es aplicable a otros polímeros que contienen ésteres y proporciona un método simple, fácil y energéticamente eficiente para el reciclado químico de resinas termoendurecibles, así como para la exfoliación directa de rellenos reforzados (An, W. *et al.*, 2024).

2.1.4 Relleno para modificación de resinas

En general, los rellenos son los aditivos sólidos que se incorporan a los materiales poliméricos, que pueden mejorar las propiedades mecánicas y modificar el comportamiento térmico en los materiales poliméricos (Lokesh *et al.*, 2020). Los rellenos juegan un papel importante en los compuestos poliméricos al mejorar la distribución de la tensión. Esta mejora es fundamental para garantizar que las cargas y las tensiones se distribuyan uniformemente en todo el compuesto, evitando debilidades localizadas y manteniendo la integridad estructural (Nana *et al.*, 2021). Estos rellenos pueden ser orgánicos o inorgánicos. Estos son diferentes materiales de relleno que se han utilizado con éxito en la fabricación de compuestos. Entre ellos, los materiales de relleno a base de carbono se utilizan popularmente debido a sus propiedades mejoradas, como alta resistencia mecánica y térmica (Sultan *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2017, 2020). Los CNT (*carbón nanotubes*), el grafeno y el negro de carbono son algunos materiales de relleno a

base de carbono (Kohler *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 1996) (Rajendran, S. *et al.*, 2024).

Con el fin de promover la utilización de recursos inorgánicos como son las escorias de acero y así reducir los riesgos ambientales causados por su excesiva producción, se preparó un material de cambio de fase compuesto a base de este subproducto o residuo siderúrgico aprovechando que ésta tenía una estructura porosa con buena estabilidad estructural, que podría usarse para preparar materiales de cambio de fase compuestos y aplicarse en campos como el almacenamiento de energía térmica, la recuperación de calor residual (Yang, C, *et al.*, 2025).

Otro de estos subproductos es la escoria de alto horno (*Blast Furnace Slag - BFS*) porque se genera cuando se extrae hierro de su mineral. La densidad de la *BFS* es menor que la del hierro, flota en la superficie durante el proceso de extracción y, por tanto, puede extraerse fácilmente. Los *BFS* consisten en sustancias no ferrosas que estaban presentes en el mineral de hierro. Cuando se obtienen, se encuentran a una temperatura muy elevada. El método adoptado para enfriar esta escoria es el denominado “escoria enfriada por aire o escoria granulada” (Akkoyun, M., & Akkoyun, S., 2019). Los principales componentes de *BFS* son el óxido de aluminio, dióxido de silicio, óxido de calcio y el óxido de magnesio. También están presentes algunas trazas de óxido de manganeso y azufre. Además, se observó que la mayor parte contiene dióxido de silicio y óxido de aluminio. Para aumentar la utilización de este material, un método apropiado es su uso como material de relleno para el desarrollo de compuestos poliméricos. La investigación de la capacidad del *BFS* como material de relleno en resina polimérica es muy escasa y sólo se dispone de unos pocos estudios en la literatura (Sawlan, P., *et al.*, 2023).

2.1.5 Fases de los materiales compuestos

Los materiales compuestos reforzados con fibras destacan por ofrecer una mayor resistencia a la fatiga, un módulo de elasticidad (módulo de Young) superior y una excelente relación resistencia-peso. Esto se logra mediante la incorporación de fibras rígidas y resistentes, aunque intrínsecamente frágiles, dentro de una matriz más blanda y

dúctil. La matriz actúa como un medio para transferir las fuerzas aplicadas hacia las fibras, que son las responsables de soportar la mayor parte de la carga. Además, la matriz desempeña un papel crucial al proteger la superficie de las fibras, minimizando la exposición a factores externos como la humedad y el aire, que no podrían deteriorar las propiedades mecánicas de las fibras con el tiempo. Este diseño permite que los compuestos mantengan una alta resistencia tanto a temperatura ambiente como en condiciones de temperaturas elevadas. Adicionalmente, los compuestos reforzados con fibras pueden adaptarse a aplicaciones específicas ajustando el tipo, la orientación y la longitud de las fibras, así como las características de la matriz. Esto los convierte en materiales versátiles y de alto rendimiento, utilizados ampliamente en industrias como la automotriz, aeroespacial y de construcción, donde se priorizan propiedades como la ligereza y la durabilidad frente a condiciones exigentes (Askeland, D., *et al.*, 2012).

2.1.5.1 Fase matriz o base polimérica. La matriz es la parte principal que aglutina o rodea al refuerzo. Normalmente, es dúctil y tiene la función de distribuir y transferir los esfuerzos externos al refuerzo, aunque parte de estos esfuerzos son sostenidos por la matriz. Por otro lado, el refuerzo generalmente consiste en fibras o partículas de baja densidad, resistentes y rígidas, el cual actúa como fase dispersa. Su principal función es soportar los esfuerzos externos aplicados, proporcionando propiedades mecánicas al material compuesto (Haro y Ramírez, 2024).

La matriz, como fase continua en los materiales compuestos, desempeña un papel esencial al unir y proteger la fase dispersa, que suele ser más rígida y resistente. Generalmente, la matriz es de naturaleza dúctil y tenaz, con un módulo de elasticidad considerablemente inferior al de las fibras, generalmente la base polimérica modificada o no. Entre sus principales funciones se encuentra mantener las fibras en un orden geométrico específico, asegurando su correcta disposición. Además, se encarga de distribuir y transferir los esfuerzos externos hacia las fibras, las cuales son las responsables de soportar la mayor parte de la carga aplicada, mientras que la matriz asume solo una pequeña proporción de dichos esfuerzos. Ésta también actúa como un escudo protector

para las fibras, previniendo su degradación superficial ocasionada por abrasión mecánica o interacciones químicas adversas con el entorno. Asimismo, cumple un papel crítico al mantener separadas las fibras, evitando propagación de grietas que podrían comprometer la integridad estructural del material compuesto. Enriqueciendo su utilidad, las propiedades de la matriz influyen directamente en la tenacidad, resistencia e impacto y durabilidad del compuesto, permitiendo que este se adapte a diversas aplicaciones industriales, desde la fabricación de componentes aeronáuticos hasta productos en la construcción y el transporte. La elección adecuada de la matriz o base polimérica, junto con su compatibilidad química y mecánica con las fibras, es la clave para maximizar el rendimiento global del material compuesto (Velasco, F. *et al.*, 1994).

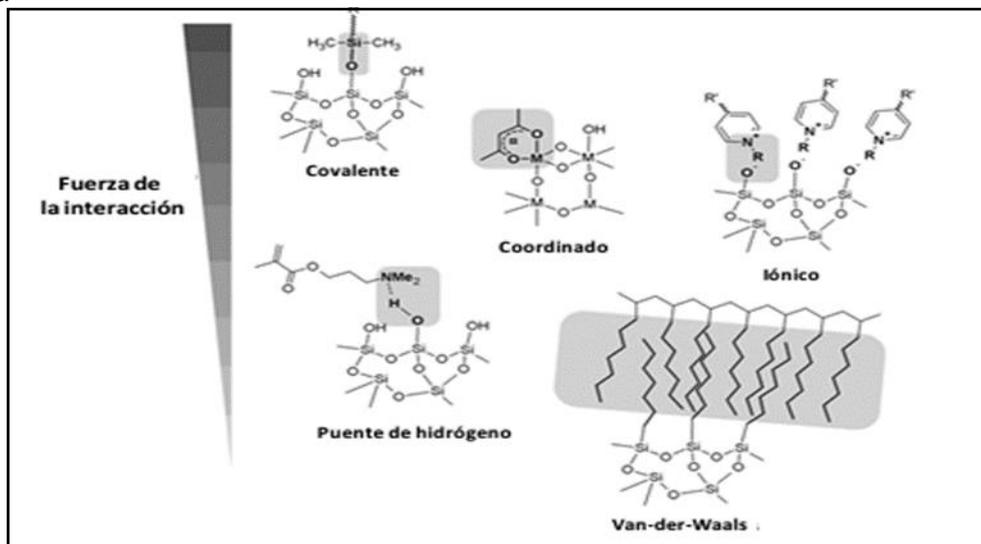
2.1.5.2 Refuerzo, fase fibrosa o dispersa. El refuerzo, fase fibrosa o fase dispersa está compuesta por filamentos alargados, generalmente en forma de hilos o cilindros, con diámetros que oscilan entre 2 y 10 μm . Estas fibras destacan por ser extremadamente rígidas, resistentes y con una microestructura marcadamente anisotrópica. En términos generales, se define como fibra a un material con una alta relación longitud/diámetro, lo que le permite soportar cargas elevadas de manera eficiente. La función principal de las fibras en un material compuesto es aportar resistencia mecánica, rigidez y dureza, siendo estas propiedades fundamentales para su rendimiento. Sin embargo, las características mecánicas del compuesto tienden a ser anisotrópicas, es decir, varían según la dirección en la que se evalúen. Esto depende del grado de ordenamiento de las fibras dentro de la matriz: puede estar alineadas longitudinalmente, organizadas parcialmente o distribuidas al azar. El grado de orientación no solo afecta la resistencia y rigidez, sino también la capacidad del compuesto para soportar esfuerzos específicos en distintas direcciones. Además, las fibras, al ser los elementos portadores de la mayor parte de la carga en el material compuesto, determinan en gran medida su comportamiento frente a condiciones exigentes, como la tensión, flexión y compresión. La selección adecuada del tipo de fibra y su disposición geométrica es clave para optimizar el desempeño del material en aplicaciones específicas (Askeland, D., *et al.*, 2012).

2.1.6 Clasificación de los materiales híbridos

Los materiales híbridos se pueden clasificar en diferentes categorías según su composición, estructura y las interacciones químicas entre sus componentes. Los componentes químicos es un factor importante, pues la variación de alguno de ellos lleva los materiales híbridos a comportamientos fisicoquímicos distintos con propiedades sumamente diferentes (Figura 1) (Ashby y Bréchet, 2003).

Figura 1

Interacciones presentes en materiales compuestos híbridos relacionadas con su fuerza relativa



Nota. De "Materiales híbridos orgánicos-inorgánicos basados en disilanos como unidades estructurales," de M. García, 2012, Repositorio Universidad Politécnica de Valencia. De dominio público.

Existen dos tipos de híbridos que pueden sintetizarse bajo este criterio:

- Sistemas orgánicos o inorgánicos dopados

Una fase es generalmente mayor, la cual contiene a una fase minoritaria menor al 1 %.

- Sistemas orgánicos – inorgánicos o híbridos

La fracción de cada componente tienen igual magnitud o del mismo orden. Sistema en el cual uno de los componentes está presente en niveles mayores al 10 %. Además, se ha propuesto un criterio relacionado con la naturaleza del enlace químico entre la especie orgánica e inorgánica, la naturaleza de la interfase ha sido utilizada para dividir estos materiales en tres clases:

Clase I. Los compuestos orgánicos e inorgánicos están integrados en una estructura conjunta, mantenida únicamente por interacciones débiles, como puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals y un equilibrio entre características hidrófobas e hidrófilas. Esto implica que moléculas orgánicas, prepolímeros o incluso polímeros quedan encapsulados dentro de una matriz inorgánica. La síntesis de estos materiales se lleva a cabo mediante procesos de hidrólisis y policondensación de la red inorgánica en presencia de la componente orgánica, o a través de la polimerización de monómeros orgánicos dentro de materiales inorgánicos porosos. Las fases orgánica e inorgánica están unidas solo por enlaces débiles. Ejemplos de estos materiales incluyen colorantes orgánicos y biomoléculas (Morales, D., 2007).

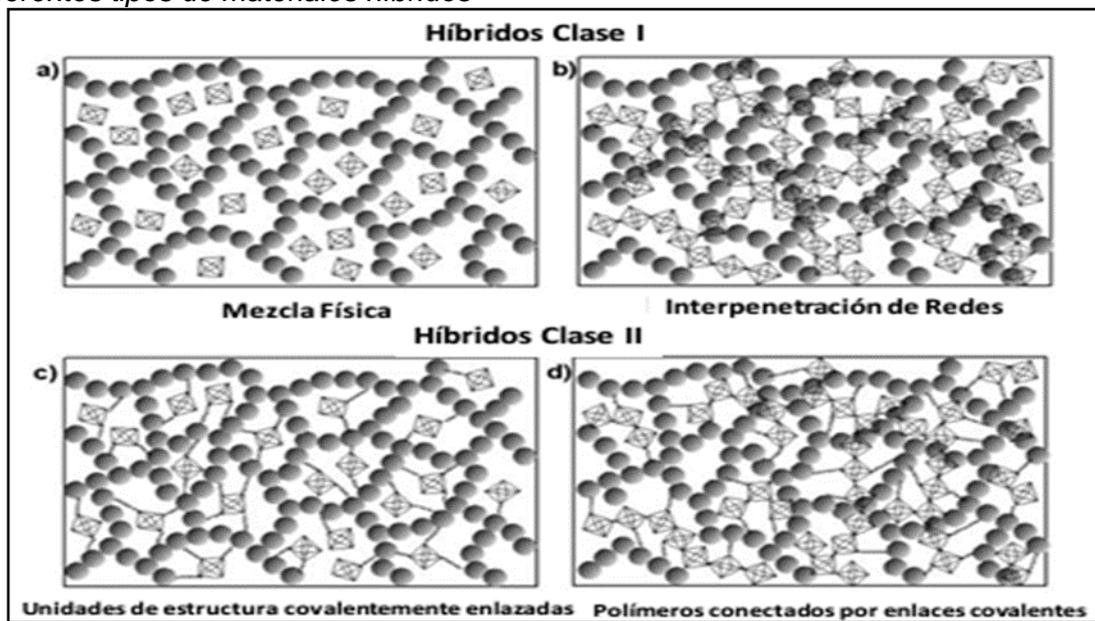
Clase II. En estos materiales, las dos fases están unidas por enlaces químicos fuertes, como enlaces covalentes o iónico-covalentes. En los materiales híbridos de clase II, los componentes orgánicos e inorgánicos también pueden interactuar mediante enlaces débiles, similares a los de la clase I. Sin embargo, la diferencia clave es que, en estos híbridos, los componentes orgánico e inorgánico se conectan mediante enlaces covalentes. Este proceso requiere precursores moleculares que posean enlaces químicamente estables, los cuales son resistentes a la hidrólisis y permiten la formación de la red inorgánica durante el proceso sol-gel, mientras mantienen la integración con la parte orgánica. Actualmente, existen muchos materiales que incorporan moléculas con este tipo de enlaces, y en algunos casos, estas moléculas incluso llegan a formar parte de la red inorgánica (Morales, D., 2007).

Clase III. Los biocompositos producidos por biomineralización natural consisten en una matriz polimérica orgánica que se refuerza con un depósito inorgánico. Por ejemplo, en algunas plantas como el arroz, tallos y hojas están reforzados con sílice amorfa, mientras que otras emplean calcio y silicio. En los huesos y dientes de mamíferos vertebrados, y en las conchas de invertebrados, el calcio es el único elemento utilizado, y en algunos casos la dragonita se alterna con una matriz inorgánica. En estos biocompositos, los depósitos minerales inorgánicos crecen *in situ* en la matriz polimérica

orgánica bajo condiciones cuasi-estáticas, controlando todo el proceso de biomineralización, que incluye etapas como la nucleación, selección de la forma, la dirección del crecimiento cristalino y la orientación cristalográfica de los minerales. Aunque estos sofisticados procesos son difíciles de replicar completamente en sistemas artificiales, ha habido múltiples esfuerzos de investigación en este campo (Morales, D., 2007). La Figura 2, muestra diferentes tipos de materiales híbridos.

Figura 2

Diferentes tipos de materiales híbridos



Nota. De "Materiales híbridos orgánicos-inorgánicos basados en disilanos como unidades estructurales," de M. García, 2012, Repositorio Universidad Politécnica de Valencia. De dominio público.

2.1.7 Fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica

Los compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra son muy atractivos para diversas aplicaciones debido a varias propiedades significativas que estos poseen, entre ellos, peso ligero, biodegradabilidad, alta resistencia, alta rigidez, gran resistencia a la corrosión y bajo coeficiente de fricción. Los materiales compuestos son uno de esos materiales en los que sus propiedades podrían alterarse cambiando los constituyentes involucrados en ellos.

Esto ayuda a construir materiales compuestos más fuertes, livianos y rentables que podrían usarse en aplicaciones como la aeroespacial, automóviles, estructuras de techos e interiores.

También son potencialmente fáciles de usar y han demostrado ser un buen refuerzo en matrices poliméricas (Peralta Godoy G.A., 2022).

Los compuestos de matriz polimérica (PMC) están compuestos por varios tipos de polímeros orgánicos que constan de fibras cortas o continuas con una variedad de agentes de refuerzo que permiten mejorar propiedades como tenacidad a la fractura, alta resistencia y rigidez.

El PMC se fabrica de tal manera que las cargas mecánicas aplicadas sean soportadas por fibras. La función de la matriz es adherir las fibras entre sí para una transferencia eficiente de carga entre ellas. Una matriz polimérica reforzada con fibras naturales consta de mayor resistencia e interfaz. Los vínculos entre ellas ayudan a mantener sus identidades químicas y mecánicas.

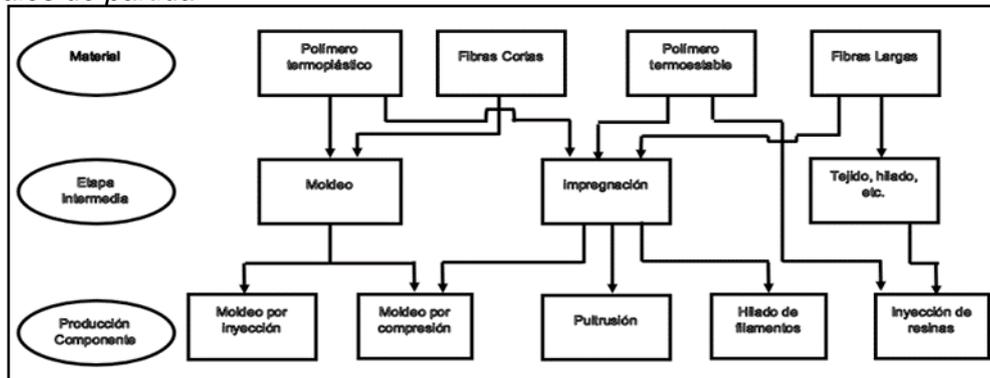
En general, las fibras son los principales elementos portadores de carga, mientras que la matriz las retiene en su lugar y en la orientación deseada, actúa como medio para transferir carga entre ellas y las protege del daño ambiental (Yashas Gowda T. G. *et al.*, 2018).

La fabricación de este tipo de materiales debe considerarse como un proceso integral, aprovechando la capacidad del material para adaptarse a formas complejas y crear estructuras completamente integradas. En algunos casos, este proceso requiere maquinaria especialmente diseñada, mientras que en otros basta con adaptar equipos ya existentes. Un desafío importante en este ámbito es la posibilidad de realizar correcciones en piezas terminadas, como mecanizado o soldadura, sin comprometer las propiedades específicas para las que fueron diseñadas. Este reto se suma a la constante necesidad de desarrollar nuevos métodos de fabricación, innovar en el uso de materias primas, perfeccionar el diseño, mejorar la caracterización y garantizar la durabilidad de los materiales compuestos (Morales, G., 2008).

En la Figura 3, se muestra en resumen los procesos de fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica.

Figura 3

Resumen de los procesos de fabricación de los materiales compuestos según los materiales de partida



Nota. Adaptado de “Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nano fibras de carbono para aplicaciones tecnológicas,” de G. Morales, 2008, Repositorio Universidad Complutense de Madrid. De dominio público.

2.1.8 Métodos de fabricación de materiales compuestos

Los materiales compuestos se clasifican según la naturaleza de sus componentes y la estructura de su matriz y refuerzo. A continuación, se presentan las principales clasificaciones:

Según la naturaleza de la matriz:

- Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC)
- Materiales compuestos de matriz metálica (MMC)
- Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC)

Según la naturaleza del refuerzo:

- Materiales compuestos con refuerzos fibrosos
- Materiales compuestos con refuerzos particulados
- Materiales compuestos con refuerzos laminados
- Materiales compuestos con refuerzos estructurales

Según la disposición del refuerzo:

- Materiales compuestos con refuerzo unidireccionales
- Materiales compuestos con refuerzo bidireccionales
- Materiales compuestos con refuerzo multidireccionales

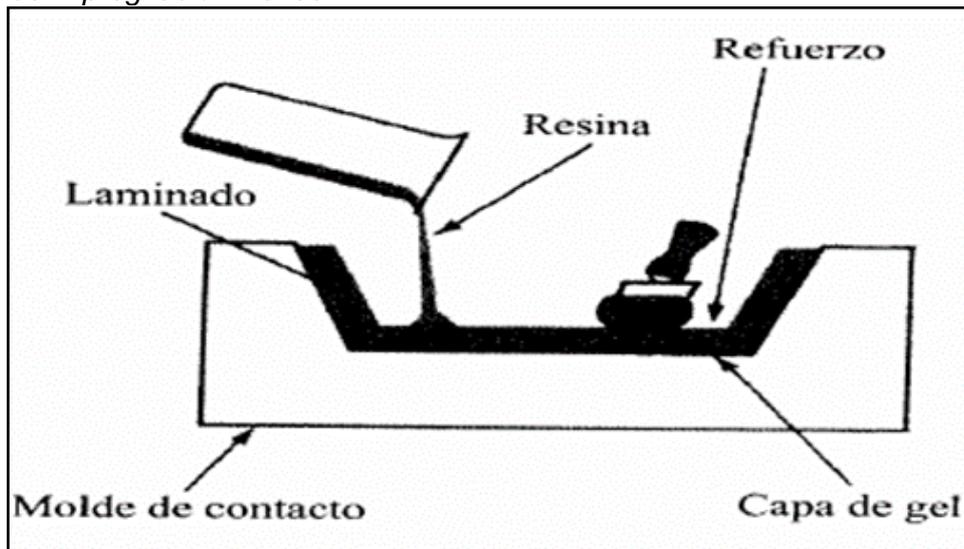
Esta clasificación ayuda a categorizar el tipo de material compuesto en función de sus componentes, ya sea en la naturaleza de la matriz o refuerzo, así como la disposición del refuerzo, proporcionando una comprensión de la diversidad y aplicaciones de estos materiales (Callister y Rethwisch, 2018).

De acuerdo con Groover (1997), los métodos por los cuales pueden fabricarse materiales compuestos en molde abierto son los siguientes.

2.1.8.1 Método de contacto manual (*Hand lay-up*). Se colocan sobre el molde filtros de fibra enrollada, mechas trenzadas y otros tejidos hechos de fibra que se impregnan con resina a brocha usando un rodillo. Se ponen capas hasta que se llegue al espesor de diseño. El moldeado cura sin calor ni presión (Figura 4).

Figura 4

Método de impregnación manual

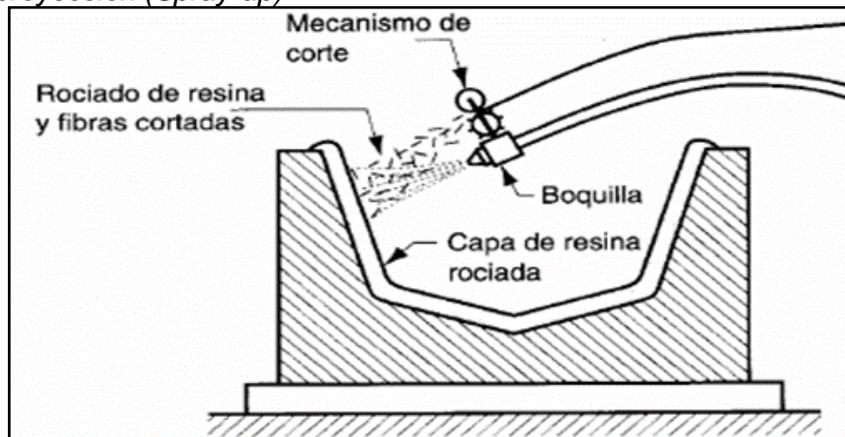


Nota. De "Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nano fibras de carbono para aplicaciones tecnológicas," de G. Morales, 2008, Repositorio Universidad Complutense de Madrid. De dominio público.

2.1.8.2 Método de proyección (*Spray-up*). Se proyectan simultáneamente hilos cortados y resina a un molde preparado, y se pasa el rodillo antes de que la resina cure (Figura 5).

Figura 5

Método de proyección (Spray-up)

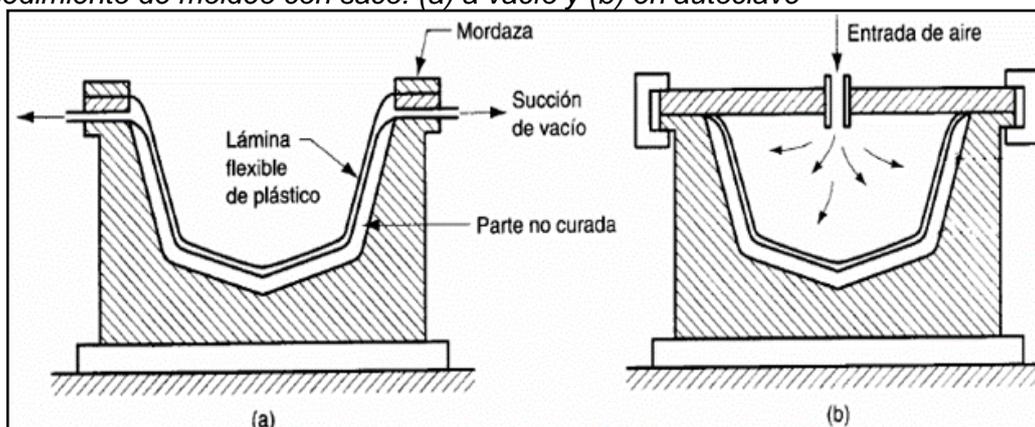


Nota. De "Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nano fibras de carbono para aplicaciones tecnológicas," de G. Morales, 2008, Repositorio Universidad Complutense de Madrid. De dominio público.

2.1.8.3 Bolsa de vacío, saco de presión, autoclave. Se impregnan capas de fibras, normalmente hojas unidireccionales, con resinas y se curan parcialmente para formar un preimpregnado (Figura 6). Las hojas de preimpregnado, se cubren con un saco flexible, y se consolidan usando vacío o presión en autoclave a la temperatura de curado requerida.

Figura 6

Procedimiento de moldeo con saco: (a) a vacío y (b) en autoclave

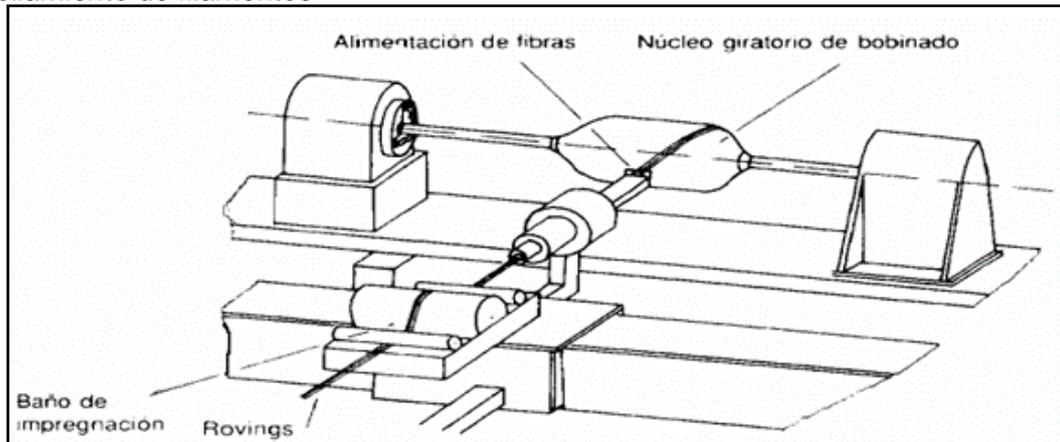


Nota. De "Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nano fibras de carbono para aplicaciones tecnológicas," de G. Morales, 2008, Repositorio Universidad Complutense de Madrid. De dominio público.

2.1.8.4 Enrollamientos de filamento (Filament winding). Mechas o hilos continuos de fibra pasan sobre rodillos y guías hasta un baño de resina, y son enrollados después, sobre un mandril (Figura 7).

Figura 7

Enrollamiento de filamentos



Nota. De "Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nano fibras de carbono para aplicaciones tecnológicas," de G. Morales, 2008, Repositorio Universidad Complutense de Madrid. De dominio público.

2.1.9 Determinación de las propiedades mecánicas

De acuerdo con Gibson (2011), las propiedades mecánicas de los materiales son claves para caracterizar el comportamiento de los compuestos. Estas son:

- **Módulo de elasticidad (E):** Relación entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica. Indica la rigidez del material, tanto en tracción como en flexión.
- **Deformación Máxima:** La máxima elongación que el material puede soportar antes de romperse. Proporciona una medida de ductilidad.
- **Tenacidad:** Capacidad del material para absorber energía y deformarse antes de fracturarse. Es crucial para evaluar el comportamiento del material ante la formación de grietas.
- **Coefficiente de Poisson:** Relación entre la contracción transversal y la elongación longitudinal cuando el material está sometido a carga.
- **Resistencia al impacto:** Mide la capacidad del material para absorber energía bajo una carga de impacto, importante para evaluar la tenacidad.
- **Resistencia a la tracción:** Capacidad del material para soportar fuerzas que tienden a estirarlo. Es una de las propiedades más evaluadas para materiales.
- **Resistencia a la flexión:** Capacidad del material para soportar fuerzas que intenten doblarlo. Es importante en aplicaciones estructurales.

- **Resistencia a la fatiga:** Capacidad del material para soportar cargas cíclicas sin fallar. Es fundamental para aplicaciones de larga duración, como componentes estructurales.

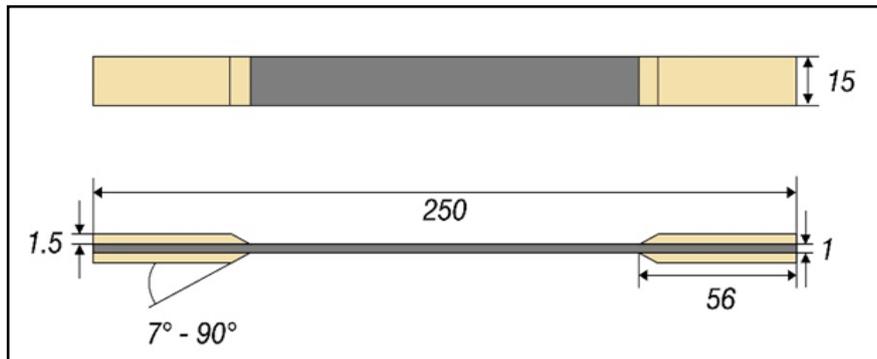
2.1.10 Tipos de ensayos mecánicos

De acuerdo con la ASTM International (2023), los tipos de ensayos más comunes en materiales compuestos son:

- **Ensayo de Tracción (ASTM D3039):** Este ensayo mide la respuesta de un material compuesto a las fuerzas de tracción, proporcionando información sobre la resistencia máxima, el módulo de elasticidad, la deformación y el comportamiento del material bajo cargas de estiramiento (Figura 8).

Figura 8

Dimensiones de probeta (mm), de acuerdo con el ASTM D3039 International, para ensayos de tracción

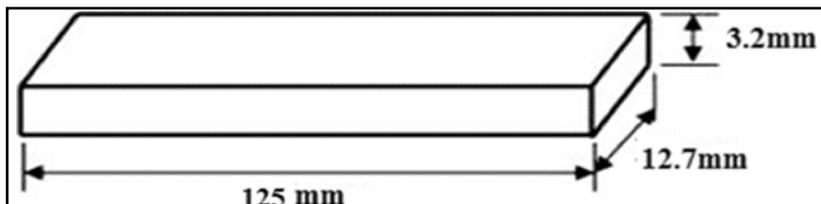


Nota. Adaptado de "ASTM D3039 Tensile Test on Composite, por Zwick Roell, 2025, <https://www.zwickroell.com/industries/composites/astm-d3039-tensile-test-on-composites/>. CC BY

- **Ensayo de Flexión (ASTM D790):** Evalúa como un material soporta cargas que inducen flexión, permitiendo obtener el módulo de flexión, la resistencia a la flexión y el punto de ruptura del material (Figura 9).

Figura 9

Dimensiones de probeta (mm), de acuerdo con el ASTM D790 internacional, para ensayos de flexión



Nota. Adaptado de "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," de ASMT International D790. De dominio público.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 *Materiales compuestos*

Un material compuesto es básicamente un sistema de materiales formado por dos o más fases distintas, cuya combinación proporciona propiedades que son diferentes y mejores a las de sus constituyentes individuales. De manera más específica, los componentes de un material compuesto se denominan: matriz y refuerzo o fase dispersa, mientras que la superficie de conexión entre estos se denomina interfaz. Además, existe la posibilidad de que se adicionen agentes de acoplamiento, rellenos y revestimientos, siendo su principal objetivo mejorar la superficie de la interfaz del composite, de tal forma que las propiedades del material se magnifiquen en lugar de verse afectadas (Dávila, L. *et al*, 2011).

2.2.2 *Materiales híbridos*

Un material híbrido, en términos generales, es el resultado de la combinación de dos o más materiales con una geometría y escala específicas, diseñados de manera estratégica para cumplir un propósito particular de manera óptima. Esta definición se puede expresar como “A + B + forma + escala”, lo que permite una amplia selección de los componentes A y B. De hecho, uno de ellos puede incluso ser un gas o un espacio vacío, lo que amplía enormemente las posibilidades de un diseño. Gracias a esta flexibilidad, es posible optimizar propiedades que no serían alcanzables con materiales monolíticos tradicionales. Se considera híbrido a cualquier sistema que combine componentes orgánicos e inorgánicos, o incluso biominerales, donde al menos uno de los elementos presentes tiene un tamaño que varía desde fracciones de nanómetros hasta decenas de nanómetros. Los materiales que forman parte de los híbridos incluyen moléculas, oligómeros, polímeros, fibras, agregados e incluso partículas. Por estas características, los híbridos suelen ser clasificados como nanocompuestos o compuestos a escala molecular, lo que resalta su capacidad de integrar propiedades únicas y personalizables en aplicaciones avanzadas. Esta definición también refleja el potencial de los materiales híbridos en el desarrollo de tecnologías emergentes, donde la combinación de

componentes en escalas nano y microscópicas permite abordar desafíos específicos en campos como la biomedicina, la electrónica y la sostenibilidad (Morales, D., 2007).

2.2.3 Fibras

Las fibras naturales están constituidas principalmente por tres tipos de fases orgánicas: celulosa, hemicelulosa, lignina y/o pectina.

Celulosa:

La celulosa es un componente presente en al menos un tercio de las plantas avanzadas: 40-60 % (en peso) de la madera seca, y más del 90% del algodón en bruto (99.9 % del algodón purificado) y del lino. Por tanto, la celulosa es sin duda el compuesto orgánico reproducible más abundante en la naturaleza. En la década de 1830, el agricultor francés Anselme Payon dio el nombre de celulosa al principal constituyente de las membranas de las paredes celulares de las plantas. Pasó algún tiempo (hasta la década de 1930) antes de que se estableciera la estructura molecular de la celulosa. La historia de la investigación sobre la estructura química de la celulosa se resume en varios libros.

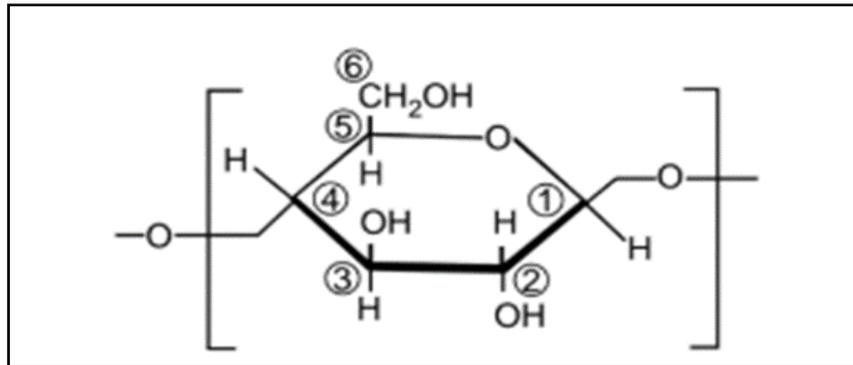
A continuación, se exponen algunos logros que contribuyeron significativamente al avance de la química de la celulosa.

- En condiciones severas, la celulosa se hidroliza mediante tratamiento con ácido sulfúrico cuantitativamente a sacáridos, que se demostró glucosa. Se demostró una fórmula empírica de la composición química de la celulosa como $(C_6H_{10}O_5)_n$,
- Los resultados del análisis de elementos (C, H, O) de las fibras de algodón, ramio y celulosa regenerada coinciden excelentemente con los valores, calculados suponiendo anhídrido de glucosa (anhidra glucosa) (C:44.4 %, H:6.2 %, O:49.4 %), (1) y (2) sugieren fuertemente que la celulosa está compuesta únicamente por una unidad de glucosa,
- A partir de la celulosa se pueden preparar ésteres o éteres trisustituidos por unidades de glucopiranosose. Por lo tanto, la celulosa tiene tres grupos hidroxilo libres por unidad de glucosa,

- La celotriosa, la celotraosa y la celohexaosa se aíslan durante el proceso de hidrólisis de la celulosa, además de la celobiosa. La existencia de oligosacáridos superiores en una molécula de celulosa apoya la teoría de la cadena larga de la celulosa,
- La trimetilcelulosa, obtenida por metilación completa de la celulosa, se descompone para dar un único tipo de trimetilglucosa. El rendimiento de la trimetilglucosa coincide bastante con el valor calculado y no se detectan tetrametil, dimetil y monometilglucosa en los productos degradados. Esto significa que los patrones de enlace químico existentes en la celulosa son de un solo tipo,
- La glucosa, descompuesta a partir de la celulosa, es de tipo β (Figura 10), lo que fue comprobado por la β -glucocidasa frente a la celobiosa,

Figura 10

Glucopiranososa unidad de celulosa



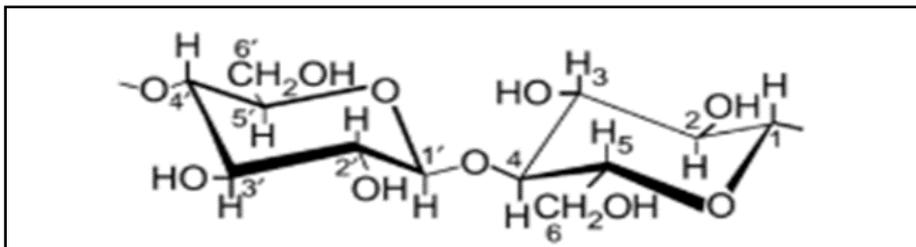
Nota. De "Cellulose and cellulose derivatives," de Kamide, K., 2005, Elsevier, De dominio público.

- La glucosa, descompuesta a partir de la celulosa, tiene una estructura de anillo de seis miembros (piranoide),

La β -glucopiranososa tiene una estructura estérica como se ilustra en la Figura 11.

Figura 11

Configuración estérica de la celulosa

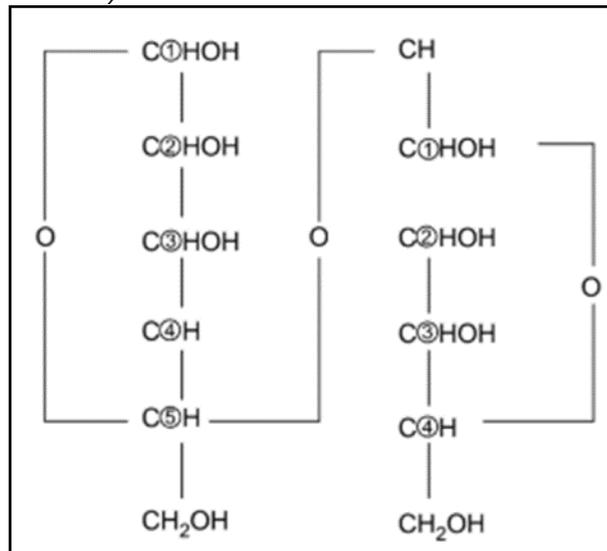


Nota. De "Cellulose and cellulose derivatives," de Kamide, K., 2005, Elsevier, De dominio público.

- La metilación completa de la celulosa produce octametilcellobiosa, que se convierte por hidrólisis en 2,3,6 trimetilglucosa y 2,3,4,6 tetrametilglucosa. Esto sugiere la posibilidad de un enlace glucósido 1:5 o glucósido 1:4. La primera se negó debido a la formación de deshidratación intramolecular de la glucosa (entre 1:5). La celobiosa, obtenida a partir de la celulosa, es β -glucosa(β -D-glucopiranos), que se combina en enlaces 1,4 - glucósidos, ver la Figura 12. La b-glucosa tiene tres grupos hidroxilo libres en las posiciones 2, 3 y 6. Obsérvese que una de las unidades finales de la celulosa metilada debe contener un grupo metilo más que las unidades que componen la cadena, y entonces debe formarse una pequeña cantidad de tetrametilglucosa en la hidrólisis, además de trimetilglucosa (Kamide, K., 2005).

Figura 12

Celulosa: (β -D-glucopiranos)



Nota. De "Cellulose and cellulose derivatives," de Kamide, K., 2005, Elsevier, De dominio público.

Hemicelulosa

La hemicelulosa es una gran familia de polisacáridos presentes en las paredes celulares primarias y secundarias de todas las plantas terrestres, plantas de agua dulce y algunas algas marinas. Ha ganado una atención significativa en el desarrollo de materiales poliméricos funcionales basados en hemicelulosa debido a sus características distintivas, como respeto al medio ambiente, renovabilidad y biodegradabilidad. Estudios recientes se

han centrado en el aislamiento, la caracterización estructural y la modificación química de la hemicelulosa y la preparación de materiales basados en hemicelulosa. Esta revisión, elabora exhaustivamente la preparación de materiales poliméricos funcionales basados en hemicelulosa a través de la modificación química, incluidas las estructuras y propiedades; estrategias de diseño para aprovecharla; y varias formas de materiales poliméricos funcionales basados en este componente, como nanopartículas, películas y recubrimientos, hidrogeles y aerogeles, puntos cuánticos de carbono, carbonos porosos y catalizadores. Este estudio también proporciona una actualización sobre los materiales funcionales basados en hemicelulosa, con un enfoque en su liberación controlada, adsorción, biodetección, empaquetado, conversión catalítica y aplicaciones de electrodos. Se destacan brevemente las perspectivas futuras sobre los desafíos y las oportunidades en el campo de investigación de la hemicelulosa (Rao, J. *et al.*, 2023).

Lignina

La lignina es un heteropolímero complejo, pero su fórmula química más comúnmente citada es $C_{18}H_{24}O_9$. Este compuesto está formado principalmente por unidades de monolignoles que incluyen el alcohol p-cumarílico, entre otros. Es importante tener en cuenta que la estructura puede variar debido a su naturaleza polimérica.

Los estudios sobre la estructura de la lignina y su ingeniería están inextricable y bidireccionalmente vinculados. Las perturbaciones de los genes en la ruta biosintética de la lignina pueden dar lugar a cambios sorprendentes en la composición y la estructura que, a su vez, sugieren nuevos enfoques para alterar la lignina e incluso "diseñar" el polímero para mejorar su valor o con vistas a su eliminación más sencilla de los polisacáridos de la pared celular. Los estudios estructurales básicos sobre diversas ligninas nativas refinan cada vez más nuestro conocimiento de la estructura de la lignina, y examinar las ligninas en diferentes especies revela hasta qué punto la evolución y la variación natural han dado lugar a la incorporación de monómeros fenólicos "no tradicionales", incluidos fenólicos de más allá de la ruta biosintética del monolignol. Como resultado, la propia definición de lignina sigue expandiéndose y perfeccionándose (Ralph, J. *et al.*, 2019).

Pectina

La pectina es un polímero compuesto de carbohidratos de alto peso molecular que está presente en prácticamente todas las plantas, donde contribuye a la estructura celular. El término pectina abarca una serie de polímeros que varían según su peso molecular, configuración química y contenido de azúcares neutros, y diferentes tipos de plantas producen pectina con diferentes propiedades funcionales. La palabra "pectina" proviene del griego *pektos*, que significa "firme y duro", lo que refleja la capacidad de la pectina para formar geles. Las propiedades gelificantes de la pectina se conocen desde hace siglos, pero el aislamiento de la pectina comercial solo comenzó a principios del siglo XX (Flutto, L., 2003).

La pectina es un heteropolisacárido de alto peso molecular presente en las paredes celulares de las plantas, donde contribuye a la firmeza y estructura del tejido vegetal. La pectina se utiliza ampliamente como ingrediente alimentario debido, principalmente, a su capacidad para impartir textura y firmeza a los productos alimenticios (hidrogeles), aunque otros usos recientes interesantes también están relacionados con otras propiedades de la pectina, como la actividad interfacial. Se presenta una visión general de la pectina y los geles de pectina, incluidas las técnicas experimentales más recientes utilizadas para caracterizar las propiedades de la pectina y las relaciones textura-estructura en los hidrogeles de pectina (De Cindio, B. *et al.*, 2015).

Fibra de Maguey

La fibra de Maguey es un material natural extraído de las hojas de las plantas del género *Sisal* (*Agave Sisalana*) ver Figura 13. Este tipo de fibra es conocido por su resistencia mecánica, durabilidad y versatilidad en aplicaciones industriales y artesanales. Sus principales propiedades son: Alta resistencia a la tracción, moderada elasticidad y flexibilidad, además resistencia al ataque de microorganismos y degradación (Pérez y Rodríguez, 2020).

Adicionalmente, estas fibras presentan una variación en su finitud que se relaciona con la estructura de las fibras, debido a la creación de número determinado de fibras, que no necesariamente son idénticas en todos los puntos (Paisig, B., 2024).

El sisal tiene un alto contenido de sustancias distintas de la celulosa (Mühlethaler, K., 1949), como indica el siguiente análisis típico de peso seco.

Celulosa . . .	40-50 %
Lignina . . .	20-30 %
Hemicelulosa . . .	10-30 %

Figura 13

Fibra de Maguey, material natural extraído de las hojas de las plantas del género Sisal (Agave Sisalana)



Fuente: Elaboración propia.

Fibra de Chambira

La fibra de Chambira proviene de la planta *Astrocaryum chambira* ver Figura 14, una palma nativa de la amazonia. Es una fibra natural reconocida por su resistencia a la flexibilidad. Sus principales propiedades son: Alta resistencia mecánica, resistencia al desgaste y a condiciones ambientales extremas, textura suave y aspecto brillante (Gómez y Fernández, 2019).

La fibra de chambira, que posee un elevado porcentaje de celulosa (93.9 %), se obtiene de una palmera de tallo de hasta 30 m de alto, está compuesta de agujones negros, de hasta 20 cm de longitud, agrupados en forma de anillos. Además, presenta proporciones reducidas de lignina (4.2 %), y posee una elevada tracción, la fibra comercial

muestra una forma acintada-aplanada de tonalidad crema adaxial uniestratificada de células redondas con paredes internas delgadas y cutículas estrechas (Palacios, M., 2023).

Figura 14

*Fibra de Chambira proviene de la especie *Astrocaryum chambira**



Fuente: Elaboración propia.

Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es un material sintético compuesto por filamentos extremadamente finos de vidrio. Es uno de los refuerzos más utilizados en materiales compuestos debido a su excelente relación propiedades – mecánicas y *coste*. Utilizada en la fabricación de productos como piezas aeronáuticas y automotrices (Smith y Jones, 2021).

La fibra de vidrio es el material de refuerzo, por excelencia, para los *composites*. Cuyos principales beneficios incluyen su bajo costo, alta resistencia a la tracción, excelente resistencia química y destacadas propiedades como aislante. Para optimizar sus propiedades mecánicas y tribológicas, se han desarrollado diversas presentaciones de fibra de vidrio, tales como fibras largas en orientación longitudinal, tejidos y filamentos cortados, los cuales se integran en la matriz polimérica (Nikforooz, M., *et al.*, 2018).

2.2.4 Resinas

Las resinas son polímeros naturales o sintéticos generalmente denominados termoestables, que, en su estado inicial, tienen una consistencia viscosa o sólida. Poseen la capacidad de endurecerse mediante procesos químicos o físicos, lo que les permite formar estructuras rígidas y resistentes. Estas sustancias se utilizan ampliamente como

componente clave en la fabricación de materiales compuestos, adhesivos, recubrimientos, pinturas y barnices, debido a su versatilidad y propiedades mecánicas (Ashby y Johnson, 2014).

Las resinas actúan como matrices en materiales compuestos, ya que permiten la integración y el refuerzo de otros componentes, como fibras o partículas, para mejorar las propiedades mecánicas, térmicas y químicas del producto final. Su capacidad para proporcionar cohesión, protección y distribución de esfuerzo en aplicaciones estructurales las convierte en un material indispensable en diversos sectores industriales (Callister y Rethwisch, 2020).

Clasificación de las resinas

Resina poliéster

La resina poliéster es un polímero termoestable ampliamente utilizado en la fabricación de materiales compuestos debido a su versatilidad, bajo costo y propiedades mecánicas satisfactorias. Este tipo de resina es conocida por su capacidad para curarse a temperatura ambiente mediante la reticulación, un proceso químico que transforma la resina líquida en un sólido rígido y termoestable. La resina poliéster se utiliza frecuentemente en combinación con refuerzos como fibra de vidrio, carbono o aramida para producir materiales reforzados de alta resistencia. Igualmente, se utilizan catalizadores como el peróxido de metiletilcetona (MEKP) o el peróxido de benzoilo para iniciar el proceso de polimerización (Haro y Ramírez, 2024).

Resina epoxi

La resina epoxi se clasifica como uno de los polímeros termoestables que contiene grupos epóxidos (C_2H_4O) en su estructura molecular, lo que señala que pasa de un estado líquido a sólido mediante la aplicación de un agente endurecedor, también conocidos como curantes o catalizadores, formando estructuras tridimensionales. La resina epoxi ofrece avances en las propiedades mecánicas, como elevada resistencia y alta función de aislamiento eléctrico y térmico (Palacios, M., 2023). Las características de las resinas mencionadas se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6*Resumen de las características de las resinas*

Propiedad	Poliéster Insaturado	Resina Epoxi	Resina Fenólica	Resina Vinil éster	Resina Poliimida
Densidad (g/cm ³)	1.17-1.26	1.17-1.25	1.25-1.3	1.17-1.25	1.27-1.42
Alargamiento (%)	< 3	6-8	< 3	3.5 – 7	6-10
Fluencia	Muy baja				
Temperatura de Moldeo (°C)	T _{amb} hasta 180	T _{amb} hasta 170	150-190	T _{amb} hasta 175	< 150
Temperatura de Reblandecimiento	80 – 160	80 – 130	100 – 150	100 – 150	260
Propiedades reológicas	Muy buenas				Función de la resina
Calor de reacción	Reacción exotérmica dependiente de la geometría de la pieza				
Contracción de fraguado (%)	6 – 10	1 – 3	0.5 – 1.5	0.1 – 1	0.5 – 0.7
Contracción posterior (%)	Hasta 3	Prácticamente ninguna	Hasta 0,4	Hasta 1	Casi ninguna
Resiste a:	Agua, soluciones acuosas, fuel, gasolina	Alcohol, gasolina, benzol, aceites y grasas	Alcohol, gasolina, benzol, aceites y grasas	37% HCl, ClO ₂ , agua salina, alquitranes	-
No resiste a:	Agua hirviendo, ácidos y lejías, benzol y alcohol	Agua hirviendo, ésteres, ácidos y bases, cetonas	Ácidos y bases concentradas	H ₂ SO ₄ al 75%, NaCl al 6%, NaOH al 15%, agua hirviendo	-
Inflamabilidad	No autoextinguible	Difícilmente inflamable, después arde	Difícilmente inflamable	No autoextinguible	-

Nota. De "Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nano fibras de carbono para aplicaciones tecnológicas," de: G. Morales, 2008, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, España.

2.2.5 Residuos siderúrgicos

En los últimos años, se está produciendo un rápido crecimiento del sector industrial y, debido a ello, la cantidad de subproductos producidos por las empresas siderúrgicas aumenta exponencialmente. Esto da lugar a un gran problema con su eliminación y si no se gestiona adecuadamente puede causar desequilibrios medioambientales (Erdogan, A., *et al.*, 2019). Los residuos siderúrgicos son una clase específica de residuos producidos en las operaciones siderúrgicas y que pueden poseer un valor económico potencial si se tratan de manera correcta (Gómez M., M. C., 2008). Entre los más conocidos se tiene: escorias y polvos de hornos eléctricos de arco y básico de oxígeno, lamas de convertidor

Linz Donawitz-LD, finos de coquería, escorias de alto horno, de fundición, de acería eléctrica, Linz Donawitz-LD, de horno básico de oxígeno (Rodríguez R. C. S, 2023).

De acuerdo con Gómez (2008), los residuos provenientes de la siderurgia constituyen un tipo particular de subproducto generado durante las actividades siderúrgicas, los cuales pueden adquirir un valor económico significativo si se reinsertan al sistema productivo. La clasificación de los residuos siderúrgicos se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Clasificación de residuos siderúrgicos

Tipo de residuo	subcategoría	Ejemplo	Descripción
Sólido	Escorias	Escoria de alto horno Escoria siderúrgica	Subproducto formado durante el proceso de fundición, consistente a una mezcla de óxidos metálicos y dióxido de silicio
	Polvo y lodo	Polvo y lodo de alto horno Polvo y lodo de acería Polvo y lodo de sinterización	Partículas finas recogidas de los sistemas de limpieza de gases, que contienen hierro y otros óxidos metálicos.
	Cascarilla de molino	Pellets de laminación	Capa de óxido de hierro que se forma en la superficie del acero durante los procesos de laminación en caliente.
	Otros residuos sólidos	Materiales refractarios Chatarra metálica	Revestimientos refractarios desgastados y desechos metálicos generados durante el mantenimiento y la producción.
Líquido	Aguas residuales aceitosas	Efluentes de laminador	Aguas residuales contaminadas con aceites y grasas procedentes de las operaciones de laminación.
	Aguas residuales ácidas	Licor de decapado	Soluciones ácidas utilizadas en los procesos de decapado para eliminar las incrustaciones de las superficies de acero.
Gaseoso	Gases de proceso	Gas de alto horno Gas de horno de oxígeno básico Gas de coquería	Subproductos gaseosos generados durante varias etapas de la producción de acero, a menudo utilizados como combustible dentro de la planta.

Nota. De "Destination of the waste generated by a steelmaking plant: A case study in Latin America". De Sellito y Murakami, 2018, Aestimum, pp.131-140.

Escoria de acería

Las escorias son subproductos no deseados de la fabricación del acero y se originan a partir de soluciones iónicas de óxidos y fluoruros metálicos fundidos que flotan total o parcialmente sobre el acero líquido. Las escorias juegan un papel positivo o negativo en la industria de fabricación de acero. Por ejemplo, los óxidos como SiO₂, Al₂O₃ y azufre se consideran escorias que degradan la calidad del acero. La escoria juega un papel importante durante la fabricación de acero porque protege al metal de la oxidación y la

absorción de nitrógeno e hidrógeno al aislar el acero líquido para minimizar la pérdida de calor. La escoria también es compatible con el revestimiento refractario. La fundición secundaria de chatarra de acero normalmente selecciona elementos desoxidantes de acuerdo con el mejor resultado de calidad de los productos de acero. El alto nivel de elementos tóxicos en la escoria de acería no se tolera porque puede contaminar el suelo durante la estación húmeda, lo que contamina el suelo y las aguas subterráneas (Kilic *et al.*, 2011). Es vital reducir los niveles de toxicidad en la escoria, estableciendo principios que promuevan una producción no contaminante con el objetivo de producir materiales libres de tóxicos durante los procesos de reciclaje (Gomes *et al.*, 2011) (Bolokang, A. S., 2019).

La escoria de acería es un material de tipo granular, de color gris claro en estado seco que tiene una cierta porosidad y textura rugosa. Las partículas tienen forma cúbica, con escasa presencia de lajas. La escoria de acería, específicamente la escoria, se origina en el proceso de afinado del arrabio obtenido en el alto horno. Este proceso implica la eliminación de impurezas mediante oxidación, resultando en la formación de escoria a partir de los materiales no deseados. La escoria surge durante el proceso de afino del arrabio alimentado al horno alto y sus nombres van variando, dependiendo del reactor del cual es excretado, o sea de donde se eliminan, total o parcialmente, las impurezas presentes mediante oxidación (Andrés, S. *et al.*, 2011).

Cascarilla de acero

Las cascarillas de acero es un subproducto industrial generado durante los procesos de laminación en caliente del acero. Este material es el resultado de la oxidación superficial del acero cuando se encuentra a altas temperaturas, típicamente superiores a 1000 °C, durante su conformado mecánico. En estas condiciones, el acero reacciona con el oxígeno presente en el aire, formando una capa superficial de óxidos metálicos que se desprende debido a las tensiones mecánicas y térmicas experimentadas en el proceso. Este residuo, compuesto mayoritariamente por óxidos de hierro como hematita (Fe_2O_3),

magnetita (Fe_3O_4), y wustita (FeO), tiene una apariencia granular o escamosa, con un color que varía del gris oscuro al negro (Rodríguez R.C.S., 2023).

2.2.6 Ensayos mecánicos

Son procedimientos experimentales utilizados para medir y caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales. Estos ensayos proporcionan información sobre la resistencia, la rigidez, la ductilidad y otros comportamientos bajo diferentes tipos de carga, como tracción, compresión, flexión y fatiga. Los resultados de estos ensayos son cruciales para el diseño y evaluación de materiales especialmente en los materiales compuestos (Mallick, 2007).

Sumado a esto los ensayos mecánicos son esenciales en la evaluación de la calidad y el desempeño de los materiales, ya que permiten predecir cómo se comportarán en condiciones reales de uso. Además, los ensayos proporcionan los datos necesarios para la validación de modelos teóricos y para la optimización de procesos de fabricación de materiales compuestos (Mishnaevsky y Brøndsted, 2009).

2.2.7 Métricas de evaluación de modelos estadísticos

Las métricas que se utilizaron para analizar los modelos estadísticos (regresión lineal múltiple y análisis de varianza (ANOVA), fueron:

- **R^2 (*R-squared*):**

Representa la proporción de la varianza en la variable dependiente que es explicada por las independientes del modelo.

Su valor oscila entre 0 y 1, donde un valor más alto indica un mejor ajuste del modelo a los datos,

- **R^2 ajustado (*Adj. R-squared*):**

Es una versión modificada del R^2 que ajusta el valor en función del número de predictores en el modelo.

A diferencia del R^2 , este solo aumenta si las variables añadidas mejoran la capacidad explicativa del modelo,

- **Estadístico F (*F-statistic*):**

Mide la significancia global del modelo de regresión. Evalúa si al menos una de las variables independientes tiene una relación significativa con la dependiente. Un valor de F más alto sugiere una relación más fuerte,

- **Probabilidad de estadístico F (*Prob(F-statistic)* o *p – value*):**

También conocido como p-valor asociado a la prueba F, indica si el modelo de regresión es estadísticamente significativo. Un valor inferior a 0.05 sugiere que el modelo explica una parte significativa de la varianza en la variable dependiente,

- **Criterio de Información de Akaike (AIC):**

Métrica utilizada para comparar diferentes modelos estadísticos, donde valores más bajos indican un mejor ajuste con un menor número de parámetros. Penaliza el sobreajuste y equilibra la complejidad del modelo con su calidad de ajuste,

- **Criterio de Información Bayesiano (BIC):**

Similar al AIC, pero aplica una penalización más estricta a los modelos con más parámetros. Se usa para la selección de modelos, donde un valor más bajo indica un mejor equilibrio entre ajuste y complejidad del modelo, y

- **Número de condición (Cond. N°):**

Es una medida diagnóstica que evalúa la presencia de multicolinealidad en los modelos de regresión. Un número de condición alto (generalmente mayor a 30) sugiere que las variables independientes están altamente correlacionadas, lo que puede generar inestabilidad numérica y estimaciones poco confiables en los coeficientes del modelo.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

La metodología de trabajo involucró la colecta de las fibras de maguey y el procesamiento mecánico de dos tipos de residuos siderúrgicos: escorias de acería y cascarilla de acero.

3.1 Colecta de las materias primas

Las fibras de chambiras fueron traídas completamente limpias y secas al laboratorio de Hornos y Combustibles vía carrozable desde Iquitos Loreto, Perú con un peso total de 4 kg. Para el caso de las fibras de maguey, estas tuvieron que extraerse de las pencas de maguey que fueron colectados el 20 de abril de 2024, en un total 34 pencas frescas y traídos del Centro Poblado Mata chico Distrito y Provincia de Jauja y Departamento de Junín, Perú.

Unos 13 kg de muestra de escoria de acería procedente del horno eléctrico de infusión de manufactura de acero al manganeso, así como, aproximadamente 10 kg de cascarilla de acero procedente del tratamiento térmico de la empresa Metalurgia del Fierro y Cobre - MEFICO SAC, situada en la Av. Manco Cápac Manzana X, Lote 2 y 3, Anexo 22, Jicamarca, San Antonio, Huarochirí, Lima – Perú. Ambas muestras fueron tomadas el 01 de abril de 2024 de los respectivos botaderos de residuos de la mencionada fundición MEFICO SAC. También se contó con una muestra de aproximadamente 5 kg de cascarilla de acero de una cosecha del 31 de diciembre del año 2022 para efectos de caracterización y potencial uso como relleno de base polimérica.

3.2 Procesamiento de las materias primas

3.2.1 *Maguey y fibras de Chambira*

Cada una de las pencas de maguey fueron codificadas, desde A1 hasta A34, para luego de ser pesadas. Se midieron tanto su longitud, ancho como espesor usando una cinta métrica de 5 m, para estimar su volumen y el rendimiento de la extracción de sus respectivas fibras, así como la densidad real como aparente de las pencas y fibras de maguey respectivamente.

Las fibras de maguey fueron extraídas de la penca de esta especie vegetal, según los siguientes pasos. Ver Figura 16.

(a) se realizaron incisiones paralelas a la dirección de crecimiento de las fibras de tal forma que estas se retiren enteras, esto mediante el uso de instrumentos punzocortantes,

(b) se procedió a ablandarlas usando cantos rodados y martillos de goma en una laminadora de madera de superficie limpia, después

(c) se retiró el jugo o néctar de la penca en un balde o lavatorio exprimiéndolo de sus fibras y pulpa, luego

(d) se procedió con el cepillado usando escobillas de cerdas duras (polímero o acero), seguidamente

(e) se pesó la fibra, y, por último

(f) secarlos al ambiente en un cordel o tendadero.

La Figura 15 y 16 muestra los trabajos de codificación y toma de medidas, además la separación de la pulpa de la fibra en las pencas de maguey.

Figura 15

Codificación y toma de medidas a las pencas de maguey



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16

Preparación mecánica de las fibras de maguey en el Laboratorio de Hornos y Combustibles de la FIGMM UNI



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

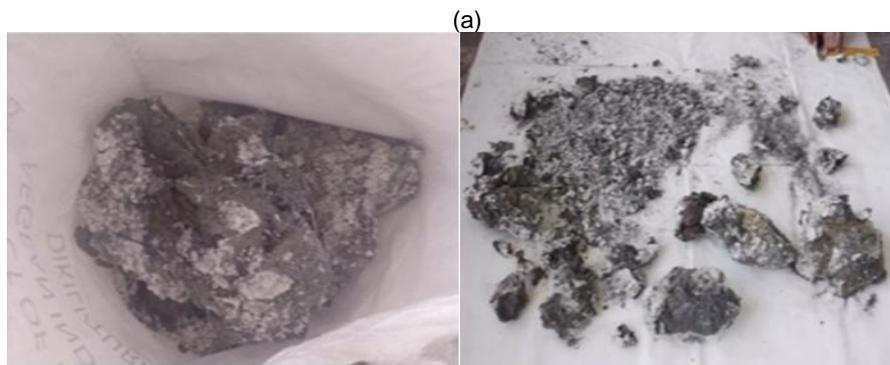
3.2.2 Escorias de acería

El procesamiento de la muestra de escoria de acería siguió los siguientes pasos: (a) las fracciones de partículas oscilaban entre 1 y 30 cm de diámetro, por ello se utilizaron cantos rodados para reducir su tamaño, (b) como fueron observadas gotículas de acero

fundido con tamaños de grano entre 0.5 y 5 cm de diámetro, se procedió a tamizarlo usando una malla ASTM # 10, después (c) se tuvieron submuestras por el método del cuarteo y finalmente (d) solamente la fracción granulométrica 100% -10m de la muestra representativa fue molida usando un molino de bolas de Bond de 12" x 12" hasta alcanzar la granulometría de 100% -m100. Ver Figura 17, preparación mecánica de la escoria de acería.

Figura 17

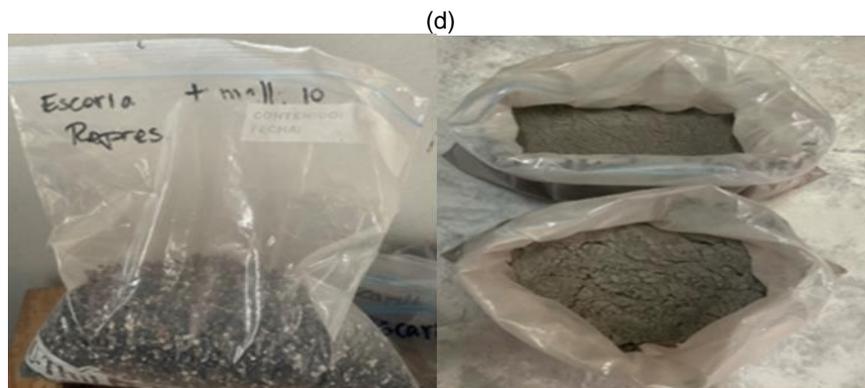
Preparación mecánica de las escorias de acería realizado en el Laboratorio de Hornos y Combustibles de la FIGMM UNI



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Cascarilla de acero

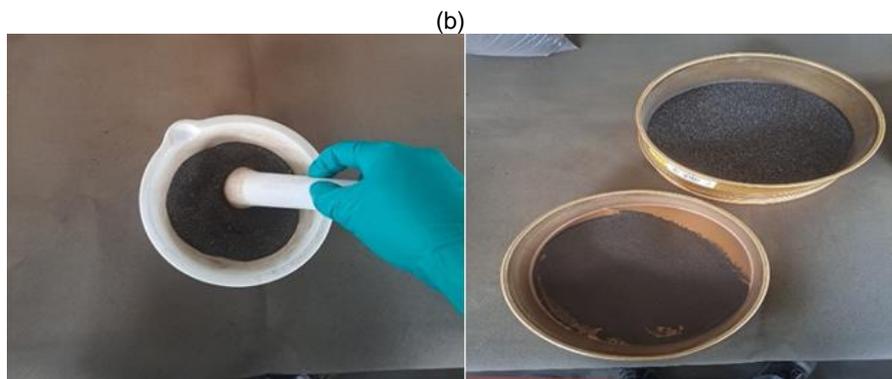
Análogamente, el procedimiento de la muestra de cascarilla de acero abordó las siguientes etapas: (a) se procedió a reducir de tamaño el tamaño de partícula usando guijarros o cantos rodados, (b) luego molido en morteros de porcelana o molinos de bolas de laboratorio de 1" x 1" hasta obtener un tamaño de partícula 100% -m100, y finalmente (c) muestras representativas por el método del cuarteo. La Figura 18, muestra el procesamiento correspondiente.

Figura 18

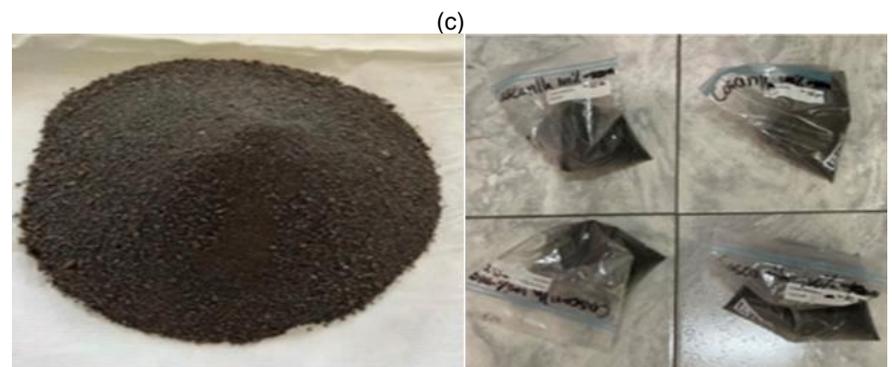
Preparación mecánica de las escorias de acería realizado en el Laboratorio de Hornos y Combustibles de la FIGMM UNI



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

3.3 Determinación de propiedades físicas de las materias primas

Se determinaron las propiedades físicas de tanto las fibras de maguey, tales como densidad real y aparente, % extracción de fibra de la penca de maguey (húmedo y seco), así como, la densidad real del néctar de maguey. Las muestras de chambira solo fueron usadas para determinación de la densidad aparente.

Asimismo, se determinaron las propiedades físicas, tales como densidad real (método de la fiola), densidad aparente, porosidad, para cada fracción granulométricas (100% -10m) y 100% +10m), previamente clasificada, para el caso de las escorias de acería, sin embargo, se realizaron todos estos controles para una única fracción granulométrica (100% -10m). Finalmente, se determinaron algunas propiedades físicas de tanto las escorias de acería como las cascarillas de acero según norma ASTM C20 para partículas sólidas, de acuerdo con las ecuaciones presentadas en la tesis de Rodríguez R. C, (2023).

3.3.1 Cálculo de la densidad real

Se determinó la densidad real (D_r) de la muestra de escoria de acería como de cascarilla de acero de granulometría 100% -100 m utilizando el método de la fiola. La fórmula utilizada para este efecto se presenta en la ecuación (1).

$$Dr\left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{M-P}{(S+M)-(W+P)} \quad (1)$$

Donde:

P: Peso de la fiola

M: Peso de la fiola más el peso del mineral

W: Peso de la fiola más el peso del mineral más peso del agua

S: Peso de la fiola más el peso del agua.

3.3.2 Cálculo de la densidad aparente

La densidad aparente (D_a) es el cociente entre la masa de producto y el volumen aparente del mismo (volumen incluyendo los huecos entre los granos). Este procedimiento

será aplicable a ambos residuos siderúrgicos (muestras de escoria de acería como de cascarilla de acero de granulometría 100% -100 m).

3.3.3 Cálculo de la porosidad

La porosidad es el cociente entre la diferencia de la densidad real (D_r) menos la densidad aparente (D_a) y la densidad real (D_r), expresada en porcentaje, como se puede observar en la Ecuación 2.

$$Porosidad = \left[1 - \frac{D_a}{D_r}\right] \times 100 \quad (2)$$

Donde:

D_a es la densidad aparente y

D_r es la densidad real

3.4 Análisis de proximidad o inmediato de carbones

El análisis de proximidad o inmediato de carbones sirve para determinar el porcentaje de humedad, material volátil, cenizas y carbón fijo de las muestras de fibras de maguey y chambira. Se usaron las normas correspondientes de acuerdo con el procedimiento y ecuaciones descritas en Subba Rao, (2016). Para ello se trabajó con las muestras tamizadas a 100% -100m.

3.4.1 Determinación de la humedad

Los crisoles y aproximadamente 1 g de 100% -72 m BS de muestra se pesaron por triplicado.

Las muestras se colocaron en crisoles de cerámica de 20 mL de capacidad máxima y se calentaron en un horno tipo mufla FUNDINORT SAC a 105 – 110 °C durante 1 h. A continuación, se extrajeron los crisoles, para luego enfriarlos en un desecador y pesarlos. La pérdida de peso entre el peso inicial de la muestra más crisol menos el peso de la muestra más el crisol después del calentamiento es el peso de la humedad. Este cálculo se puede observar en la Ecuación 3.

$$\%Humedad = \frac{Peso\ de\ la\ humedad}{Peso\ de\ la\ muestra\ original} \times 100 \quad (3)$$

3.4.2 Determinación de material volátil

Se pesó aproximadamente 1 g de 100 % -72m B.S de muestra por triplicado. Estas experiencias se realizaron en crisoles de cerámica de 20 mL de capacidad máxima con tapas. Cada uno de los tres crisoles se colocó en el horno tipo mufla FUNDINORT SAC previamente calentado entre 925 a 950 °C, durante 7 min. Los crisoles de cerámica se sacaron del horno y se colocaron sobre un ladrillo refractario para que se enfriaran rápidamente. Después, se dejaron enfriar al aire libre para luego pesarlos con muestra. La pérdida de peso entre el peso inicial y los pesos después de esta experiencia, determinaron el % materia volátil más % humedad (Ecuación 4).

$$\% \text{ Materia volátil y humedad secada al aire} = \frac{\text{Peso de la materia volátil y la humedad seca al aire}}{\text{Peso de la muestra original}} \times 100 \quad (4)$$

El porcentaje de materia volátil se calculó a partir de la diferencia entre los resultados de la Ecuación 5 y 4, tal como se muestra en la Ecuación 5.

$$\% \text{ Materia volátil} = \% \text{ Material volátil y humedad secada al aire} - \% \text{ Humedad secada al aire} \quad (5)$$

3.4.3 Determinación de cenizas

Se pesó aproximadamente 1 g de 100% -72m B.S de muestra por triplicado. Los crisoles de cerámica de 20 mL de capacidad máxima se colocaron dentro del horno tipo mufla FUNDINORT SAC, previamente calentado a 500 °C por 30 min, seguido de un tratamiento térmico a 825 °C por otros 60 min. Los crisoles permanecieron dentro del horno por hasta 5 h, para garantizar la pérdida completa del material volátil. De manera análoga, los crisoles se dejaron enfriar con muestras al aire libre para luego pesarlos. La pérdida de peso entre el peso inicial y los pesos después de esta experiencia, determinan el % cenizas a través de la Ecuación 6.

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{Peso de la ceniza}}{\text{Peso de la muestra original}} \times 100 \quad (6)$$

3.4.4 Determinación del carbón fijo

De acuerdo con Subba Rao (2016), el carbón fijo es el carbono total más el carbón presente en la materia volátil; por ejemplo, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, hidrocarburos, etc. El carbono total siempre es mayor que el carbono fijo en cualquier carbón. El carbono fijo no se determina directamente; simplemente es la diferencia entre 100 y la suma de los otros componentes, tal como se observa en la Ecuación 7.

$$\% \text{ Carbon fijo} = 100 - (\% \text{ Humedad} + \% \text{ Materia volatil} + \% \text{ Cenizas}) \quad (7)$$

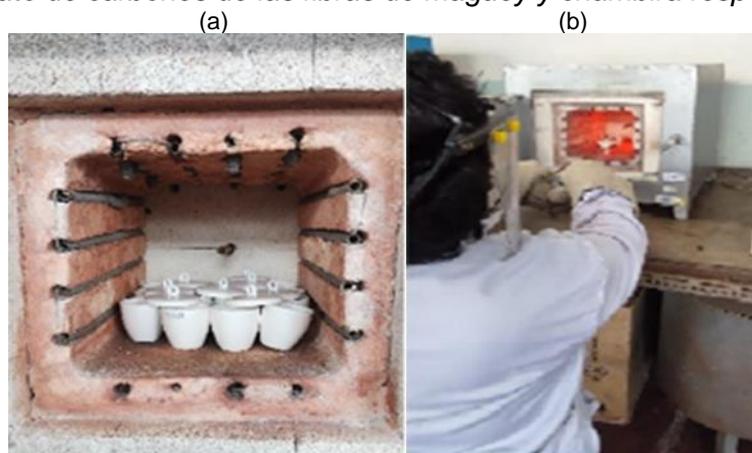
Los pasos para analizar el inmediato carbono de las fibras de maguey y chambira fueron de la siguiente manera:

- (a) Los crisoles de cerámica de 20 mL de capacidad máxima se colocaron en el horno tipo mufla FUNDINORT SAC, previamente calentado entre 925 a 950 °C,
- (b) Se prosiguió a determinar % cenizas, para lo cual los crisoles permanecieron dentro del horno por hasta 5 h, esto garantiza la pérdida completa del material volátil, además los crisoles se dejaron enfriar al aire libre para luego pesarlos, adicional a ello:
- (c) La determinación del carbón fijo y finalmente:
- (d) Muestras de cenizas de fibras de maguey y chambira después del análisis de carbonos.

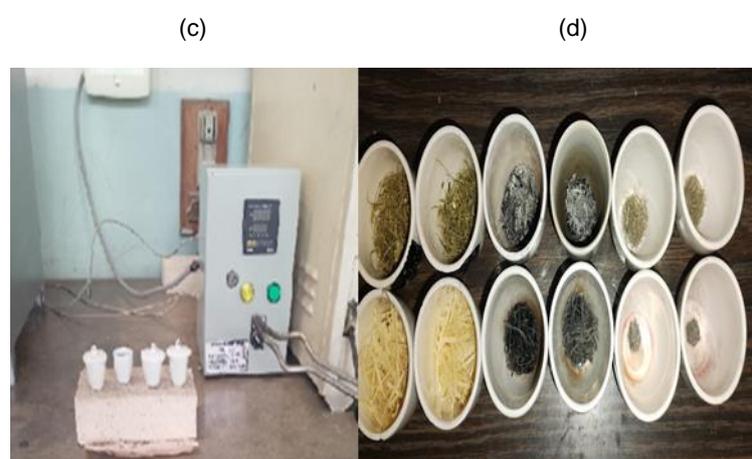
Ver los pasos de este procedimiento en la Figura 19.

Figura 19

Análisis inmediato de carbones de las fibras de maguey y chambira respectivamente



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

3.5 Caracterización de las materias primas

3.5.1 Néctar o sumo de Maguey

Para poder dar una utilidad al néctar o sumo de maguey, este tuvo que ser sometidos a ensayos de azufre orgánico, usando equipos de análisis de carbono LECO utilizando una nota de aplicación orgánica de Leco Formulario No 203-821-485. Formulario No 203-821-321.

3.5.2 Fibras de Maguey y Chambira

Para determinar la composición química de las muestras de fibras de maguey (FM) y fibras de chambira (FC) se usaron las siguientes técnicas: Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Dispersión de Energía con Espectrómetro EDX 800HS, SHIMADZU; Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama con un Espectrómetro AA

7000, SHIMADZU; Espectrofotometría UV-visible con Espectrómetro UV-1800, SHIMADZU; y Analizador Elemental. Todos los experimentos se realizaron a temperatura ambiente de 24 °C y 51 % de humedad relativa en promedio. El análisis elemental (de Sodio-Na a Uranio-U) se realizó con un Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X utilizando un análisis semicuantitativo bajo una atmósfera de vacío, en base a una muestra de 100 g. Esto se realizó en LABICER FC UNI.

Análisis termogravimétrico de las fibras naturales se llevaron a cabo, para esto se utilizó un dispositivo Perkin Elmer TGA 4000; 177 g de muestras de FM y 154 g de FC fueron molidas y homogeneizadas mecánicamente en morteros hasta alcanzar una granulometría de aproximadamente 100% - m 100 (aproximadamente 0,149 mm) y colocadas en un desecador durante 6 h (ver Figura 20). Luego, TGA y DTG analizaron 15 mg de muestras de fibras de maguey (FM) y fibras de chambira (FC) de acuerdo con las siguientes condiciones: velocidad de calentamiento de 10 °C/min, temperatura inicial y final de 30 y 800 °C, período isotérmico de 5 min a 800 °C y flujo de gas inerte de Nitrógeno (N₂) a 50 mL/min. Durante las pruebas se midieron el peso (%) y el % en peso derivado (%/min) del TGA y DTG, respectivamente. Estas experiencias se realizaron el Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados (LNPD) FIPGN UNI.

Figura 20

Molienda de la fibra de Maguey y de Chambira



Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron ensayos FTIR a muestras de fibras naturales (FM y FC). Todos los espectros se obtuvieron en un espectrofotómetro FRONTIER FTIR, número de serie 102921 con un Perkin Elmer *Spectrum* versión 10.4.2 y revisión de *software* CPU32 Main 00.09.1072 09-enero-2014 12:55:01 se realizó en un rango de números de onda de 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} y 45 escaneos. Esto se realizó en LNPD FIPGN UNI y LABICER FC UNI.

3.5.3 Escorias de acería y cascarillas de acero

Para determinar la composición química de las muestras de escorias de acería (EA) y cascarillas de acero (CA), se usaron las siguientes técnicas: Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X de Dispersión de Energía con Espectrómetro EDX 800HS, SHIMADZU; Espectrofotometría de Absorción Atómica de llama con un Espectrómetro AA 7000, SHIMADZU; Espectrofotometría UV-visible con Espectrómetro UV-1800, SHIMADZU; y Analizador Elemental. Todos los experimentos se realizaron a temperatura ambiente de 24 °C y 51 % de humedad relativa en promedio. El análisis elemental (de Sodio-Na a Uranio-U) se realizó con un Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X utilizando un análisis semicuantitativo bajo una atmósfera de vacío, en base a una muestra de 100 g. Para analizar los contenidos de Fe y Mn se usaron las normas técnicas: EPA 3050B, (tratamiento de muestra) y SMEWW-APHA-AWWA-WEF Parte 3111B (análisis cuantitativo). Por otro lado, se analizaron por Difracción de Rayos X - DRX para observar las posibles fases cristalinas presentes. El equipo utilizado fue un difractómetro de rayos X FRONTIER. Difractómetro de Rayos X. PANALYTICAL, EMPYREAN. Este equipo escaneó con un goniómetro (radio de 240 mm). Los patrones de difracción se recolectaron en el rango de 2θ de 5° a 90° con incrementos de 0.02° y un tamaño de rendija de divergencia de 0.6°. El difractómetro tiene ánodos de cobre ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, Cu K- α ; $\lambda = 1.39225 \text{ \AA}$, Cu K- β) y opera con voltaje de 40 kV y corriente de 30 mA. Se analizaron las fases cristalinas y / o compuestos inorgánicos en las muestras analizadas cualitativamente (por

comparación con la base de datos ICSD) y cuantitativamente (usando el método de Rietveld). Esto se realizó en LABICER FC UNI.

3.6 Caracterización de materiales compuestos

3.6.1 SEM/MEB-EDS del experimento E3

El análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB/SEM) de la muestra o experimento E3 (diseño experimentos Tabla 9) se realizó utilizando un equipo de marca FEI modelo Quanta 650, con el cual se aplicaron voltajes de aceleración de 10 kV y 15 kV, así como un tamaño de punto de 5. La medida de espectroscopía de rayos X dispersiva en energía (EDS) se realizó empleando un detector de la marca EDAX, montado en el microscopio. Para el procesamiento de los datos y la determinación de la composición química se utilizó el software EDAX TEAM empleando una corrección de matriz eZAF.

Para la caracterización morfológica, se utilizó el recubridor rotativo Q150R ES, aplicando una capa de oro a la muestra, de un espesor de aproximadamente 20 - 40 nm. El mecanismo de recubrimiento fue mediante pulverización catódica, y se utilizó una corriente de 25 mA durante 60 s. Esto se realizó en el Centro de Caracterización de Materiales (CAM) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

3.6.2 Análisis FTIR

El análisis FTIR de ocho tipos de materiales compuestos de resinas modificadas con residuos siderúrgicos y refuerzos de fibras naturales utilizó un espectrómetro infrarrojo (FTIR) Spectrum Two de Perkin Elmer en un rango de longitud de onda de 4000 – 450 cm^{-1} . Las mediciones se realizaron empleando el modo de transmitancia. Esto se realizó en LNPD FIPGN UNI y LABICER FC UNI.

3.6.3 Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico de los ocho tipos de materiales compuestos de resinas modificadas con residuos siderúrgicos y refuerzos de fibras naturales (E1 al E8) fueron realizadas en el Laboratorio de Normalización de Petróleo y Derivados (LNPD) de la FIPGN UNI y tuvieron lugar usando entre 10 a 15 mg de cada material compuesto. Las condiciones de análisis fueron:

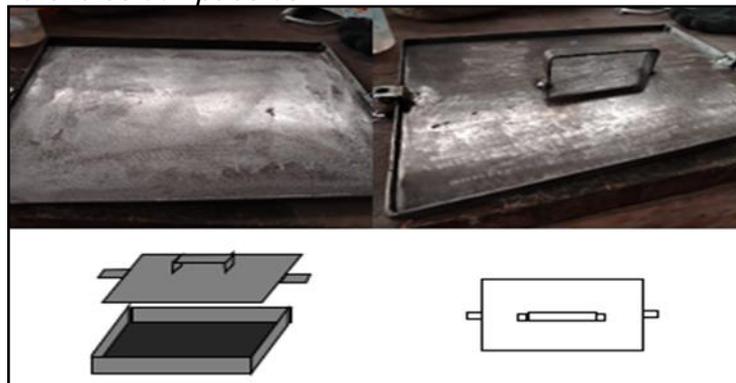
Velocidad de calentamiento =	10 °C/min
Temperatura inicial =	30 °C
Temperatura final =	800 °C
Flujo de gas inerte (N ₂) =	50 mL/min

3.7 Confección de moldes de acero de acuerdo con Normas ASTM

Se confeccionaron moldes de acero inoxidable compuesto de dos partes, conocidos en el ámbito de la laminación como tapa y contratapa. En lugar de un molde convencional con una parte plana y otra con espacio para el material, ambos lados del molde se diseñaron como placas planas de metal que puedan ajustarse firmemente a través de pernos laterales, de tal forma que, al aplicar presión sobre ambas superficies, la resina se distribuye de forma homogénea y adquiere un acabado liso en ambas caras de la lámina. Las dimensiones de los primeros dos moldes confeccionados fueron de 15 cm x 10 cm x 2 cm (Figura 21) y luego para magnificar la producción de materiales compuestos se confeccionaron otros seis moldes confeccionados de: 30 cm x 20 cm x 2.5 cm (Figura 22).

Figura 21

Moldes de acero inoxidable y sus perspectivas para la preparación de láminas para corte de probetas de materiales compuestos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22

Seis moldes codificados como A1, B2, C3, D4, E5 y F6 con sus tapas y contratapas, así como pernos de seguridad correspondientes



Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar que estos moldes se confeccionaron de acuerdo con el tamaño necesario de las probetas establecidas por las normas técnicas ASTM para ensayos mecánicos (ASTM D3039 para tracción y ASTM D790 para flexión).

La Tabla 8, muestra las dimensiones de las probetas de material compuestos para varios ensayos mecánicos, según las normas ASTM.

Tabla 8

Dimensiones de probetas de material compuesto para los distintos ensayos mecánicos según normas ASTM

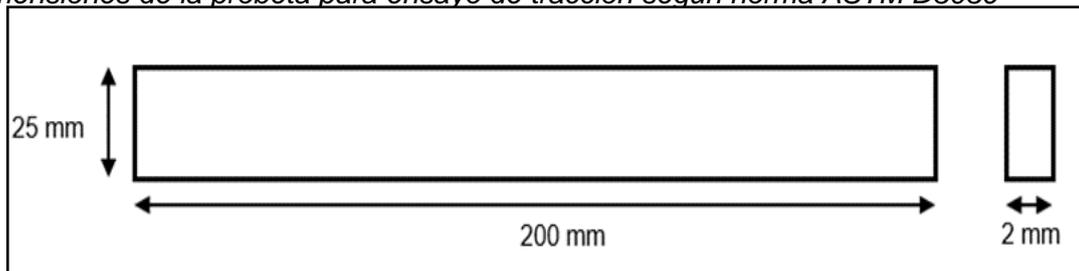
Ensayo Mecánico	Norma ASTM	Dimensiones de la Probeta
Tracción	ASTM D3039	Longitud total: ~250 mm / Longitud de calibre: 150 mm / Ancho: 25 mm / Espesor: Variable
Flexión	ASTM D790	Longitud: 127 mm o 165 mm / Ancho: 12.7 mm / Espesor: ~3.2 mm (variable)
Compresión	ASTM D3410	Longitud total: 140 mm / Longitud de calibre: 12.7 mm / Ancho: 12.7 mm / Espesor: Variable
Cizalladura Interlaminar	ASTM D2344	Longitud: 76 mm / Ancho: 12 mm / Espesor: Variable
Resistencia al Impacto	ASTM D256	Longitud: 63.5 mm / Ancho: 12.7 mm / Espesor: 3.2 mm

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 8, en el caso de los ensayos de tracción, las dimensiones de la geometría seleccionada para confección de las probetas para ensayo de tracción son: 200 mm de largo, 25 mm de ancho y 2 mm de espesor (Figura 23). Análogamente cuando se trata del ensayo de flexión, las dimensiones de cada probeta son 200 mm de largo, 50 mm de ancho y 2.5 mm de espesor (Figura 24).

Figura 23

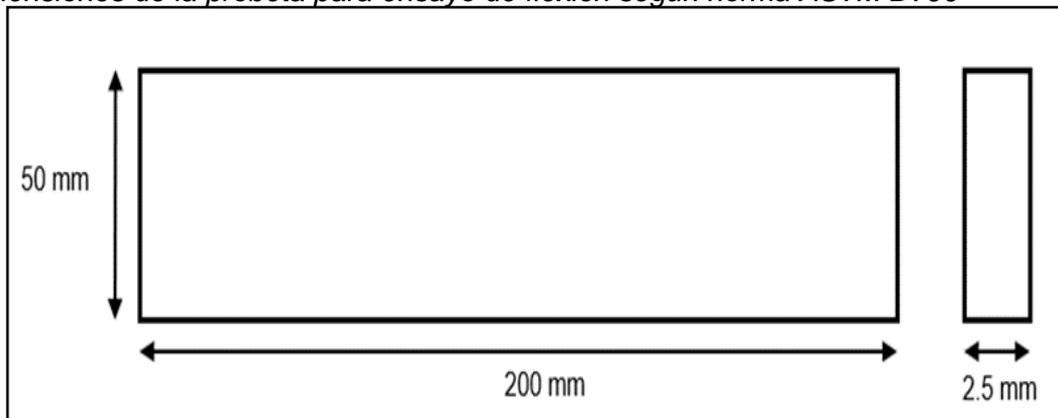
Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción según norma ASTM D3039



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24

Dimensiones de la probeta para ensayo de flexión según norma ASTM D790



Fuente: Elaboración propia.

3.8 Diseño de experimentos para preparación de probetas

En este trabajo se empleó el diseño experimental ya que se realizó manipulaciones en la cantidad de la fibra de maguey y chambira que se añadirá a la mezcla de resina epóxica modificada con escoria de acería para poder analizar la resistencia a la tracción y flexión del material compuesto.

La Tabla 9 muestra el diseño experimental a utilizarse para la confección de los materiales compuestos de base polimérica en mención.

Tabla 9

Diseño experimental seguido para la fabricación de las probetas de material compuesto

Experimento	Relleno de Escoria (% w)	Tipo de Refuerzo	Contenido de Refuerzo (% w)
E1	0	Ninguno	0
E2	5	Ninguno	0
E3	5	Fibra de maguey (FM)	5
E4	5	Fibra de maguey (FM)	7.5
E5	5	Fibra de maguey (FM)	10
E6	5	Fibra de chambira (FC)	5
E7	5	Fibra de chambira (FC)	7.5
E8	5	Fibra de chambira (FC)	10

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las normas ASTM D3039 resistencia a la tracción y ASTM D790 resistencia a la flexión, se confeccionarán siete probetas por cada prueba experimental (cinco según la norma y dos de reserva) haciendo un total de 56 probetas por cada ensayo mecánico.

3.9 Preparación de la resina epóxica

Como parte del objetivo de desarrollar un prototipo de material compuesto de matriz polimérica con refuerzo de fibra de maguey y/o chambira y relleno con resina epóxica modificada con escoria de acería, se encuentra el de confeccionar probetas de materiales compuestos de matriz polimérica con relleno de escoria de acería y refuerzo de fibras naturales de maguey y/o chambira se procedió a preparar primeramente la resina epóxica a utilizar.

La resina epoxi86 presenta dos componentes (resina A y resina B) (Figura 25) los cuales se mezclaron en proporción de 3 a 1 en masa según sugerencia del proveedor. En adelante se denominará resina C a la mezcla de 3 partes de Resina A con 1 parte de Resina B.

Figura 25

Muestras de las resinas epóxicas tipo A y B junto al peróxido de Meck (catalizador)



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 26 muestra un galón de desmoldante para imprimir en los moldes contratapas y tapas antes de colocar la mezcla resina epóxica (resina C) o la modificada con escoria de acería y las fibras correspondientes, botellas de alcohol isopropílico y thinner para limpiar los moldes una vez que éstos han sido desmoldados del material compuesto preparado.

Figura 26

Galón de desmoldante Glucom, thinner acrílico reforzado y alcohol isopropílico



Fuente: Elaboración propia.

Luego de varias pruebas de fraguado de la resina C a temperatura del ambiente y en plancha eléctrica, se procedió a hacerlo en un horno eléctrico. Para este efecto se usaron los parámetros y valores mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10*Parámetros de curado de la resina C*

Parámetro	Valor
Temperatura de curado	15°C (ambiente)
Tiempo de curado	12 – 24 h
Tiempo de trabajo	30 min.

Fuente: Elaboración propia.

En función a ello se calcularon las masas de resina, escoria y fibra correspondiente para cada experimento, según la regla de mezcla para materiales compuestos (Ecuación 8).

$$\rho_c = \sum(V_i \rho_i) \quad (8)$$

Donde:

 ρ_c : Densidad del material compuesto, V_i : Fracción volumétrica del componente y ρ_i : Densidad del componente.

Por ejemplo, para un material compuesto de solo una matriz y un refuerzo se tiene la ecuación 9:

$$\rho_c = V_m \rho_m + V_f \rho_f \quad (9)$$

Donde:

 ρ_c : Densidad del material compuesto, V_m : Fracción volumétrica de la matriz, ρ_m : Densidad de la matriz, V_f : Fracción volumétrica del refuerzo y ρ_f : Densidad del refuerzo

Con los valores de densidad de resina modificada se aplica una tercera vez la ecuación 10 de mezcla para el cálculo de la densidad del material compuesto.

$$\rho_{composite} = V_{resmod} \rho_{resmod} + V_{fibra} \rho_{fibra} \quad (10)$$

Donde:

$\rho_{composite}$	=	Densidad del material compuesto,
V_{resmod}	=	Fracción volumétrica de la resina modificada,
ρ_{resmod}	=	Densidad de la resina modificada,
V_{fibra}	=	Fracción volumétrica de la fibra y
ρ_{fibra}	=	Densidad de la fibra.

El volumen de la lámina de material compuesto deseada se calcula en función a las dimensiones del molde y el espesor.

Luego, la masa de la lámina se obtendrá con la $\rho_{composite}$ calculada por la regla de mezcla (ecuación 8, 9 y 10).

Ver cálculos en Discusión de los Resultados.

3.10 Preparación de las mezclas de materiales compuestos

Como ya fue mencionado, la resina epoxi empleada fue combinada con una proporción de 3 a 1 de los componentes A y B. A esta se le incorporó escoria de acería con agitación constante durante 15 min. En paralelo, los moldes fueron impregnados con cera desmoldante, la cual se aplicó en intervalos de 5 min, acumulando en total tres capas. Las fibras se alisaron empleando una plancha convencional de laceado y se dispusieron en orientación longitudinal 0°. Posteriormente, la resina modificada (componente A, componente B y escoria) fue vertida impregnando por completo a las fibras dispuestas en el molde. Se colocó la tapa y se ajustaron las perillas laterales para ejercer presión. A las 24 h de curado a temperatura ambiente, las láminas fueron desmoldadas y cortadas mediante técnicas láser para conseguir las dimensiones necesarias de los ensayos mecánicos.

Por ejemplo, de acuerdo con el diseño experimental presentado en la Tabla 9, a continuación, se describirá el procedimiento de las pruebas experimentales E5 y E8.

- Se pesaron 26.7 g de fibra de maguey y/o chambira, para luego colocarlo en la probeta de acero previamente encerada con el desmoldante (Figura 27).

Figura 27

Peso de la fibra de maguey y chambira en balanza digital milimétrica



Fuente: Elaboración propia.

- Se enceraron los moldes de acero (tapa y contratapa) para poder darle uso, esto se realiza hasta 4 veces en intervalo de 4 a 5 min. Ver Figura 28.

Figura 28

Moldes encerados parte inferior (tapa) y superior (contratapa)

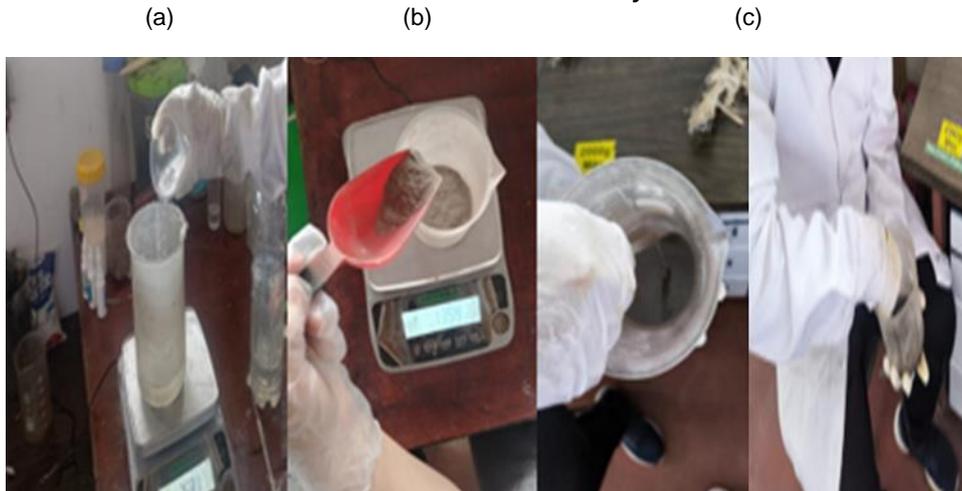


Fuente: Elaboración propia.

- Se pesaron las resinas: 170.25 g de A y 56.75 g de B, también la escoria de acería con un peso de 13.35 g, para luego combinarlas y homogenizarlas en un vaso de precipitado de 1 L durante 10 min. Ver Figura 29.

Figura 29

(a) Mezcla de la resina tipo A y tipo B, (b) pesado de escoria de acería, y (c) adición y agitación de escoria de acería a la mezcla de resinas A y B



Fuente: Elaboración propia.

- Una vez homogenizada la resina C junto con la escoria de acería (resina C modificada), se vertió dentro molde, donde la fibra de maguey y/o chambira yace previamente pesada y alisada con una plancha de cabello, para este propósito se empleó una plancha convencional de laceado. Luego se cubrió toda la muestra previa laminación manual (*hand lay-up*) usando rodillos de acero que garantizaron el untado completo de las fibras. Ver Figura 30.

Figura 30

Alisado, colocado de fibras y vertimiento de la mezcla de resina C modificada en el molde con fibras



Fuente: Elaboración propia.

- Se presionó y empernó bien ambos lados del molde para que el material a curar, la mezcla de las resinas con la escoria sobre las fibras de maguey quede bien compactado, se consolide, luego se dejó moldear por un espacio de mínimo 24 h y

finalmente desmoldear o retirar el material compuesto del molde usando cuchillas, espátulas y combos de goma. Ver Figura 31.

Figura 31

Desmoldeo del material compuesto preparado



Fuente: Elaboración propia.

- Por último, una vez desmoldados los materiales compuestos se procedió al corte laser para obtención de las probetas según las dimensionales correspondientes. Ver Figura 32.

Figura 32

Probetas del material compuesto ya cortadas mediante corte laser



Fuente: Elaboración propia.

3.11 Ensayos mecánicos de materiales compuestos

3.11.1 Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo de acuerdo con las normas ASTM D3039 en una máquina universal de ensayos mecánicos ZWICK ROELL Z010 con una velocidad de deformación de 2 mm/min y temperatura de 23 °C con una celda de carga calibrada, asegurando la aplicación de una velocidad de tracción constante y uniforme a todas las muestras (8 experimentos en total). Durante cada ensayo, se registraron continuamente datos de carga y deformación, utilizando un extensómetro de precisión que midió la deformación hasta el punto de rotura. Este equipo pertenece a LABICER FC UNI.

3.11.2 Ensayos de flexión

La caracterización mecánica de las probetas de material compuesto reforzado con escoria y fibras naturales de maguey y chambira también incluyó ensayos de flexión, llevados a cabo conforme a la norma ASTM D790. Estos ensayos se realizaron también utilizando una máquina de ensayos universales ZWICK ROELL Z010. Se mantuvo la temperatura del laboratorio a 23 ± 1 °C, y se utilizó una velocidad de aplicación de carga de 1 mm/min. Se emplearon al menos 5 probetas para cada tipo de composición material compuesto. Para prevenir daños durante la sujeción y asegurar una distribución uniforme de la carga, se aplicaron *tabs* de aluminio en los extremos de las probetas, fijados con un adhesivo especial que no compromete la integridad del material. Este equipo pertenece a LABICER FC UNI.

3.12 Análisis, interpretación y tratamiento estadístico de datos experimentales

En la etapa de análisis y tratamiento estadístico de los datos, se realizó una evaluación exhaustiva de los datos recogidos en las etapas anteriores. Se implementaron herramientas estadísticas avanzadas como análisis de varianza ANOVA, regresión lineal múltiple para identificar patrones significativos y correlaciones entre las variables y las propiedades finales de los materiales compuestos elaborados. Se aplicaron técnicas de visualización de datos, incluyendo gráficos, mapas de calor y diagramas de dispersión, para presentar los resultados de manera clara y facilitar su interpretación.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Determinación de propiedades físicas de materias primas

4.1.1 *Pencas, néctar y fibras de Maguey, y fibras de Chambira*

En la Tabla 11, se muestran las determinaciones físicas de biomásas derivadas de fibra de maguey peruano o agave sisalana: penca de maguey (ML) y néctar de maguey (MN), fibras de maguey (FM) y fibras de chambira (FC).

Tabla 11

Determinaciones físicas de biomásas derivadas y fibras naturales: muestras de ML, MN, FM y FC

Fibras naturales	Densidad real, g/mL	Densidad aparente, g/mL	% Extracción húmeda de FM	% Extracción seca de FM
ML		1.36		
MN	1.04			
FM	1.07		21.24	3.38
FC	0.99			

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 11 muestran que las muestras MN, FM y FC tienen una densidad real casi homogénea.

Por otro lado, los valores promedio de porcentaje de extracción de fibra seca de maguey investigados son 3.38, esto indica que el 96.62 % de la penca de maguey corresponde a la pulpa y néctar de esta planta contienen saponinas esteroideas que pueden ser potencialmente utilizadas en alimentos, formulaciones cosméticas y farmacéuticas (Ribeiro, B. D., 2015).

4.1.2 *Escorias de acería y cascarillas de acero*

En la Tabla 12, se muestran las propiedades físicas de las escorias de acería (EA) y cascarillas de acero (CA).

Tabla 12*Propiedades físicas de las escorias de acería (EA) y cascarillas de acero (CA)*

Material de Relleno	Granulometría	%Peso	Densidad Real, g/mL	Densidad Aparente, g/mL	Porosidad
Escoria de Acería	100% -10m	73.44	2.60	1.30	50.02
	100% +10m	26.56	3.07	1.67	53.04
Cascarilla de Acero (2024)	100% -10m	100.00	4.68	1.29	72.24
Cascarilla de Acero (2022)	100% -10m	100.00	4.63	2.15	53.56

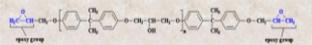
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 12 muestran una muestra de CA con una densidad real y una porosidad superiores a la muestra de EA (en ambos rangos de tamaño de partículas).

4.1.3 Resinas, polyester, fibras de vidrio MAT 450, velo superficie y Woven Roving 800

La Tabla 13 y Tabla 14 muestran las propiedades físicas de la Resina Epóxica Premium antes y después de su endurecimiento.

Tabla 13*Propiedades de la resina Epóxica Premium antes del endurecimiento*

Resina Epóxica PREMIUM	Parte A LS 400 TS marrón	Parte B LS 400 TS
		
Color	Transparente	Transparente
Gravedad específica, g/mL	1.15	0.96
Viscosidad (25°C), CPS	3000	500-2000
Proporción de mezcla	A: B = 100:33(w/w)	
Condiciones de dureza	25 °Cx8h a 10h o 55°Cx2h (2 g)	
Tiempo de uso	25°Cx30min (100g)	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14*Propiedades de la Resina Epóxica Premium después del endurecimiento*

Hardness, shore D	85D
Withstand voltage, KV/mm	22
Flexural strength, Kg/mm ²	23
Volume resistivity, Ohm ³	1x10 ¹⁵
Surface resistance, Ohmm ²	5x10 ¹⁵
Thermal conductivity, W/M.K	0.60
Induced electric loss, 1KHZ	0.42
Withstand high temperature, °C	140

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17 se presentan las características técnicas de las resinas poliéster, fibras de vidrio MAT 450 y *woven roving* 800, respectivamente.

Tabla 15

Propiedades de la resina Poliéster Insaturada ANYPOL - 100

Nombre comercial	Viscosidad (25°C), CPS	Índice de acidez	% Sólidos o Resina Poliéster Insaturada	Nombre químico: Monómero de Estireno	Tiempo de Gelación, min	Ensayo de Referencia, g	
ANYPOL - 100	Z-Z1 (GARDENER)	18 ± 2%	72 ± 2%	28 ± 2%	4 - 6	Resina	100.0
						Acelerador	0.2
						Catalizador	1.0

Fuente: Elaboración propia.

Los datos técnicos de la fibra de vidrio MAT 450, son:

- Ligante: Emulsión.
- Peso: 450 g/m² + 10 % conforme a la norma ISO3374.
- Longitud de Fibra: 50 mm
- Contenido de humedad: ≤ 0.20 % conforme a la norma ISO 334

Tabla 16

Propiedades de la fibra de vidrio MAT 450

Propiedad	% Peso de área	% Humedad	% Aglutinante	Resistencia a la tracción	Ancho
Método de la prueba	ISO 3374	ISO 3344	ISO 1887	ISO 3342	ISO 5025
225	5±10	≤0.20	4.7±0.9	≥30	±5
300	5±10	≤0.20	4.0±0.9	≥50	±5
450	5±10	≤0.20	3.7±0.8	≥70	±5
600	5±10	≤0.20	3.7±0.8	≥80	±5
900	5±10	≤0.20	3.5±0.8	≥90	±5

Fuente: Elaboración propia.

Los datos técnicos de la fibra de woven roving 800 o fibra de vidrio WR 800, son:

- Tipo de fibra de vidrio: E-Glass
- Peso: 800 g/m²
- Longitud de fibra: 50 mm.

Tabla 17*Propiedades de la fibra woven roving 800 o fibra de vidrio WR 800*

Especificación	Peso, g/m ²	Resistencia a la rotura		Tejido	% H ₂ O	%Contenido de tamaño
		Deformación	Trama			
EWR400-100	400±32	1480	1380	Simple	≤0.20	0.40 – 1.20
EWR500-100	500±40	1800	1700	Simple	≤0.20	0.40 – 1.20
EWR600-100	600±48	1800	1800	Simple	≤0.20	0.40 – 1.20
EWR800-100	800±64	2600	2300	Simple	≤0.20	0.40 – 1.20

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Caracterización de materias primas

4.2.1 Fibras Maguey, néctar de Maguey y Chambira

4.2.1.1 Análisis químicos por elementos. Las composiciones químicas de FM,

MN y FC se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18*Análisis químicos y otros controles realizados en fibras de maguey, néctar de maguey y fibras de chambira*

%	Fibra de Maguey, FM	Néctar de Maguey, NM	Fibra de Chambira, FC
Si	0.687		72.803
Ca	66.692		7.568
Mg	10.399		5.104
K	19.145		3.929
P	1.534		2.821
Al			2.682
S	0.502	142.920 (mg/L) (*) 0.080 w/w (**)	2.539
Mn			1.177
Fe	0.710		0.813
Ti			0.362
Zn	0.205		0.135
Rb	0.033		0.033
Sr	0.079		0.027
Zr	0.014		0.007
% Residuo de Calcinación a 445°C	15.936		2.706
Temperatura, °C	24.3		24.1
Humedad Relativa, HR	50		52

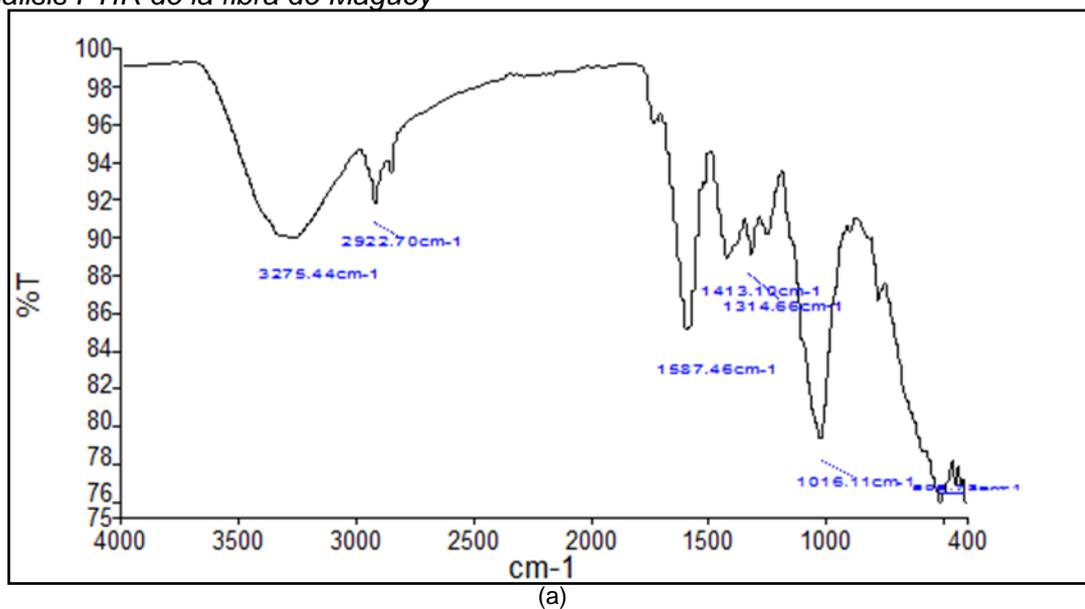
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 18 muestran que los contenidos de elementos metálicos de la fibra de maguey son mayores que los de la fibra de chambira, por el contrario, los contenidos de elementos no metálicos de la FC son mayores que los de FM. Además, es perceptible que el porcentaje de Rb es casi constante en ambas muestras, el porcentaje de residuos de calcinación a 445 °C de FM alcanzó el 15.94 % en comparación con el 2.71 % de las muestras de FC, esto quiere decir que la fibra de maguey posiblemente tenga mayor % ceniza o tenga mayor % de materiales volátiles que la de chambira. Por otro lado, el contenido de azufre orgánico del néctar de maguey NM (0.08 %) demuestra que este sumo puede potencialmente contener azufre en forma de tioles (grupos funcionales -SH) capaces de capturar metales pesados en cuerpos receptores, agua o suelos, de este tipo de contaminantes (Gómez-Marroquín, M. C., *et al.* 2022), (Gómez-Marroquín, M. C., *et al.* 2023), (Ceroni-Galoso A., *et al.* 2023), (Dos Santos, W. N., *et al.* 2011).

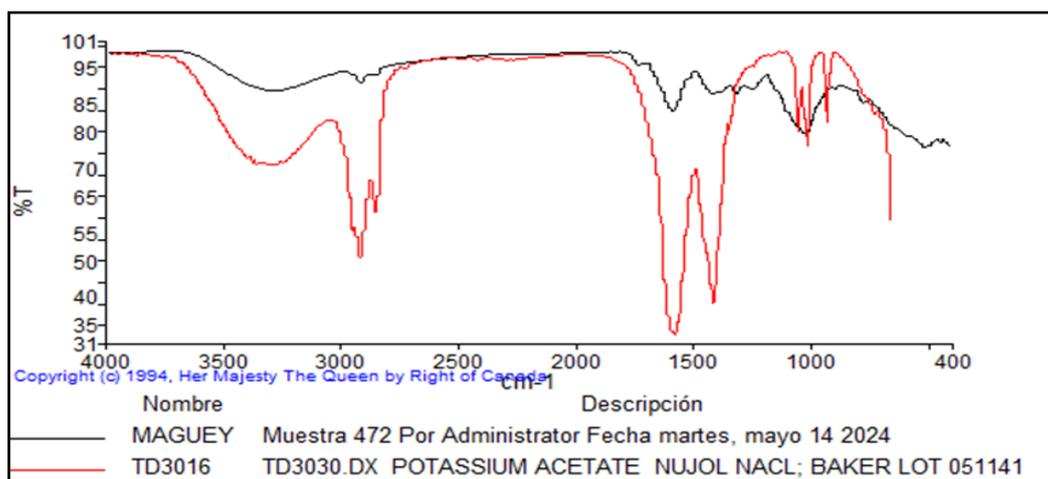
4.2.1.2 Análisis FTIR. La Figura 33, los análisis FTIR de la (a) fibra de maguey (FM) y (b) las bandas de coincidencia con el acetato de potasio (*potassium acetate nujol* NaCl Lot 051141) con el FTIR de FM.

Figura 33

Análisis FTIR de la fibra de Maguey



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la búsqueda de bandas coincidentes entre el ensayo FTIR de FM con otras sustancias orgánicas entre ellas el acetato de potasio (*potassium acetate nujol* NaCl Lot 051141), se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19

Búsqueda de bandas coincidentes entre el ensayo FTIR de FM y otras sustancias orgánicas

Nombre de la coincidencia	Descripción de la coincidencia	Nombre de la biblioteca	Puntuación de búsqueda
TD3016	TD3030.DX POTASSIUM ACETATE NUJOL NACL; BAKER LOT 051141	FDM_DRUG	0.708309
AP0002	ALGINIC ACID SODIUM SALT	polyatr	0.666972
DA3168	AVTEX FIBER /AVRIL (RAYON) WH STAPLE SEMI-DULL 10-17U NBS-A0095	CRIME	0.66074
TD0069	TD0069.DX SODIUM ACETATE ANHYDROUS; NUJOL NACL	FDM_DRUG	0.608186
DA3161	AVTEX FIBER /AVRIL (RAYON) WH MONOFIL 10-14U NBS-A0088	CRIME	0.594868
DA3323	ENKA(BASF)/RAYON(ABSORBIT)/WH STAPLE 200 3.3DEN(DULL)/NBS-A0171	CRIME	0.586709
DA3165	AVTEX FIBER /AVRIL (RAYON) WH STAPLE (BRIGHT) 14-16U NBS-A0092	CRIME	0.575884
TD3728	TD3742.DX PASSION FLOWERS EXTRACT FILM NACL; PHARMETICS LOT 6441	FDM_DRUG	0.575542
OR0337	OR0337.DX DIBUTYLTIN DIACETATE	FDMORGNC	0.563614
TD3725	TD3739.DX GADOPENTETATE DIMEGLUMINE NUJOL; NACL SCHERING LOT 1204548	FDM_DRUG	0.556545

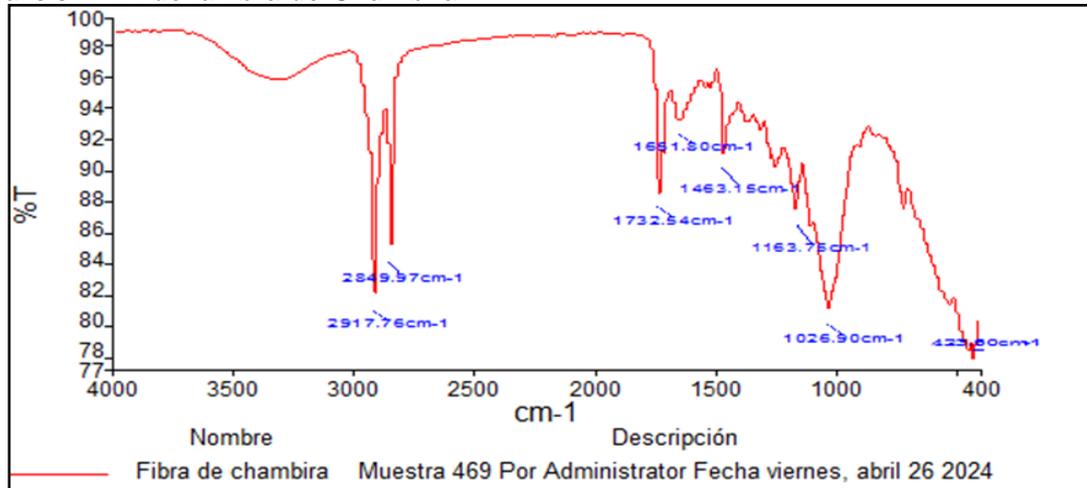
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 33 (a), los espectros FTIR de la muestra de FM tienen cinco bandas de absorbancia que coinciden en 1016.11, 1314.66, 1413.10, 1587.46 y 3275.44 cm^{-1} , de acuerdo con los espectros de la base de datos de Shimadzu. Adicionalmente, tanto en la Tabla 21 y la Figura 33 (b), no hay una sola banda de coincidencia con los espectros FTIR del acetato de potasio nujol NaCl Lote 051141.

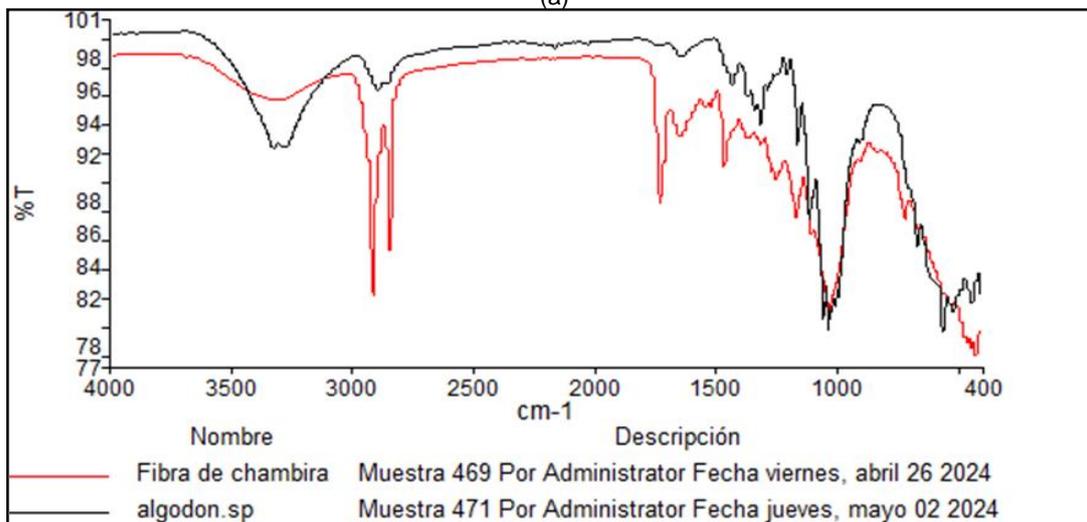
La Figura 34, los análisis FTIR de la (a) fibra de chambira (FC), las bandas de coincidencia con el (b) monoestearato de pentaeritritol y la (c) fibra de algodón.

Figura 34

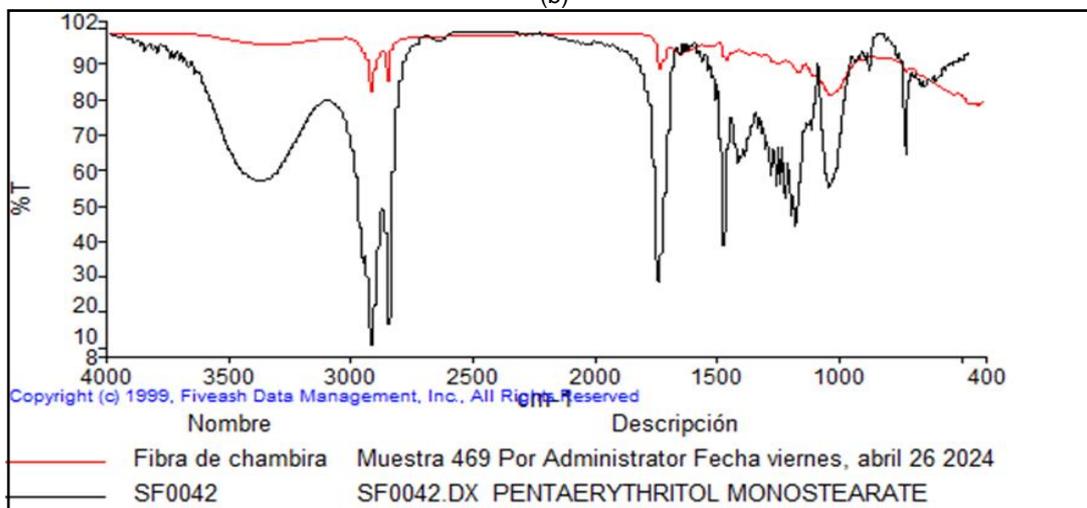
Análisis FTIR de la fibra de Chambira



(a)



(b)



(c)

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 20 muestra los resultados de la búsqueda de bandas coincidentes entre el ensayo FTIR de FC con otras sustancias orgánicas entre ellas la fibra de algodón.

Tabla 20

Búsqueda de bandas coincidentes entre el ensayo FTIR de FC y otras sustancias orgánicas

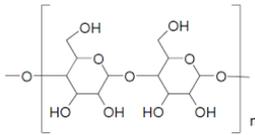
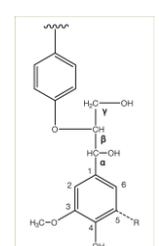
Nombre de la coincidencia	Descripción de la coincidencia	Nombre de la biblioteca	Puntuación de búsqueda
PA0401	PA0404.DX GLYCEROLMONOSTEARATE	FDM_PPA	0.804742
SF0042	SF0042.DX PENTAERYTHRITOL MONOSTEARATE	FDM_SURF	0.785592
SF0035	SF0035.DX SUCROSE DISTEARATE	FDM_SURF	0.771577
PA0218	PA0219.DX GLYCERYL MONOSTEARATE	FDM_PPA	0.7688
OR0799	OR0799.DX OCTADECANOIC ACID MONOESTER W/1,2,3-PROPANETRIOL	FDMORGNC	0.766978
OR0192	OR0192.DX TRISTEARIN	FDMORGNC	0.765231
SF0246	SF0247.DX MORPHOLINE RICINOLEATE	FDM_SURF	0.762917
PA0309	PA0311.DX DISTEARYLTHIODIPROPIONATE	FDM_PPA	0.761717
PA0212	PA0213.DX ETHYLENE GLYCOL MONOSTEARATE	FDM_PPA	0.760538
PA0238	PA0239.DX PENTAERYTHRITOL TETRARICINOLEATE	FDM_PPA	0.760057

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 34 (a) muestra los espectros FTIR de una muestra de FC con sus bandas de absorbancia coincidentes en 423.00, 1026.90, 1163.75, 1463.15, 1651.80, 1732.54, 2849.97 y 2917.76 cm^{-1} según la biblioteca de espectro de Shimadzu. Adicionalmente, en la Figura 34 (b), la banda de absorbancia de los espectros FTIR de monoestearato de pentaeritritol no coincide con la de FC, pero en la Figura 34 (c), la banda de absorbancia de los espectros FTIR de fibra de algodón observada se parece un poco más a los de FC. Esto también es observado en la Tabla 20. La Tabla 21 presenta la correlación entre los espectros de frecuencias de absorción y los tipos de vibración, y estiramiento de grupos funcionales en la hemicelulosa, y esqueletos aromáticos de lignina.

Tabla 21

Correlación entre los espectros de frecuencias de absorción y los Tipo de vibración y estiramiento de grupos funcionales en la hemicelulosa, y esqueletos aromáticos de lignina

Espectros de frecuencias de absorción o número de onda (cm ⁻¹)	Tipo de vibración y estiramiento de grupos funcionales en la hemicelulosa, y esqueletos aromáticos de lignina	Fórmulas químicas de compuestos orgánicos presentes en fibras naturales FM and FC
3265.00	Estiramiento - OH	 <p>(Cellulose)</p>
2919.09	Vibración Asimétrica - CH-	
1734.00 1711.20	Estiramiento C-O	 <p>(Lignin) (Hemicellulose)</p>
1594.00	Vibración de los esqueletos aromáticos de lignina	
1374.50 1240.00	Vibración de hemicelulosa	
1015.71	Estiramiento C-O	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 21 evidencian diferentes pasos de este comportamiento típico: vibración OH, vibración asimétrica de CH, estiramiento de CO, vibración del esqueleto aromático de la lignina, vibración de hemicelulosa y estiramiento de CO en el rango de número de onda de 3300 a 1000 cm⁻¹.

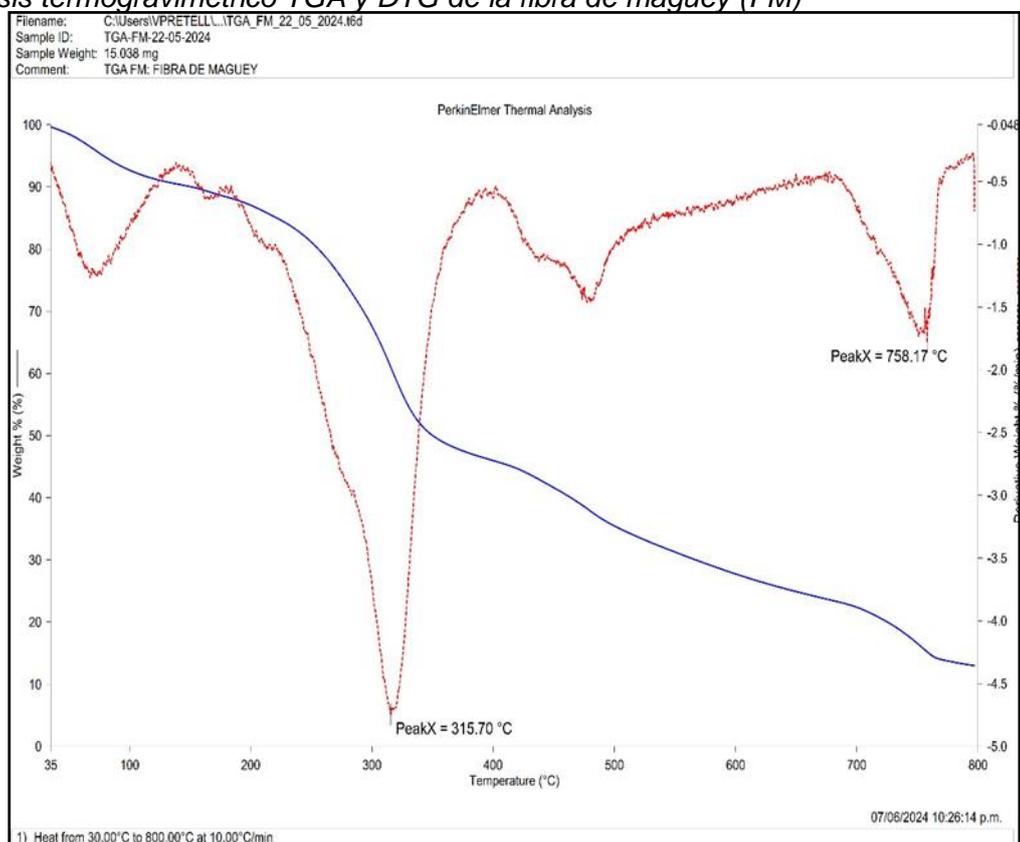
Se comprueba que ambas fibras naturales (FM y FC) contienen celulosa, lignina y hemicelulosa, principalmente, es decir, la FC tiene un 93.90 % de celulosa, un 4.20 % de lignina y un 1.90 % de hemicelulosa (Marín, M., *et al.*, 2012), y la fibra de madera tiene un 40-50 % de celulosa, 20-30 % de lignina y 10-30 % de hemicelulosa (Mühlethaler, K., 1949).

Los resultados indicaron que los grupos funcionales mencionados anteriormente podrían estar involucrados en la biosorción de iones bivalentes en FM (Dos Santos, W. N., *et al.*, 2011).

4.2.1.3 Análisis TGA-DTG. La Figura 35, muestra el análisis termogravimétrico TGA y DTG de la fibra de maguey (FM).

Figura 35

Análisis termogravimétrico TGA y DTG de la fibra de maguey (FM)



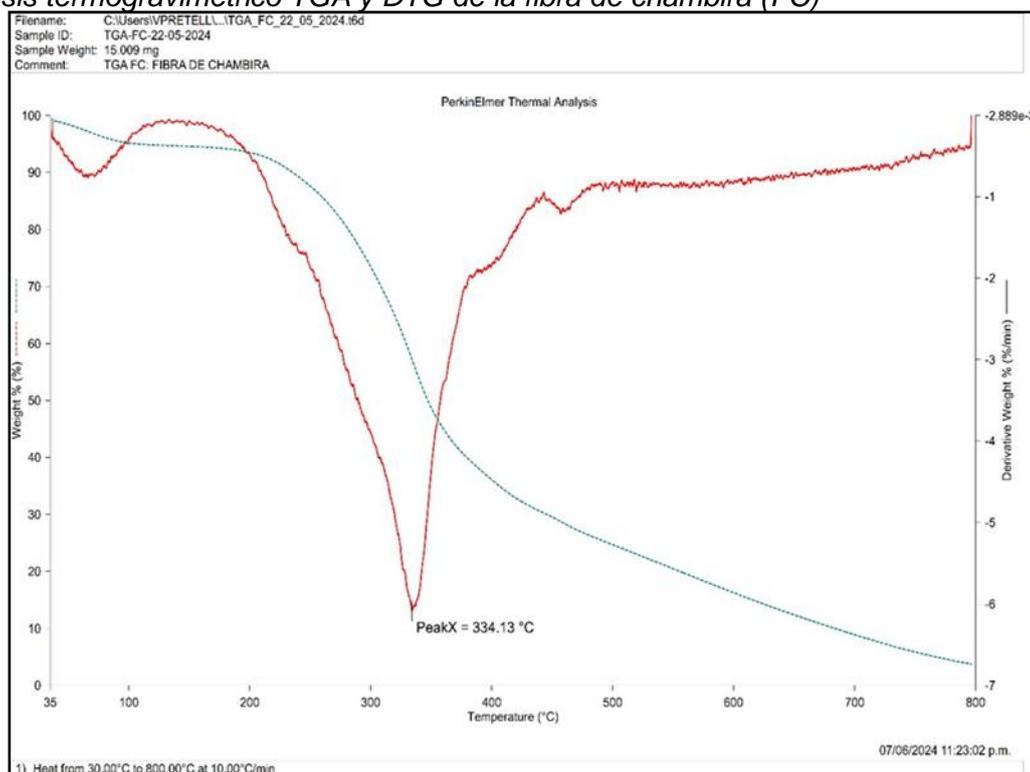
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 35, puede observarse que, entre la temperatura ambiente y 120 °C, se pierde 8.684 % de masa que se puede atribuir a la humedad de la muestra. Entre 230 y 380 °C se da el pico de máxima descomposición que ocurre a 315.70 °C donde más del 60 % de la muestra se ha descompuesto. Posteriormente se observó un pico endotérmico de descomposición a 758.17 °C. La pérdida total de peso de todo el ensayo alcanzó un valor de 88 %.

La Figura 36, muestra el análisis termogravimétrico TGA y DTG de la fibra de chambira (FC).

Figura 36

Análisis termogravimétrico TGA y DTG de la fibra de chambira (FC)



Fuente: Elaboración propia.

Análogamente en la Figura 36, se puede observar que, entre la temperatura ambiente y 120 °C, se pierde 5.168 % de masa que se puede atribuir a la humedad de la muestra. Entre 200 y 400 °C se da el pico de máxima descomposición que ocurre a 334.13 °C donde más del 57 % de la muestra se ha descompuesto. La pérdida total de peso de todo el ensayo alcanzó un valor de 95 %.

4.2.1.4 Análisis de proximidad o inmediato de carbones de fibras de Maguey y Chambira. En la Tabla 22, están los resultados del contenido de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo de las muestras de fibras de maguey y chambira.

Tabla 22

Análisis de proximidad de fibras de maguey (FM) y de chambira (FC)

Muestra	% Humedad	%Material Volátil	%Cenizas	%Carbón Fijo
FM	9.81	83.23	0.50	6.47
FC	10.29	80.58	1.65	7.48

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis aproximado (Tabla 22) evidenciaron que el porcentaje de cenizas presentes en las muestras de FM es menor que en las muestras de FC, mientras que el porcentaje de humedad, materia volátil y carbono fijo de ambos materiales es más similar. Los valores de % materia volátil más % humedad del análisis de proximidad o inmediato de carbones de tanto las fibras de maguey (83.23 % + 9.81 % = 93.04 %) como de chambira (80.58 % + 10.29 % = 90.87 %) están muy próximos a las obtenidas en los análisis termogravimétricos (Figuras 35 y 36 respectivamente). Los contenidos de materia volátil son mayores debido a la presencia de sustituyentes orgánicos, CO, CO₂, N y S presentes en las estructuras bencénicas de las fibras naturales estudiadas (Dizbay-Onat, M., *et al.*, 2017).

4.2.2 Escorias de acería y cascarillas de acero

4.2.2.1 Análisis químicos por compuestos y elementos. La Tabla 23 muestra la composición química de las muestras de escoria de acería (EA) y cascarillas de acero (CA) de las cosechas de los años 2022 y 2024.

Tabla 23

Análisis químicos de las muestras de escoria de acería (EA) y cascarillas de acero de las cosechas 2022 y 2024

%*	Escorias de Acería*	Cascarillas de Acero (2024)*	Cascarillas de Acero (2022)*
Si	42.702	11.523	6.311
Al	17.125	6.663	2.760
Mn	25.702	3.683	11.694
Fe	3.348	69.533	74.851
Cr	2.969	3.605	3.052
K	2.388	0.219	-.-
Ca	1.998	0.347	0.342
Zr	1.643	2.523	-.-
Ti	1.036	-.-	-.-
Tb	0.831	-.-	-.-
P	0.423	0.808	0.341
S	0.411	0.531	0.534
Sr	0.024	-.-	-.-
Mo	-.-	0.458	-.-
Cu		0.108	0.145
%**	Escorias de Acería**	Cascarillas de Acero (2024)**	Cascarillas de Acero (2022)**
Fe	1.522	35.676	45.610
Mn	11.015	2.422	8.060

Fuente: Elaboración propia.

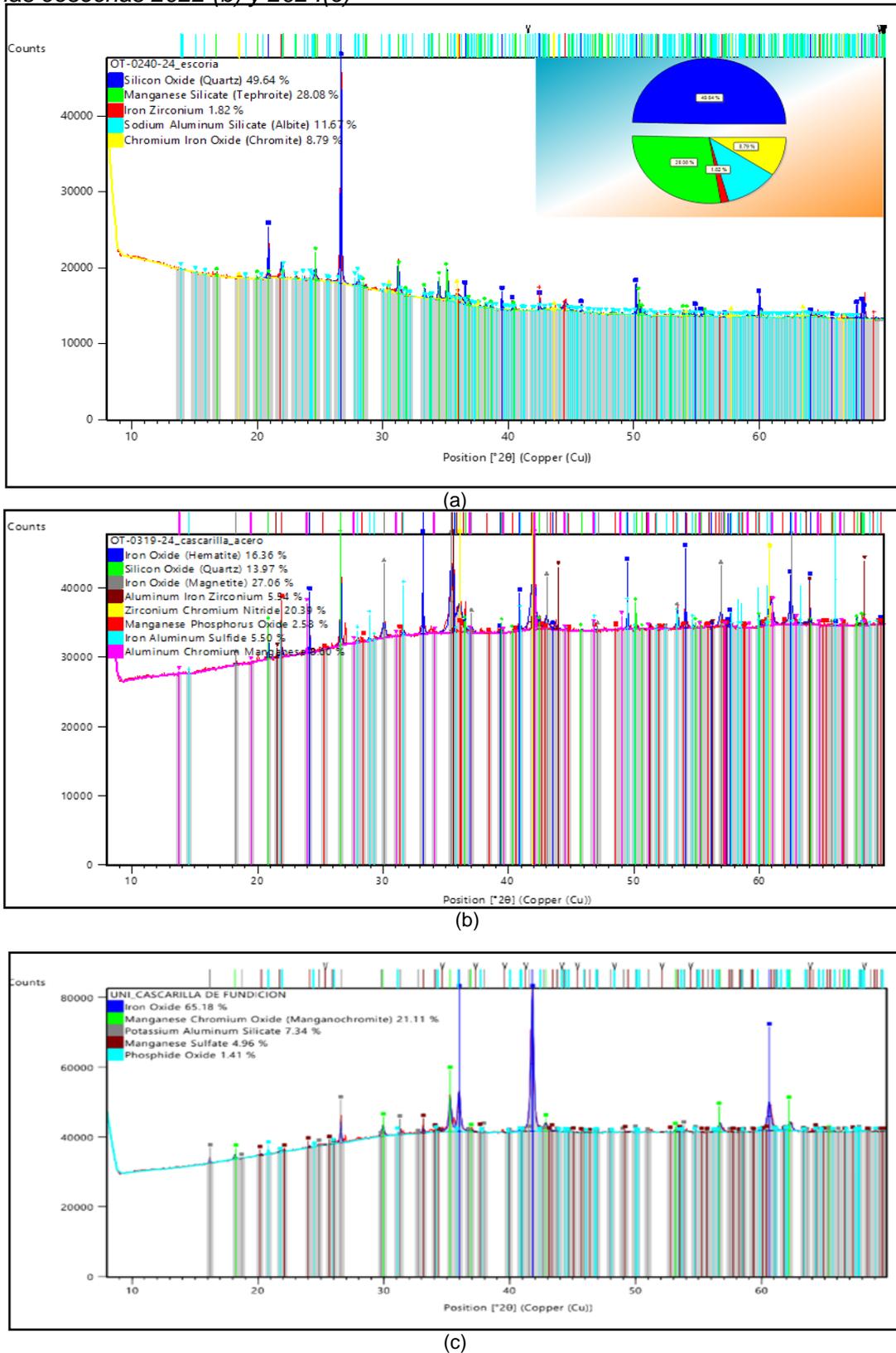
Los resultados de la Tabla 23 muestran que la escoria de acería (EA) tiene altos contenidos de Si y un bajo porcentaje de Fe en comparación con los dos tipos de muestras de cascarillas de acero (CA). Por otro lado, ambas muestras de cascarillas de acero de las cosechas 2022 y 2024 presentaron altos contenidos de hierro, los cuales fueron determinados por los dos instrumentos utilizados para su caracterización (Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersiva* y Espectrofotometría de Absorción Atómica de Flama*). Como es sabido, la escoria de acería es normalmente usado para aplicaciones en materiales compuestos por sus altos contenidos de Si (42.70 %), descartándose el uso de la cascarilla de acero.

La escoria de acería (EA) solía también usarse como agregado grueso para adicionar a muestras de finos de concreto y como sustituto parcial del Clinker en la industria del cemento Portland (Sithole, N. T., *et al.* 2022), (Torres, A., *et al.* 2017), también las cascarillas de acero (CA) se usan para recuperar hierro directamente (Elsadek, M., *et al.*, 2024) y como adsorbente de metales pesados mediante procesos de oxidación-reducción (Martín, M. I., *et al.*, 2004).

4.2.2.2 Análisis difracción de Rayos X – DRX. Las Figura 37, (a), (b) y (c) muestran los picos de Difracción de Rayos X de las muestras de escoria de acería (EA) y cascarilla de acero de la cosecha del año 2022 y 2024, respectivamente.

Figura 37

Difractogramas de los análisis DRX de escorias de acería 2024 (a) y cascarillas de acero de las cosechas 2022 (b) y 2024(c)



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 37 muestra la composición química de las fases cristalinas de tanto Escoria de Acería (EA): *Silicon Oxide*, $\text{SiO}_2=49.64\%$, *Manganese Silicate*, $\text{Mn}_2\text{SiO}_4=28.08\%$, *Iron Zirconium*, $\text{Zr}_{0.9}\text{Fe}_{2.1}=1.82\%$, *Sodium Aluminum Silicate*, $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)=11.67\%$ & *Chromium Iron Oxide*, $\text{Cr}_{1.33}\text{Fe}_{1.33}\text{O}_4=8.79\%$, ver Figura 37 (a), cascarilla de acero (CA 2024): *Magnetite* $\text{Fe}_3\text{O}_4=27.06$, *Hematite*, $\text{Fe}_2\text{O}_3=16.36\%$, *Silicon Oxide*, $\text{SiO}_2=13.97\%$, *Zirconium Chromium Nitride*, $\text{Zr}_{0.35}\text{Cr}_{0.65}\text{N}=20.39\%$, *Aluminum Chromium Manganese* $\text{Cr}_{2.5}\text{Mn}_{2.5}\text{Al}_8=8.60\%$, *Aluminum Iron Zirconium*, $\text{ZrFe}_{1.6}\text{Al}_{0.4}=5.54\%$, *Iron Aluminum Sulfide* $\text{FeAl}_2\text{S}_4=5.50\%$ & *Manganese Phosphorus Oxide*, $\text{Mn}_{0.5}\text{P}_{0.5}\text{O}_2=2.58\%$, Figura 37 (b) como cascarilla de acero (CA 2022): *Iron Oxide* $\text{FeO}=65.18\%$, *Manganese Chromium Oxide*, $\text{MnCr}_2\text{O}_4=21.11\%$, *Potassium Aluminum Silicate*, $\text{KAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)=7.34\%$, *Manganese Sulfate*, $\text{Mn}(\text{SO}_4)=4.96\%$, *Phosphite Oxide*, $\text{P}_2\text{O}_5=1.41\%$, Figura 37 (c).

Es observable que el Si contenido en la Escoria de Acería procede del *Silicon Oxide* (SiO_2), y el Fe está asociado tanto a *Iron Zirconium* como a *Chromium Iron Oxide*. Este contenido de Si de la escoria de acería es potencialmente beneficioso como relleno de la resina en conjunto con el contenido de Si de las fibras, principalmente la de chambira, para mejorar de las propiedades de los materiales compuestos de base polimérica (Kennedy M N *et al.*, 2024). Como es sabido, la escoria se considera un subproducto inerte de la fabricación de metales, debido a sus constituyentes como silicatos de calcio, magnesio y aluminio (Torres, A., *et al.*, 2017) y las actividades siderúrgicas generan incrustaciones no deseadas de hierro oxidado en la superficie del acero caliente (El-Shiekh, H., *et al.*, 2023) para ello su composición mineralógica considera que está compuesto por tres óxidos de hierro: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 y FeO con trazas de hierro metálico (Elsadek, M., *et al.*, 2024). Los óxidos de hierro contenidos en las muestras de cascarillas de acero (CA) tienen mayor porcentaje de Fe_2O_3 , Fe_3O_4 y de hierro metálico (70 % Fe) debido a que estos residuos fueron extraídos de una piscina de almacenamiento donde se realizó el templado de las piezas fundidas a 1100 °C. durante 5 h de enfriamiento en agua a temperatura del ambiente. Además, el mayor contenido de hierro de las muestras de cascarillas de acero

(CA) podría permitir que estos residuos puedan ser utilizados como material de relleno de materiales compuestos de matriz polimérica, tales como resina epoxi o poliéster.

4.3 Cálculos de las Cantidades de Materias Primas para colocado en el Molde

De la masa de lámina obtenida, considerando los porcentajes del diseño de experimentos se tiene, los siguientes cálculos según las ecuaciones 8, 9 y 10.

Según la ecuación 8 se estimó la densidad de la resina C, los valores se observa en la Tabla 24.

Tabla 24

Obtención de la resina C de acuerdo con la ecuación 1 para 0% fibras

Resina	Densidad (g/cm ³)	Masa (proporción)	Volumen	Fracción Volumétrica
A	1.150	3.000	2.609	0.715
B	0.960	1.000	1.042	0.285
C	1.096	4.000	3.650	1.000

Fuente: Elaboración propia.

Con el valor de la densidad de resina C, se realiza un nuevo cálculo para obtener la densidad de la mezcla de resina C y escoria para un porcentaje en masa (%w) del 5, 7.5 y 10%. Los cálculos se observan en la Tabla 25, 26 y 27, respectivamente.

Tabla 25

Cálculos de la obtención de la resina C de acuerdo con la ecuación 2 para 5% fibras

Resina	Densidad (g/cm ³)	Masa (proporción)	Volumen	Fracción Volumétrica
C	1.096	90.000	82.133	0.977
escoria	2.600	5.000	1.923	0.023
resina modificada	1.130		84.056	1.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26

Cálculos de la obtención de la resina C de acuerdo con la ecuación 2 o 3 para 7.5% fibras

Resina	Densidad (g/cm ³)	Masa (proporción)	Volumen	Fracción Volumétrica
C	1.096	87.500	79.852	0.976
escoria	2.600	5.000	1.923	0.024
resina modificada	1.131		81.775	1.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27

Cálculos de la obtención de la resina C de acuerdo con la ecuación 2 o 3 para 10% fibras

Resina	Densidad (g/cm ³)	Masa (proporción)	Volumen	Fracción Volumétrica
C	1.096	85.000	77.570	0.976
escoria	2.600	5.000	1.923	0.024
resina modificada	1.132		79.493	1.000

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con estos cálculos de las Tablas 24, 25, 26 y 27 se procedió a pesar las fibras (maguey y chambira) para confeccionar las láminas y luego cortar las probetas de materiales compuestos de base polimérica (resina epóxica modificada con escoria de acería) para su posterior ensayo de tracción y flexión.

4.4 Caracterización de los materiales compuestos

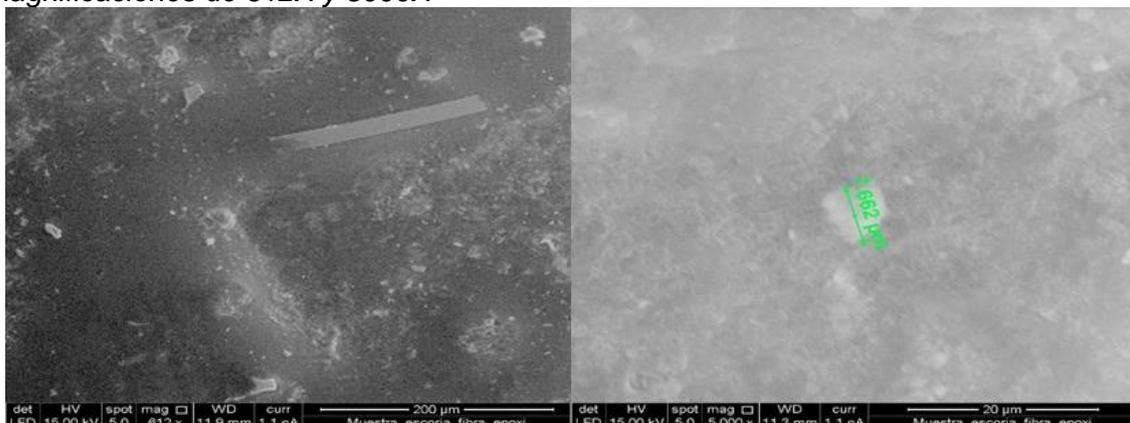
4.4.1 Análisis vía SEM/MEB - EDS de muestra del experimento 3

La Figura 38 presenta las micrografías de la muestra E3 sin recubrimiento, obtenidas bajo condiciones de bajo vacío.

La Figura 39 exhiben las superficies recubiertas con oro en alto vacío, donde se destacan las fibras en la superficie de la muestra, así como sus efectos en la morfología y dimensiones.

Figura 38

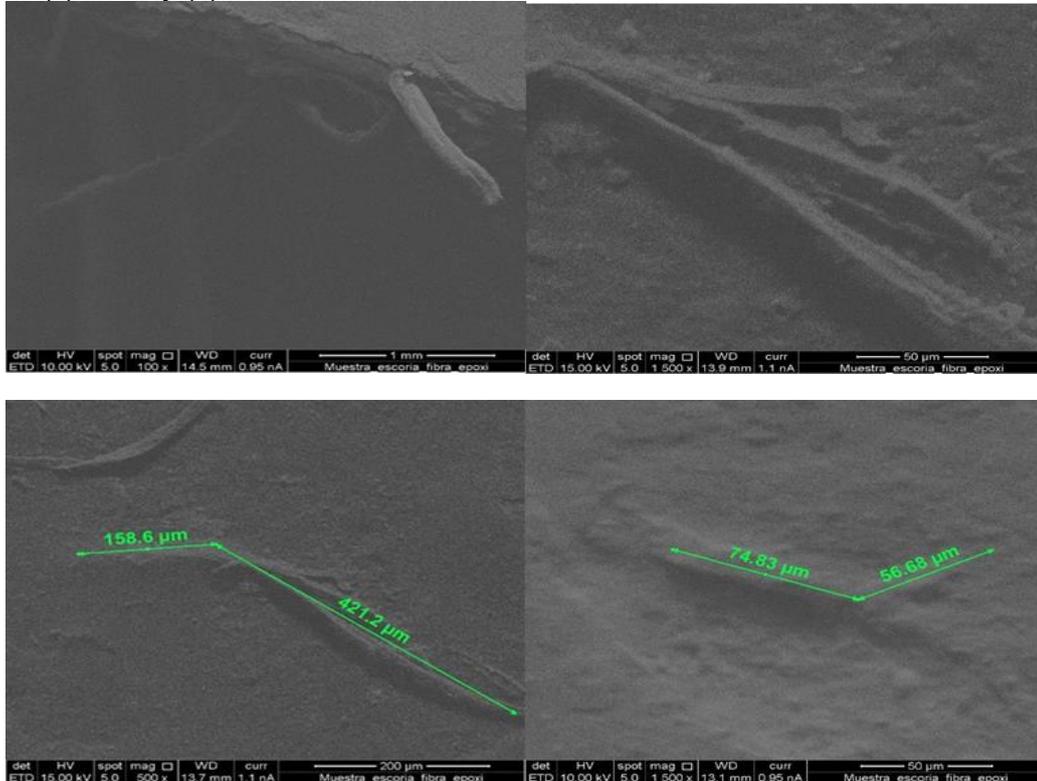
Micrografías de la muestra E3 resina epoxi, fibra maguey y relleno de escoria a magnificaciones de 612X y 5000X



Fuente: Elaboración propia.

Figura 39

Micrografías de fibras sobresaliendo por los laterales la muestra Resina epoxi, fibra maguey y relleno de escoria con recubrimiento de oro a magnificaciones de (a) 100X, con recubrimiento de oro a magnificaciones de (b) 1500X, con dimensiones estimadas de fibras visibles (c) 500X y (d) 1500X



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28

Composición química promedio obtenida mediante EDS, considerando múltiples ubicaciones en la muestra Resina epoxi, fibra maguey y relleno de escoria

Elemento químico	wt%	at%
Carbono, C	85.11	88.38
Oxígeno, O	14.89	11.61

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las micrografías obtenidas, se observó que la muestra E3 presentó una morfología heterogénea, con la presencia de defectos superficiales significativos. Estos pueden ser atribuidos a la escoria y las fibras sobresalientes. Los análisis de composición química revelados en la Tabla 28 coinciden mayoritariamente con los elementos esperados para las fibras vegetales y resina utilizadas. Asimismo, el recubrimiento de oro aplicado a la muestra E3 permitió resaltar las fibras vegetales presentes en la superficie, lo que facilitó el análisis morfológico de las mismas. No se

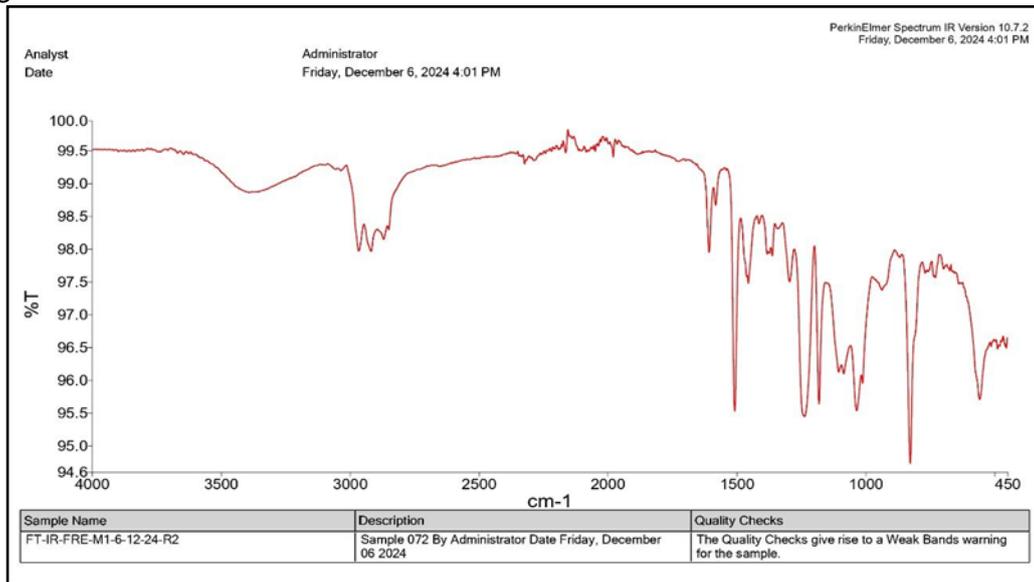
observaron cambios estructurales importantes asociados al recubrimiento, aunque su efecto en la morfología fue evidente.

4.4.2 Análisis de Espectros FTIR

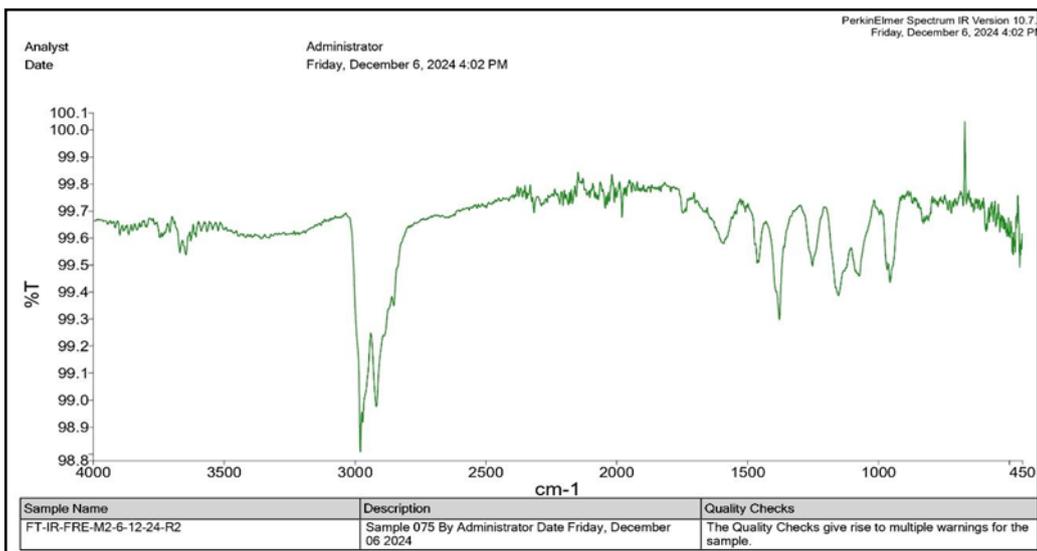
Los resultados de los análisis FTIR de las muestras de materiales compuestos E1 al E8, se muestran en la Figura 40.

Figura 40

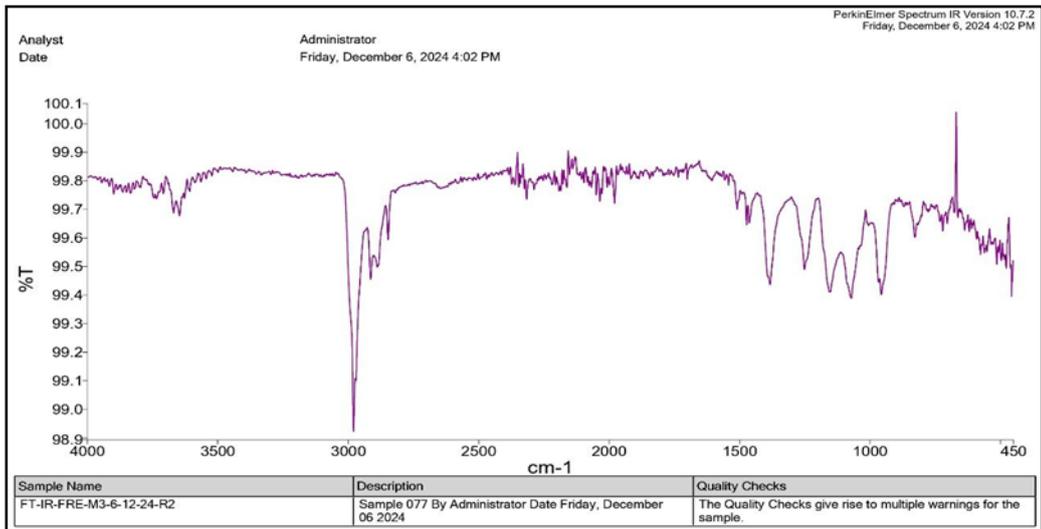
Análisis FTIR de las muestras E1 al E8: (a)E1, (b)E2, (c)E3, (d)E4, (e)E5, (f)E6, (g)E7 y (h)E8



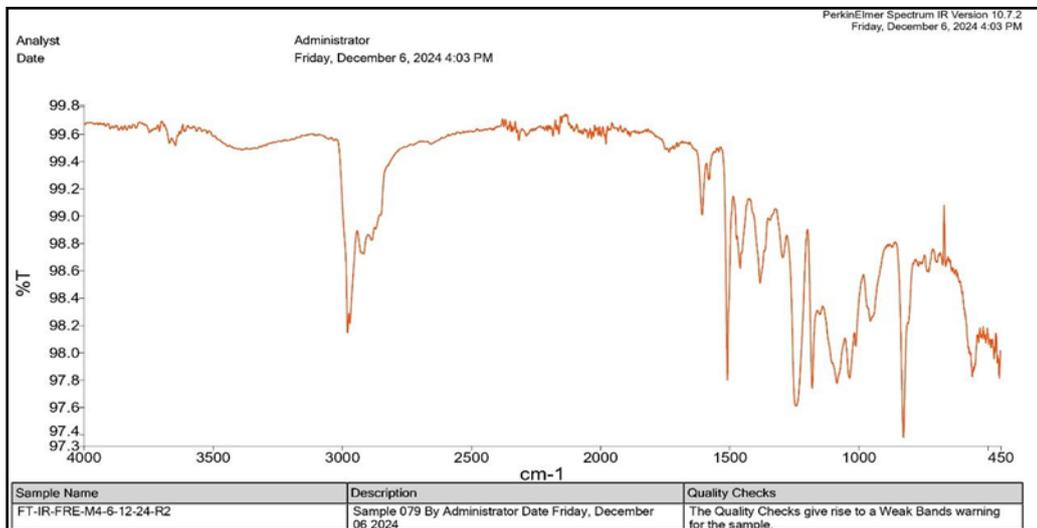
(a)



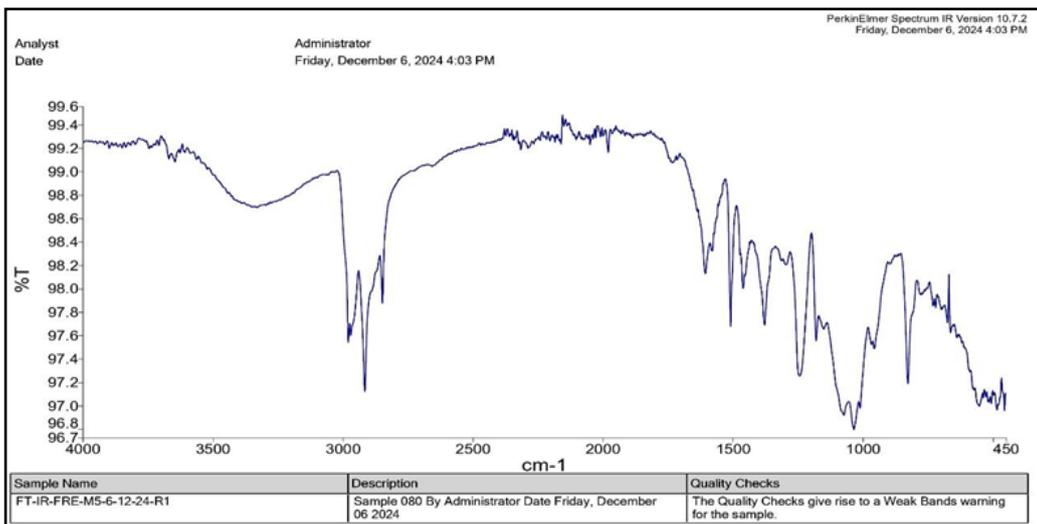
(b)



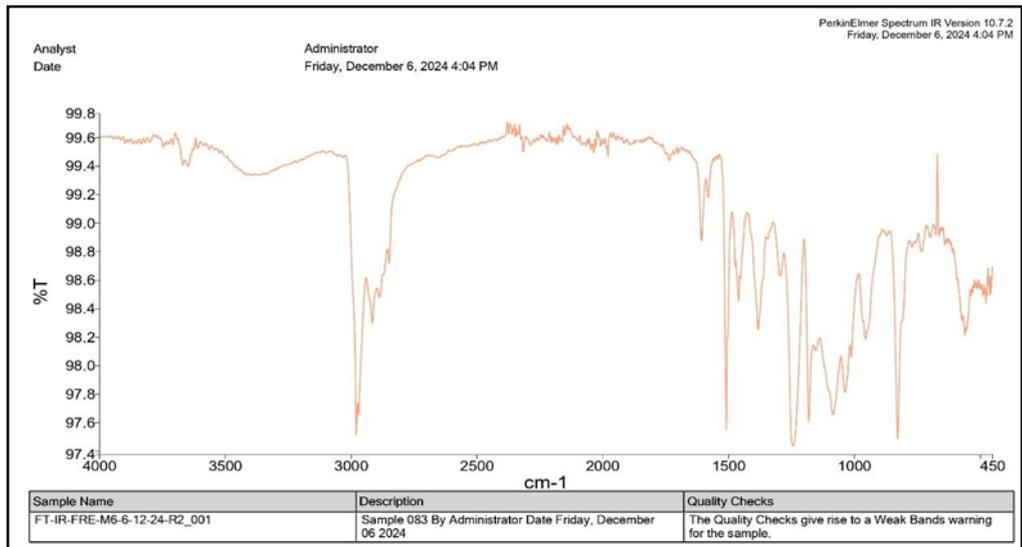
(c)



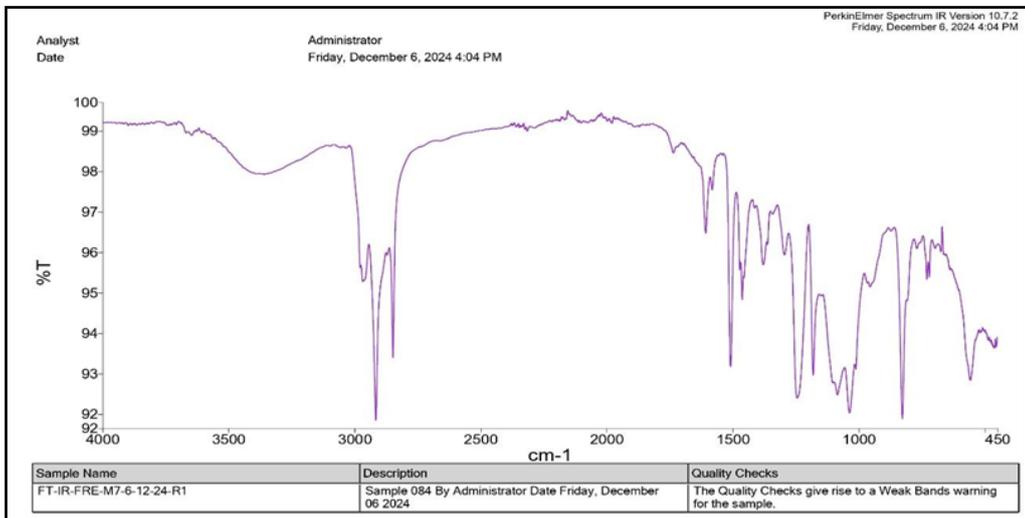
(d)



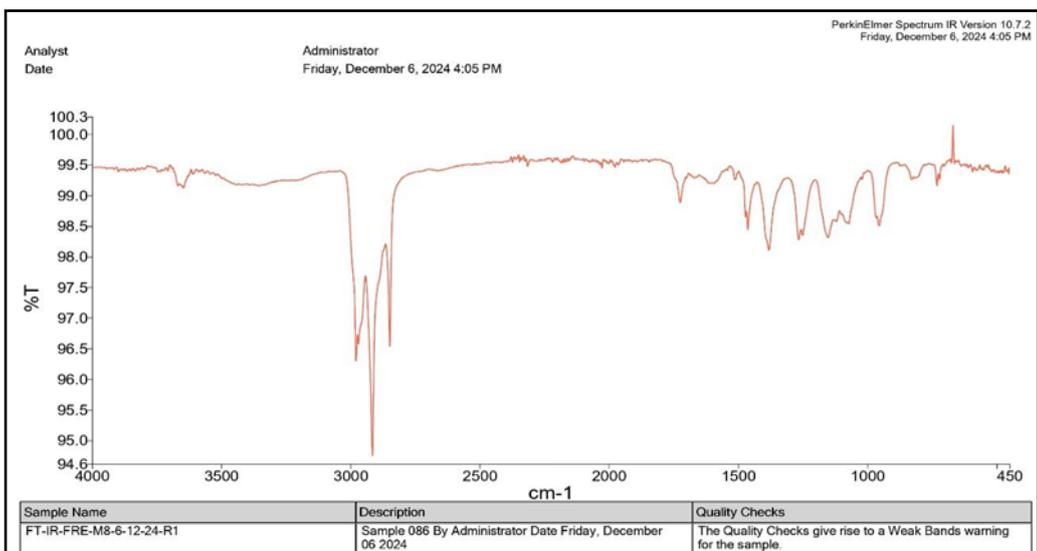
(e)



(f)



(g)



(h)

Fuente: Elaboración propia.

Los análisis FTIR de las muestras E2 al E8 mostrados en la Figura 40, también se pueden observar picos característicos compatibles con los patrones propios de las fibras vegetales, maguey y chambira, en un número de onda de aproximadamente 3265.00 cm^{-1} , que corresponde al estiramiento del OH.

Otras significativas vibraciones ocurren a partir del número de onda 1594.00 cm^{-1} , que corresponde a la vibración de los esqueletos aromáticos de lignina, entre 1374.50 y 1240.00 cm^{-1} , para la vibración de la celulosa y 1015.71 cm^{-1} al estiramiento del grupo funcional CO (ver Tabla 21).

El trabajo demuestra el potencial de esta técnica para dilucidar diferentes pasos durante la descomposición térmica de las fibras de maguey y chambira, proporcionando resultados extensibles a otras fibras lignocelulósicas, a través del análisis de la evolución de CO_2 , CO, H_2O , CH_4 , ácido acético, ácido fórmico, metanol, formaldehído y 2-butanona, y comparándolo con los materiales volátiles de la pirólisis de los componentes de las biomásas en mención (Benítez-Guerrero, M., *et al.*, 2014).

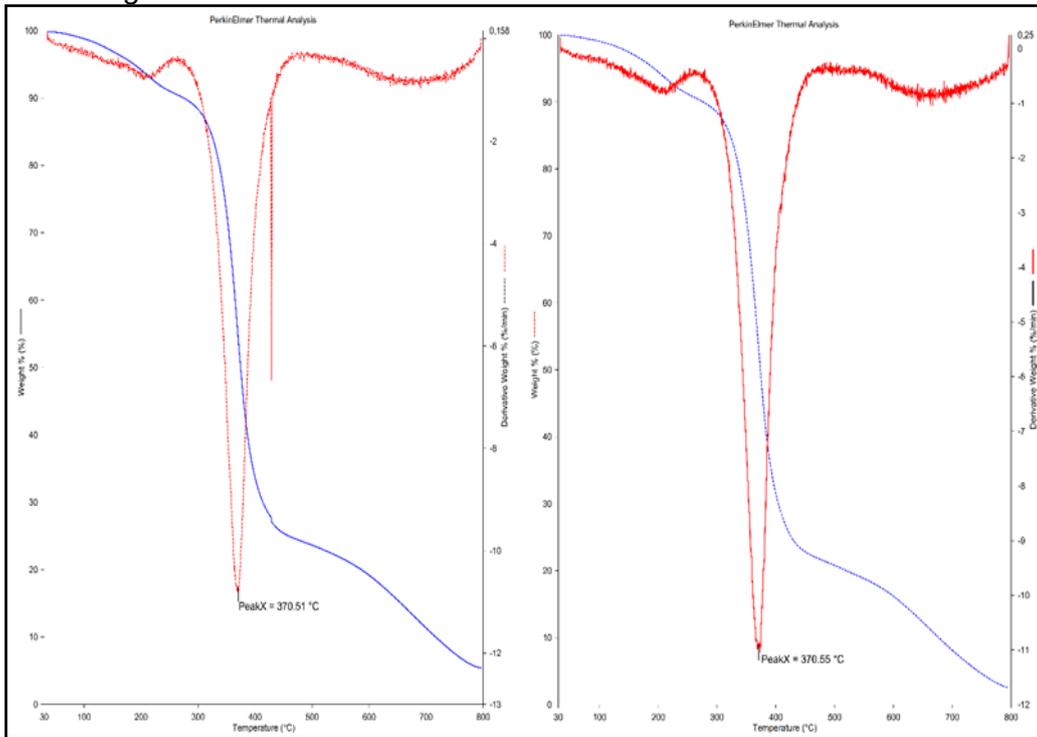
4.4.3 Análisis termogravimétricos

Los resultados de los análisis termogravimétricos de las muestras de materiales compuestos E1 al E8, se muestran en la Figura 41.

Asimismo, la Tabla 29, resume los valores de los picos de descomposición o endotérmicos y el % de pérdida total de peso de los experimentos E1 al E8.

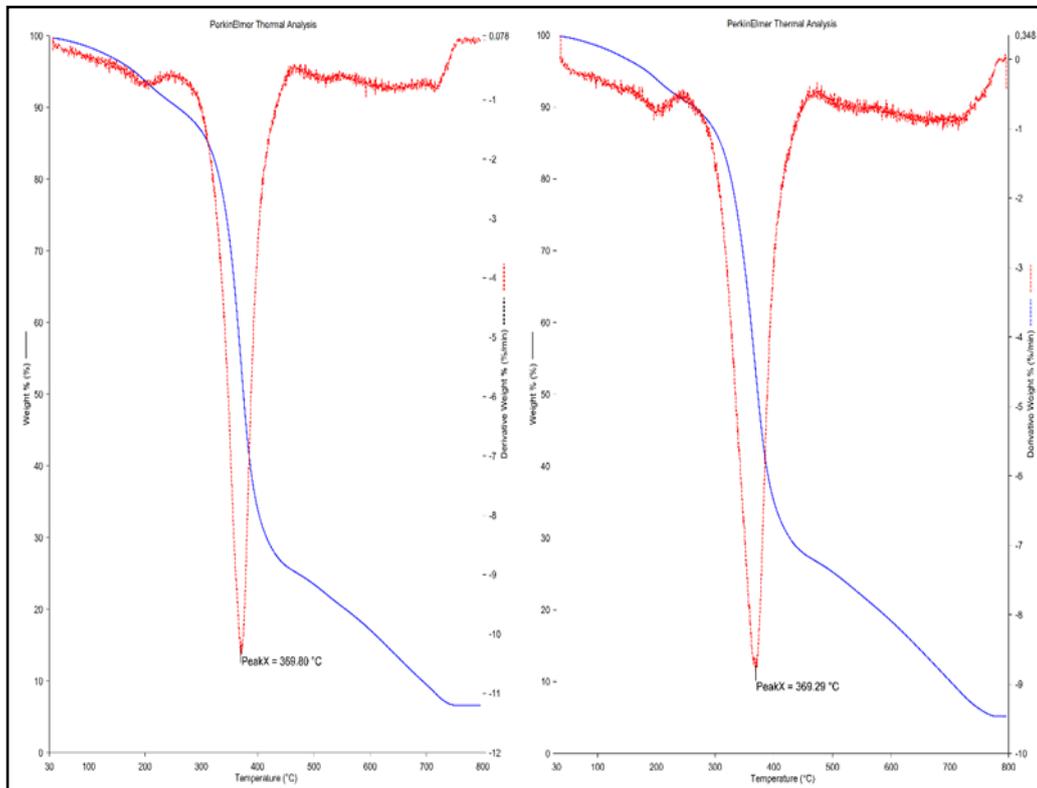
Figura 41

Análisis termogravimétricos de las muestras E1 al E8



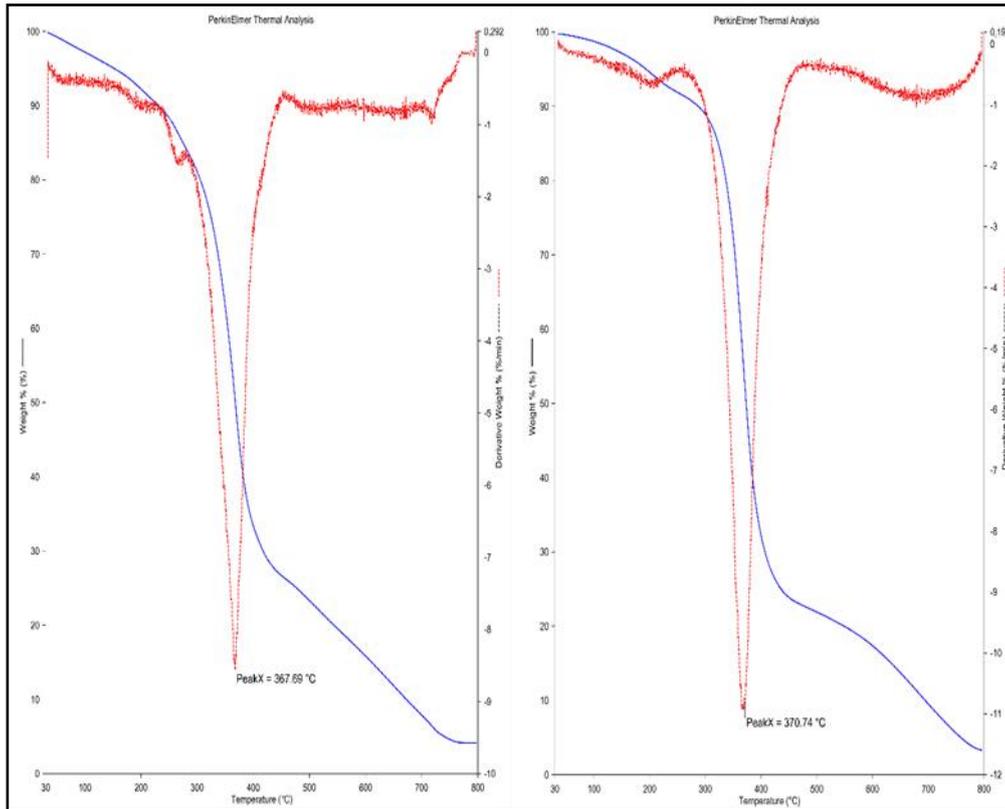
E1: Experimento 1

E2: Experimento 2



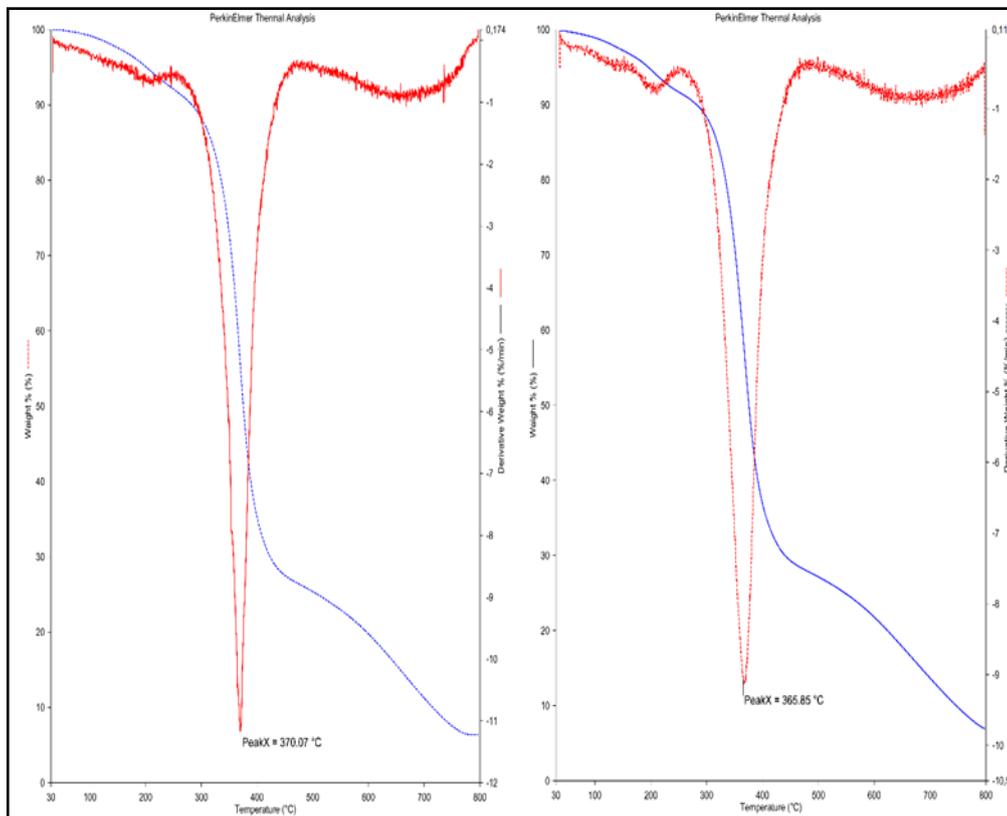
E3: Experimento 3

E4: Experimento 4



E5: Experimento 5

E6: Experimento 6



E7: Experimento 7

E8: Experimento 8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29*Resumen de resultados de análisis termogravimétricos*

#	DTG	TGA
Experimento	Picos endotérmicos, °C	% Pérdida de peso
E1	370.51	98
E2	370.55	95
E3	369.80	93
E4	369.29	95
E5	367.69	96
E6	370.74	97
E7	370.07	94
E8	365.85	93
FM	315.70	88
FC	334.13	95

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de materiales compuestos E1 al E8, mostrado en la Figura 41, observa valores muy similares de picos de descomposición térmica (entre 365.85 y 370.74), sin embargo, los picos de descomposición térmica de las fibras naturales maguey y chambira observaron 315.70 y 334.13 °C respectivamente. En el caso de las pérdidas totales de peso, las experiencias E1 al E8 fluctuaron entre 93 y 98 %, mientras que las fibras de maguey y chambira mostraron 88 y 95 % vía DTG, y 93.04 y 90.87% vía análisis de proximidad (Tabla 22). Estos datos permitieron determinar la estabilidad térmica de los compuestos de base polimérica epoxi modificado con escoria de acería y reforzados con de fibras naturales (maguey y chambira) a temperatura del ambiente incluso en temporada de verano en la ciudad de Lima-Perú. Indudablemente el calentamiento excesivo (25 a 800 °C) hizo que los componentes de fibra o sea la celulosa, hemicelulosa y lignina se deterioren y en consecuencia descompongan en torno de 370 °C. No olvidar que el análisis termogravimétrico (TGA) se realizó para determinar las propiedades térmicas de los compuestos de fibra. En este estudio, se ha demostrado el trabajo realizado en la matriz polimérica, resina epoxi, resina modificada con relleno de escoria de acería y compuestos a base de distintas proporciones de fibras de maguey y chambira permitieron validar sus

propiedades térmicas mediante técnicas de TGA (pérdida de peso total hasta los 800 °C). Según diversos estudios, el tipo de matriz afecta a la homogeneidad de la mezcla, la orientación y el proceso de fabricación, y las propiedades térmicas de los compuestos (Kumar, R. *et al.*, 2023).

4.4.4 **Análisis estadísticos de ensayos mecánicos y termogravimétricos**

Los resultados de los ensayos mecánicos se presentan en el ANEXO 1. Se utilizó lenguaje de programación Python junto con las siguientes bibliotecas *pandas*, *numpy*, *statsmodels.api*, *sklearn.preprocessing*, *matplotlib.pyplot* y *seaborn*, lo cual permitió realizar análisis estadísticos avanzados (regresión lineal múltiple y análisis de varianza ANOVA), junto a ello se cargó la data de los ensayos mecánicos como se puede ver en la ANEXO 2.

4.4.4.1 Ensayos de tracción. La Tabla 30 muestra la comparación de las dimensiones de cada probeta según norma sugerida por el laboratorio LABICER y el promedio de las dimensiones de las cinco probetas preparadas para cada experimento desde el E1 hasta el E8.

Tabla 30

Comparación de las dimensiones de las probetas para ensayo de tracción por cada experimento

Experimento	Dimensiones Estándar (mm) ASTM D3039	Dimensiones promedio (mm)	Error en el espesor (%)	Error en el ancho (%)
E1	175 x 25 x 2	175 x 24.73 x 2.85	+42.5	-1.08
E2	175 x 25 x 2	175 x 24.72 x 2.20	+10.0	-1.12
E3	175 x 25 x 2	175 x 24.54 x 2.48	+24.0	-1.84
E4	175 x 25 x 2	175 x 24.76 x 2.75	+37.5	-0.96
E5	175 x 25 x 2	175 x 24.81 x 3.69	+84.5	-0.76
E6	175 x 25 x 2	175 x 24.75 x 2.93	+46.5	-1.00
E7	175 x 25 x 2	175 x 24.66 x 2.68	+34.0	-1.36
E8	175 x 25 x 2	175 x 24.79 x 3.80	+90.0	-0.84

Fuente: Elaboración propia.

El error en el ancho se puede atribuir a la precisión del corte laser y este es mínimo (siempre en el rango $\pm 2\%$). No obstante, el error en el espesor debió controlarse con la

presión ejercida en los moldes metálicos, el cual mostró notables valores. Aunque estos moldes permitieron cierta flexibilidad en el ajuste de las dimensiones, también esto permitió que fuese difícil controlar con precisión el espesor, dado que el ajuste manual puede llevar a variaciones significativas en la presión y distribución del material dentro del molde.

Un espesor mayor o menor al especificado puede afectar directamente la rigidez, resistencia y respuesta elástica del material bajo carga, lo que puede llevar a interpretaciones erróneas de las propiedades mecánicas del material compuesto, como el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción y flexión.

Los resultados del ensayo de tracción se organizaron en la Tabla 31.

Tabla 31

Resultados de las pruebas de tracción para los materiales compuestos preparados

Experimento	Muestra	Resistencia máxima a la tracción (MPa)	Deformación en carga máxima (mm)
E1	Resina sola	43.8	5.6
E2	Resina + 5% escoria	33.1	4.5
E3	Resina + 5% escoria + 5% fibra de maguey	14.7	2.5
E4	Resina + 5% escoria + 7.5% fibra de maguey	22.6	3.6
E5	Resina + 5% escoria + 10% fibra de maguey	22.4	3.4
E6	Resina + 5% escoria + 5% fibra de chambira	27.0	3.6
E7	Resina + 5% escoria + 7.5% fibra de chambira	17.0	3.2
E8	Resina + 5% escoria + 10% fibra de chambira	30.0	4.4

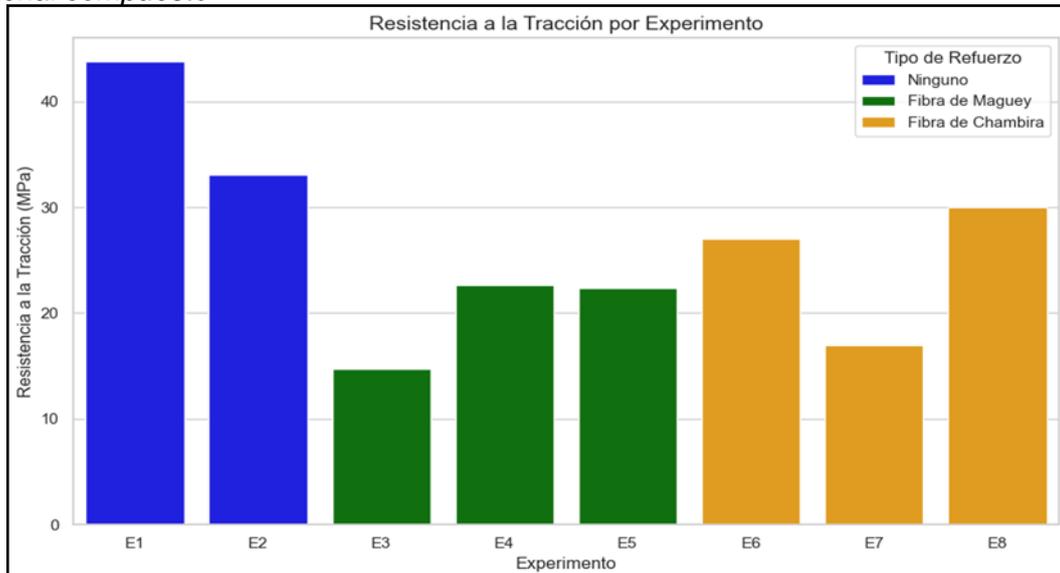
Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 31, las pruebas de resistencia a la tracción a través de los experimentos E1 al E8, se observó que la muestra de resina pura (E1) presentó una mayor resistencia y ductilidad comparada con las muestras reforzadas con escoria y fibras naturales de maguey y chambira.

Este resultado es notable, dado que, en teoría, la adición de refuerzos debería mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto. La Figura 42 muestra el comportamiento de la resistencia a la tracción para cada experimento (del E1 al E8).

Figura 42

Resistencia a la tracción máxima en MPa para cada una de las muestras preparadas de material compuesto



Fuente: Elaboración propia.

La disminución en la resistencia y ductilidad observadas en las muestras reforzadas con maguey (agave sisaleana) podría señalar una interfaz matriz-refuerzo subóptima o una dispersión no homogénea de los refuerzos dentro de la matriz. Esto indica que la compatibilidad entre la matriz y el refuerzo, junto con la técnica de mezcla y distribución de los refuerzos son fundamentales para la explotación eficaz de las potenciales propiedades inherentes a los materiales compuestos.

4.4.4.1.1 Regresión lineal múltiple. Para analizar la influencia de las variables independientes en el análisis de ensayo de tracción, se aplicó el modelo de regresión lineal múltiple, la cual permitió evaluar el efecto individual y combinado del tipo de refuerzo y del contenido de escoria sobre la respuesta mecánica del material (variable dependiente). Para este efecto, en el ANEXO 2 se presentó la codificación utilizada para la implementación en *jupyter notebook*, seguida de los gráficos que ilustran los resultados obtenidos. También se crearon variables *dummy* para separar el tipo de refuerzo, posteriormente se definieron las variables independientes y dependiente, para esto se agregó una constante al modelo, se ajustó estadísticamente y se elaboró un resumen. Ver ANEXO 3.

El resumen del modelo de la regresión lineal múltiple se puede apreciar en la Figura 43.

Figura 43

Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para el ensayo de tracción

OLS Regression Results				coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Dep. Variable:	Resistencia_Traccion	R-squared:	0.830	const	23.4292	7.029	3.333	0.045	1.060 45.798
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.604	Relleno_Escoria	-2.1400	1.670	-1.281	0.290	-7.456 3.176
Method:	Least Squares	F-statistic:	3.670	Contenido_Refuerzo	1.0700	1.181	0.906	0.432	-2.689 4.829
Date:	Fri, 07 Feb 2025	Prob (F-statistic):	0.157	Tipo_Refuerzo_Fibra de Chambira	3.9125	6.147	0.637	0.570	-15.649 23.474
Time:	18:21:29	Log-Likelihood:	-21.635	Tipo_Refuerzo_Fibra de Maguey	-0.8542	6.147	-0.139	0.898	-20.415 18.707
No. Observations:	8	AIC:	53.27	Tipo_Refuerzo_Ninguno	20.3708	5.654	3.603	0.037	2.377 38.365
Df Residuals:	3	BIC:	53.67	Omnibus:	3.035	Durbin-Watson:	3.212		
Df Model:	4			Prob(Omnibus):	0.219	Jarque-Bera (JB):	0.856		
Covariance Type:	nonrobust			Skew:	-0.800	Prob(JB):	0.652		
				Kurtosis:	3.090	Cond. No.	3.85e+17		

Nota. Resultados obtenidos con el lenguaje Python, Fuente: Elaboración propia.

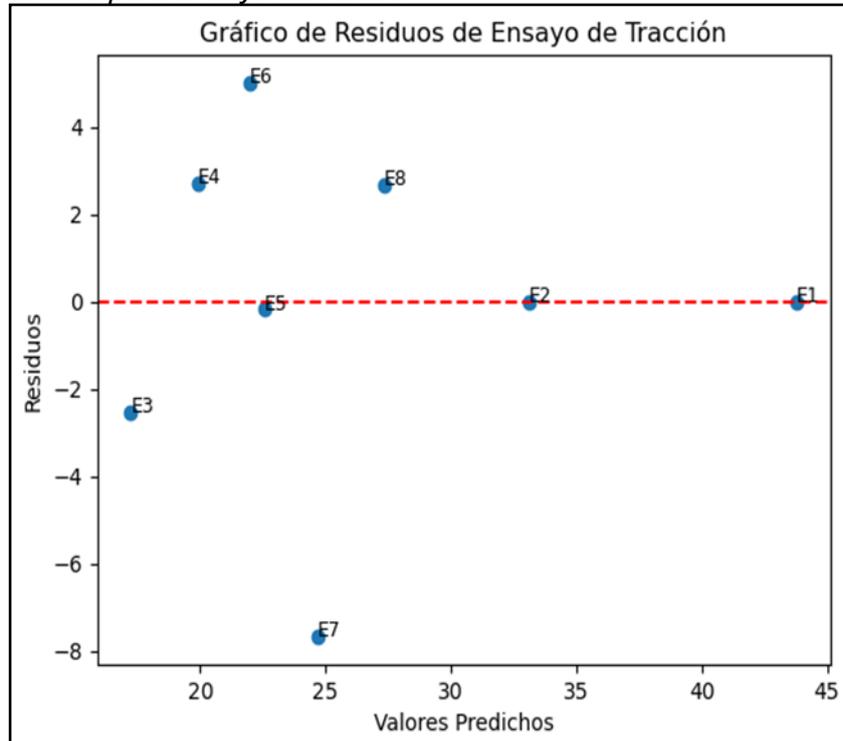
De la Figura 43, se observa que el valor del R^2 (*R-squared*) experimental igual a 0.830 indicó que el mencionado modelo estadísticamente explica el 83 % de la variabilidad en la resistencia a la tracción, sin embargo, el R^2 ajustado (*Adj. R-squared*) es bajo 0.604. Esta diferencia significativa de R^2 y R^2 ajustado puede indicar que el modelo incluye variables que no contribuyen mucho a explicar la variabilidad de la respuesta o variable dependiente (resistencia a la tracción). Por otro lado, *F-statistic* (3.67) y *Prob(F-statistic)* o *p-value* de 0.157 ($> \alpha = 0.05$), indicó que el modelo de regresión lineal múltiple en su conjunto no es estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95%. Esto se visualizó en el desglose de los materiales que se utilizaron como relleno escoria, contenido y tipo refuerzo, donde ($p > 0.05$), determinó que su influencia no es “significativa” con la variable dependiente (resistencia a la tracción). No obstante, la variable tipo de refuerzo ninguno o sin refuerzo, donde ($p < 0.05$) es significativa, es decir, si influencia a la variable dependiente (resistencia a la tracción).

De la Figura 44, muestra el gráfico de residuos que sirvió para evaluar la calidad del ajuste del modelo e identificar los posibles errores. Los valores predichos (eje “X”), son los valores que el modelo de regresión lineal múltiple estimó para la variable dependiente (resistencia a la tracción), basándose en las fluctuaciones de las variables independientes

(relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo). La codificación empleada se observa en el ANEXO 4.

Figura 44

Gráfico de residuos para ensayo de tracción



Fuente: Elaboración propia.

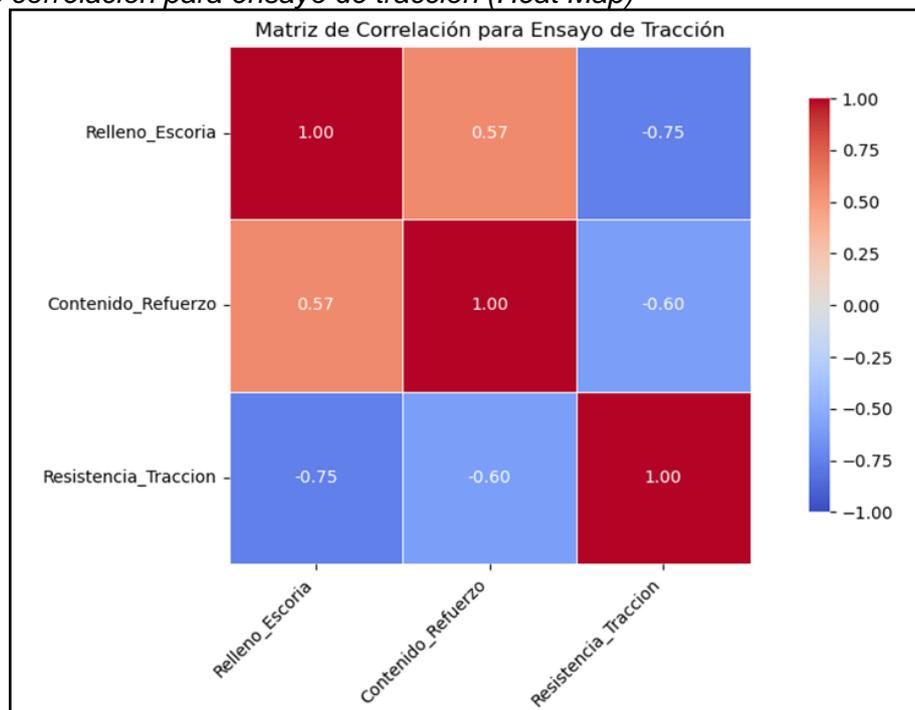
Los puntos de la experimentación (E1 al E8) están distribuidos alrededor de la línea punteada de color rojo, lo que indicó que los residuos entre los valores predichos y observados (reales) no siguieron un patrón sistemático, es decir no hay evidencia de relaciones no lineales entre las variables del modelo y la respuesta. Los puntos E3 y E7 tienen residuos más alejados de 0, lo que podría indicar que son valores atípicos en la experimentación. Por otro lado, la dispersión de los residuos es similar en todo el rango de los valores predichos, lo que sugiere homocedasticidad (varianza constante). Esto podría ser un buen indicador de que el modelo correlacionó satisfactoriamente los datos a través del estadístico R^2 (*R-squared*) alto, sin embargo, como se observó en la Figura 43 los valores de *Adj. R-squared* y *Prob(F-statistic)* o *p-value*, no cumplieron con esta inferencia.

La Figura 45, gráfica de Matriz de Correlación (*Heat Map*) proporcionó una idea clara de cómo las variables independientes (relleno de escoria, contenido refuerzo y la

dependiente (resistencia a la tracción) están relacionadas entre sí. La codificación empleada es mejor detallada en el ANEXO 5.

Figura 45

Matriz de correlación para ensayo de tracción (Heat Map)



Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de la gráfica Matriz de Correlación para ensayo de tracción, Figura 45, se observa que para relleno de escoria vs. contenido de refuerzo (0.57, rojo claro), existe una correlación positiva moderada, debido a que a medida que aumenta el porcentaje de escoria en el relleno, también tiende a incrementarse el contenido de refuerzo, aunque no de manera directa, sin embargo vs. resistencia a la tracción (-0.75, azul oscuro), la correlación es fuertemente negativa, es decir, si aumenta el porcentaje de escoria en el relleno, la resistencia a la tracción disminuye significativamente.

Por otra parte, para el contenido de refuerzo vs. resistencia a la tracción (-0.60, azul claro), existe correlación negativa moderada. Esto es un indicador de que a medida que se incrementa el contenido de refuerzo, la resistencia a la tracción tiende a disminuir, aunque la relación no es tan fuerte como el caso de relleno de escoria vs. resistencia a la tracción.

4.4.4.1.2 Análisis de Varianza (Analysis of Variance - ANOVA). El análisis de varianza (ANOVA), permitió determinar si las variables independientes (relleno de escoria,

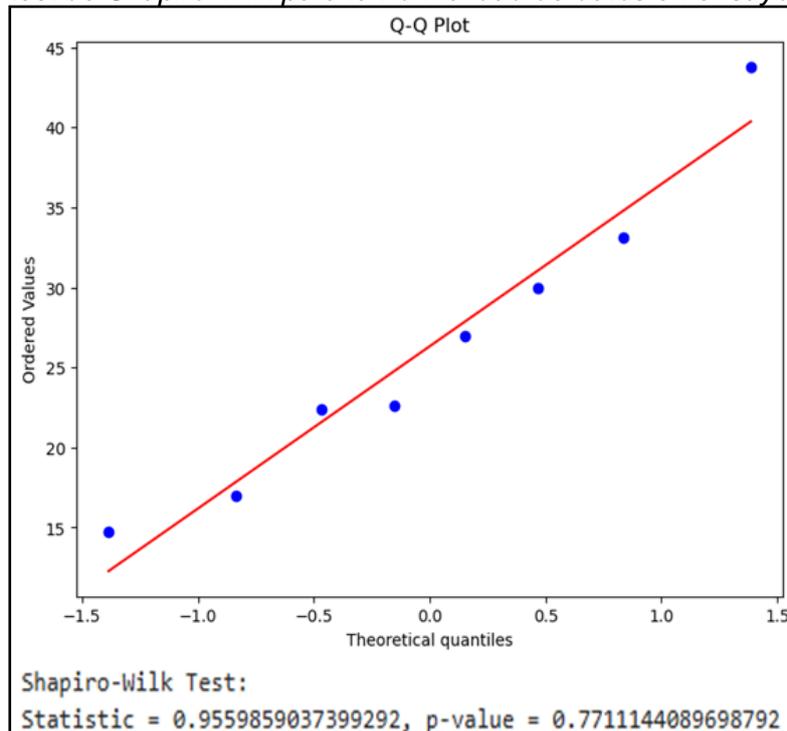
tipo y contenido de refuerzo), además de sus interacciones, tienen un efecto significativo en la variable dependiente (resistencia a la tracción).

Antes de realizar el análisis de varianza (ANOVA), es fundamental realizar la formulación de las hipótesis (nula y alternativa), verificar los supuestos de normalidad de los datos y homogeneidad de varianzas, para garantizar la validez de los resultados.

- **Hipótesis nula (H_0)** : No existe una diferencia significativa en la resistencia a la tracción entre los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo de refuerzo y contenido de refuerzo.
- **Hipótesis Alternativa (H_a)**: Al menos uno de los factores (relleno de escoria, tipo de refuerzo o contenido de refuerzo) o sus interacciones tiene un efecto significativo en la resistencia a la tracción.
- **Normalidad de los datos**: Se realiza el *test de Shapiro-Wilk* para verificar la normalidad, además se visualiza con un gráfico Q-Q (*Quantile – Quantile plot*) como se ve en la Figura 46. La codificación empleada se ve en el Anexo 6.

Figura 46

Gráfico Q-Q y test de Shapiro-Wilk para la normalidad de datos en ensayo de tracción



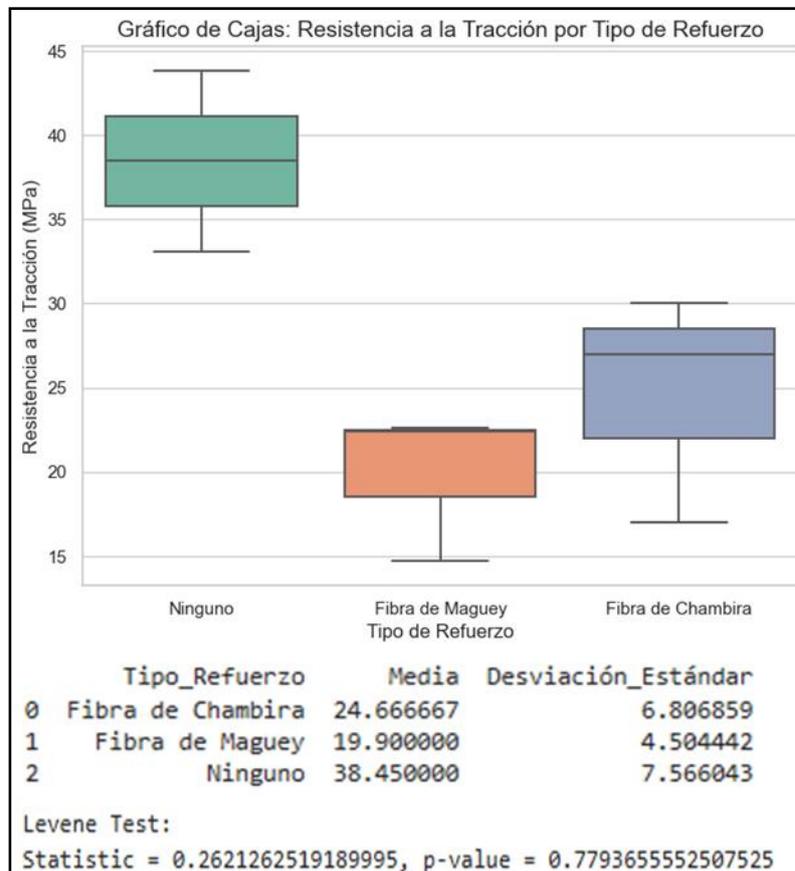
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 46, la prueba o *Test de Shapiro-Wilk* el $p\text{-value} = 0.77 > 0.05$, no rechaza la hipótesis nula (H_0) y se asume normalidad en los datos. Esto se verificó con la gráfica Q-Q (*Quantile – Quantile plot*), debido a que los puntos siguen la línea recta cercana a la diagonal.

- **Homogeneidad de varianzas, medición de la media y desviación estándar:** Se realizó el *test de Levene*, además se visualizó con un gráfico de cajas (*boxplot*) como se ve en la Figura 47. La codificación empleada se detalla en el ANEXO 7.

Figura 47

Grafica de Cajas (Boxplot), media, desviación estándar y Test de Levene para ensayo de tracción



Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de la Figura 47, el *Test de Levene* ($p\text{-value} = 0.78 > 0.05$), no se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica homogeneidad de varianza. Esto se verifica con la gráfica de cajas (*Boxplot*), los rangos intercuartílicos (cajas), y las longitudes de los bigotes son similares. Por otro lado, para tipo de refuerzo ninguno o sin refuerzo, la media está en torno a 40 MPa, el rango de los datos (distancia entre los bigotes) es moderado,

pero más amplio que los otros grupos indicando mayor variabilidad (desviación estándar = 7.56). Luego, tipo de refuerzo fibra de maguey, la media está cerca de 20 MPa, mucho más baja que la del tipo de refuerzo ninguno, el rango intercuartílico (caja) es estrecho, lo que indicó una poca dispersión de los datos (desviación estándar = 4.5). Por último, tipo de fibra de chambira, la media está cerca de 25 MPa, el rango intercuartílico y los bigotes son más amplios que los del grupo “fibra de maguey”, indicando mayor dispersión que estos (desviación estándar = 6.8), sin embargo, muestra menos variabilidad que el grupo “ninguno”.

A través de los supuestos de normalidad de los datos y homogeneidad de varianza se garantizaron las condiciones de validación de los resultados del análisis de varianza (ANOVA). En consecuencia, se realizaron interacciones, es decir se aplicaron modelos de regresión, para buscar el que mejor se ajuste a los resultados o sea el más óptimo. Esto se puede apreciar en la Tabla 32.

Tabla 32

Interacción de variables independientes para ensayo de tracción – ANOVA

Modelo	Interacción de variables Independientes para Ensayo de Tracción	Tamaño de Interacción
1	{C(Contenido refuerzo) + C(Relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo Refuerzo FC + Tipo Refuerzo ninguno)} ³	3
2	{C(Contenido refuerzo) + C(Relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo Refuerzo FC + Tipo Refuerzo ninguno)} ²	2
3	C(Contenido refuerzo) + C(Relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo Refuerzo FC + Tipo Refuerzo ninguno)	1
4	C(Relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)	1
5	C(Relleno escoria) * (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)	1
6	C(Relleno escoria) * (Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)	1

Nota. FC y FM se refiere fibra de chambira y maguey, Fuente: Elaboración propia.

El resumen de la regresión de cada uno de los modelos se puede observar en la Tabla 33.

Tabla 33*Resumen de las regresiones de los modelos de interacción para ensayo de tracción*

Modelo	R ²	R ² Ajustado	F-statistic	Prob(F-statistic)	AIC	BIC	Cond.N°
1	1.000	NaN	NaN	NaN	-457.3	-456.6	5.83
2	1.000	NaN	NaN	NaN	-467.5	-466.9	5.73
3	0.860	0.511	2.464	0.313	53.71	54.19	3.29E+17
4	0.784	0.622	4.837	0.081	53.21	53.52	6.09E+16
5	0.784	0.622	4.837	0.081	53.21	53.52	7.93E+50
6	0.784	0.622	4.837	0.081	53.21	53.52	3.66E+17

Nota. NaN (not a number) se refiere valor no definido, Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 33, presentada corresponde a los resultados de las regresiones lineales usando el modelo OLS (Mínimos Cuadrados Ordinarios), donde se evaluó la interacción entre las variables categóricas y cuantitativas.

En el modelo 1 y 2 de interacción cúbica y cuadrática respectivamente, se tiene que reducir el número de términos de interacción debido que el modelo tiene tantos parámetros como observaciones, lo que provoca problemas estadísticos.

Por el contrario, el modelo 3 indicó el mayor R² (0.860) en comparación con los demás modelos, sin embargo, la diferencia entre R² y R² ajustado es significativa. A partir del modelo 4, 5 y 6 los factores estadísticos como: R², R² ajustado, *F-statistic*, *Prob(F-statistic)*, AIC y BIC son iguales.

La diferencia se concentró en el valor número de condición (Cond. N°), la cual mide la colinealidad, es decir la estabilidad del modelo, por tal razón el menor número de condición entre los modelos interactuados es el 4.

En base a estos resultados, se seleccionó el modelo 4 como el más adecuado, ya que minimiza la complejidad del modelo, mantiene un buen ajuste y presenta un menor riesgo de colinealidad en comparación con los demás.

En la Figura 48, se presentó la regresión estadística para el modelo 4 con las interacciones de tipo de refuerzo y relleno de escoria.

Figura 48

Regresión del modelo 4 para ensayo de tracción

OLS Regression Results				coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]	
Dep. Variable:	Resistencia_Traccion	R-squared:	0.784	Intercept	27.4417	5.334	5.144	0.007	12.632	42.252
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.622	C(Relleno_Escoria)[T.5]	-10.7000	8.162	-1.311	0.260	-33.362	11.962
Method:	Least Squares	F-statistic:	4.837	Tipo_Refuerzo_FM	3.1583	4.165	0.758	0.491	-8.406	14.723
Date:	Sat, 01 Mar 2025	Prob (F-statistic):	0.0810	Tipo_Refuerzo_FC	7.9250	4.165	1.903	0.130	-3.640	19.490
Time:	15:08:50	Log-Likelihood:	-22.603	Tipo_Refuerzo_Ninguno	16.3583	3.435	4.763	0.009	6.822	25.895
No. Observations:	8	AIC:	53.21	Omnibus:	1.467	Durbin-Watson:	2.691			
Df Residuals:	4	BIC:	53.52	Prob(Omnibus):	0.480	Jarque-Bera (JB):	0.852			
Df Model:	3			Skew:	-0.720	Prob(JB):	0.653			
Covariance Type:	nonrobust			Kurtosis:	2.306	Cond. No.	6.09e+16			

Nota. Resultados obtenidos con el lenguaje Python, Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de la Figura 48, en el desglose de los materiales como relleno de escoria, tipo de refuerzo fibra de maguey y chambira se observó que no son significativos ($P > |t|$ o $p > 0.05$) para la variable respuesta o dependiente (resistencia a la tracción), sin embargo, el tipo de refuerzo ninguno o sin refuerzo ($P > |t|$ o $p = 0.009 < 0.05$), es significativo. Esto indica que no usar refuerzo aumenta la resistencia a la tracción.

En la siguiente Figura 49, se presentó el análisis de varianza (ANOVA) del modelo 4 la cual evalúa los efectos del tipo de refuerzo y el relleno de escoria y su interacción sobre la variable respuesta o dependiente (resistencia a la tracción). La codificación empleada se ve en el ANEXO 8.

Figura 49

Análisis de varianza (ANOVA) del modelo 4 para ensayo de tracción

	df	sum_sq	mean_sq	F	PR(>F)
C(Relleno_Escoria)	1.0	349.000714	349.000714	10.476831	0.031770
Tipo_Refuerzo_FM	1.0	81.026786	81.026786	2.432385	0.193864
Tipo_Refuerzo_FC	1.0	53.340833	53.340833	1.601266	0.274415
Tipo_Refuerzo_Ninguno	1.0	40.564591	40.564591	1.217729	0.331727
Residual	4.0	133.246667	33.311667	NaN	NaN

Nota. Resultados obtenidos con el lenguaje Python, Fuente: Elaboración propia.

Del análisis estadístico (ANOVA), de la Figura 49, se observa que el factor relleno de escoria tiene una influencia significativa ($p = 0.0317$), lo que indicó que la presencia de este material impacta en las propiedades mecánicas del compuesto. Sin embargo, los tipos

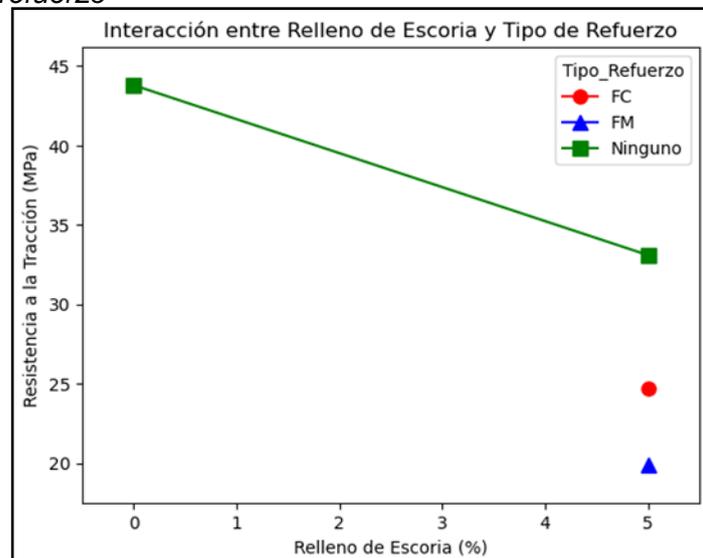
de refuerzo fibra de maguey y chambira no mostraron un efecto estadísticamente significativo ($p > 0.05$).

La codificación en lenguaje Python de las gráficas de interacción de la variación de la resistencia a la tracción en función de sus variables independientes se puede mostrar en el ANEXO 9.

La Figura 50, muestra la gráfica de interacción entre el relleno de escoria y tipo de refuerzo con la resistencia a la tracción.

Figura 50

Gráfica de variación de la resistencia a la tracción en función a la interacción de relleno de escoria y tipo de refuerzo



Fuente: Elaboración propia.

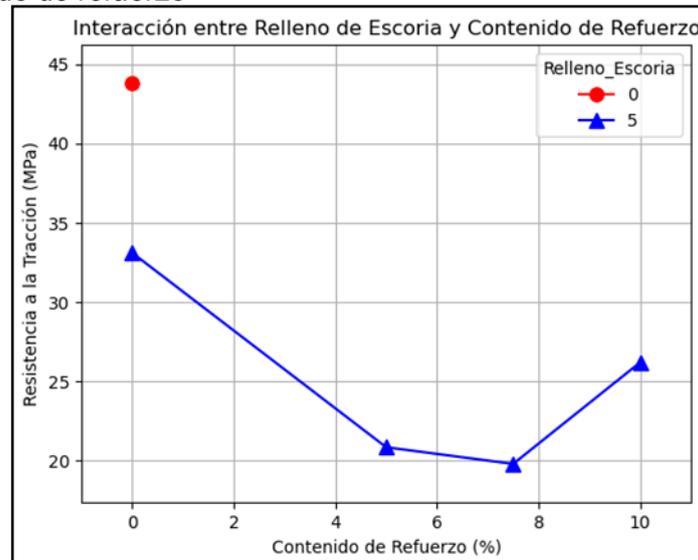
El análisis de la interacción entre el relleno de escoria y el tipo de refuerzo en la resistencia a la tracción muestra una disminución generalizada de las propiedades mecánicas con el aumento del contenido de escoria. En ausencia de refuerzo, la resistencia a la tracción disminuyó de 45 a 35 MPa cuando el contenido de escoria aumentó de 0 a 5 %. En el caso de los materiales reforzados con fibras de chambira (círculo rojo) y maguey (triángulo azul), la resistencia a la tracción se observa aún más afectada con la adición de 5% de escoria. Las muestras presentaron valores significativamente menores, aproximadamente 25 MPa, para chambira y 20 MPa para maguey, lo que preestablece que

la combinación de fibras naturales con escoria no es favorable para mejorar esta propiedad mecánica.

La Figura 51, muestra la gráfica de interacción entre el relleno de escoria y contenido de refuerzo con la resistencia a la tracción.

Figura 51

Grafica de variación de la resistencia a la tracción en función a la interacción de relleno de escoria y contenido de refuerzo



Fuente: Elaboración propia.

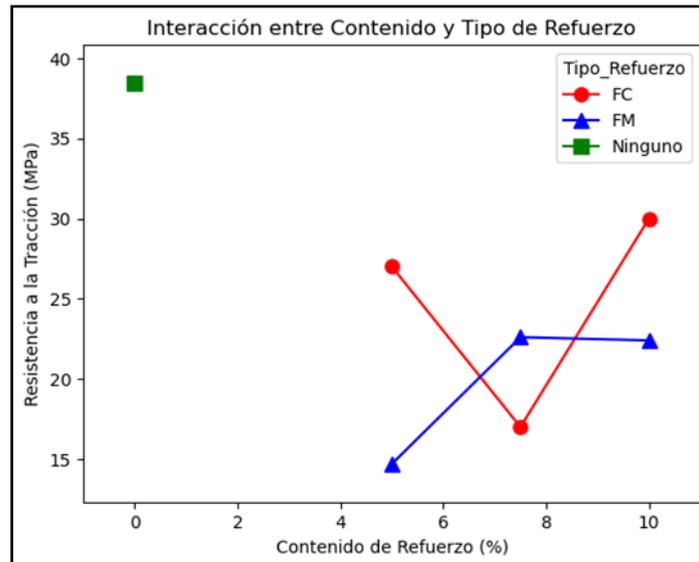
El análisis de la interacción entre el relleno de escoria y el contenido de refuerzo en la resistencia a la tracción reveló un comportamiento no lineal en la respuesta mecánica del material. Se observó que en ausencia de escoria 0% (círculo rojo), la resistencia a la tracción es la más alta, aproximadamente 45 MPa, pero cuando se introduce un 5% de escoria (triángulo azul), ésta disminuyó notablemente. En este caso, con un 0% de refuerzo, la resistencia inicial es de aproximadamente 35 MPa, pero a medida que aumenta el contenido de refuerzo, sufre una reducción hasta valores cercanos a 18 MPa en concentraciones intermedias (4-6%). Sin embargo, a partir del 8% de refuerzo, se observó una leve recuperación, alcanzando aproximadamente 27 MPa con un 10% de refuerzo. Estos resultados demostraron que la combinación de escoria y refuerzo tiene un efecto negativo en la resistencia a la tracción en bajas concentraciones de refuerzo, sin embargo, la ligera recuperación observada a mayores contenidos de refuerzo podría estar

relacionada con una mejor dispersión de las fibras y una mayor contribución estructural del refuerzo en la matriz.

La Figura 52, muestra la gráfica de interacción entre el contenido y tipo de refuerzo con la resistencia a la tracción.

Figura 52

Grafica de variación de la resistencia a la tracción en función a la interacción de contenido y tipo de refuerzo



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la interacción entre el contenido y tipo de refuerzo en la resistencia a la tracción muestra variaciones significativas en la respuesta mecánica del material. Se observó que, en ausencia de refuerzo (cuadrado verde) la resistencia a la tracción es la más alta, aproximadamente 40 MPa, sin embargo, al introducir refuerzos, disminuye considerablemente. Para el refuerzo con fibras de chambira (línea y círculo rojo), se presentó una tendencia fluctuante: con un 5 % de refuerzo, la resistencia es aproximadamente 26 MPa, pero disminuye a valores cercanos a 17 MPa con un 7.5 %, para luego recuperarse a 30 MPa con un 10%. En el caso del refuerzo con fibras de maguey (línea y triángulo azul), la resistencia es menor en comparación con chambira, alcanzando su valor más bajo de aproximadamente 14 MPa con un 5 % de refuerzo, pero experimenta un incremento hasta 22 MPa con un 7.5 % y se estabiliza en 22-23 MPa con un 10% de refuerzo. Estos resultados sugieren que la introducción de refuerzos genera

una disminución inicial, aunque a mayores concentraciones de refuerzo ($\geq 8\%$), se observó una recuperación en la resistencia a la tracción.

4.4.4.2 Ensayos de flexión. La comparación del promedio de las dimensiones de las 5 probetas por experimento (E1 al E8), y las de la norma ASTM D790, se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34

Comparación de las dimensiones de las probetas para ensayo de flexión por cada experimento

Experimento	Dimensiones estándar (mm) ASTM D790	Dimensiones promedio (mm)	Error en espesor (%)
E1	200 x 50 x ≥ 2	199.4 x 49.60 x 2.79	+10.5
E2	200 x 50 x ≥ 2	199.2 x 49.67 x 2.18	+9.0
E3	200 x 50 x ≥ 2	199.1 x 49.76 x 3.08	+54.0
E4	200 x 50 x ≥ 2	199.2 x 50.00 x 3.03	+51.5
E5	200 x 50 x ≥ 2	199.5 x 49.85 x 4.05	+102.5
E6	200 x 50 x ≥ 2	199.3 x 49.75 x 2.93	+46.5
E7	200 x 50 x ≥ 2	199.3 x 49.85 x 2.68	+34.0
E8	200 x 50 x ≥ 2	199.2 x 49.80 x 3.80	+90.0

Fuente: Elaboración propia.

La variabilidad de la toma de dimensiones del espesor de la probeta se puede reflejar en la desviación estándar, lo que sugiere que las diferencias en la uniformidad del material o proceso de manufactura son notablemente significativas para las pruebas, principalmente E1, E2, E6 y E7, debido a que estas muestran los errores más bajos. Los resultados de la prueba de la resistencia a la flexión se observan en la Tabla 35.

Tabla 35

Resultados de las pruebas de flexión para los materiales compuestos preparados

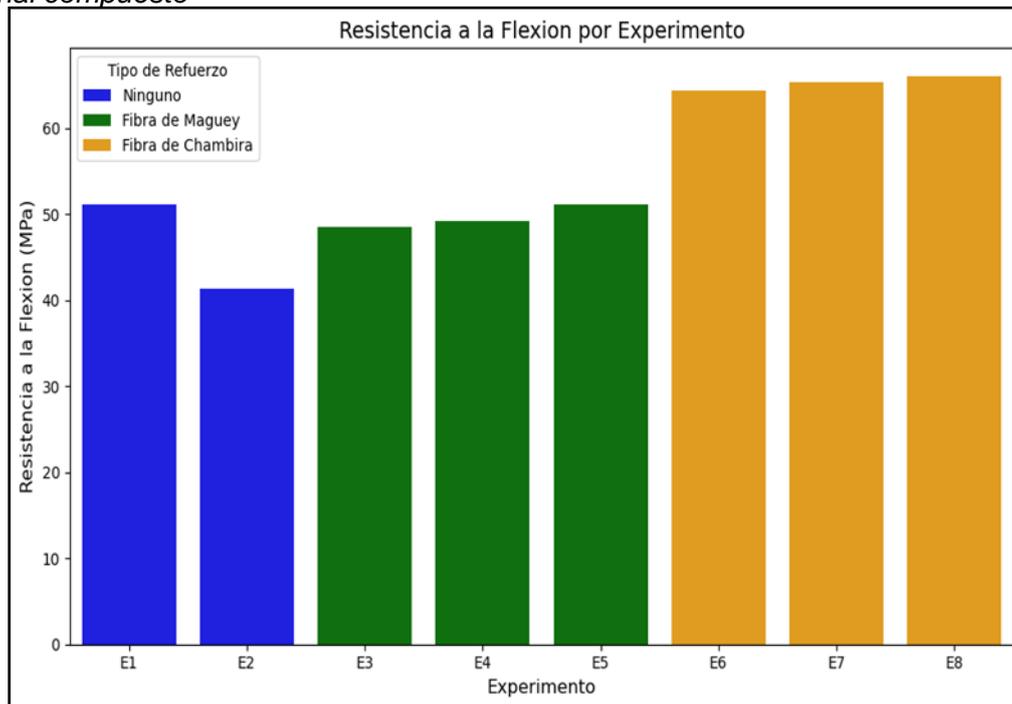
Experimento	Muestra	Resistencia media a la flexión (MPa)	Desviación estándar
E1	Resina sola	51.2	18.44
E2	Resina + 5% escoria	41.3	18.52
E3	Resina + 5% escoria + 5% fibra de maguey	48.5	10.13
E4	Resina + 5% escoria + 7.5% fibra de maguey	49.2	14.37
E5	Resina + 5% escoria + 10% fibra de maguey	51.2	10.50
E6	Resina + 5% escoria + 5% fibra de chambira	64.4	6.62
E7	Resina + 5% escoria + 7.5% fibra de chambira	65.3	1.77
E8	Resina + 5% escoria + 10% fibra de chambira	66.0	18.99

Fuente: Elaboración propia.

Es notable que los experimentos con fibra de chambira presentaron un incremento en la resistencia a la flexión en comparación con las fibras de maguey y los compuestos solo con resina y escoria, además la Figura 53 exhibe su evolución para cada experimento.

Figura 53

Resistencia a la flexión máxima en MPa para cada una de las muestras preparadas de material compuesto



Fuente: Elaboración propia.

4.4.4.2.1 Regresión lineal múltiple. Análogamente al análisis anterior, ensayo de tracción, se aplicó el mismo modelo de regresión lineal múltiple para el ensayo de flexión. La codificación utilizada en lenguaje Python, sigue los mismos pasos que se utilizaron en la sección de análisis estadístico para ensayo de tracción, ver ANEXO 3.

La Figura 54, muestra el resumen de resultados del modelo de la regresión lineal múltiple.

Figura 54

Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para ensayo de flexión

OLS Regression Results				coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Dep. Variable:	Resistencia_Flexion	R-squared:	0.999	const	44.8542	0.528	84.917	0.000	43.173 46.535
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.998	Relleno_Escoria	-1.9800	0.126	-15.774	0.001	-2.379 -1.581
Method:	Least Squares	F-statistic:	769.6	Contenido_Refuerzo	0.4300	0.089	4.845	0.017	0.148 0.712
Date:	Thu, 13 Feb 2025	Prob (F-statistic):	7.59e-05	Tipo_Refuerzo_Fibra de Chambira	27.0542	0.462	58.571	0.000	25.584 28.524
Time:	20:27:45	Log-Likelihood:	-0.92886	Tipo_Refuerzo_Fibra de Maguey	11.4542	0.462	24.798	0.000	9.984 12.924
No. Observations:	8	AIC:	11.86	Tipo_Refuerzo_Ninguno	6.3458	0.425	14.935	0.001	4.994 7.698
Df Residuals:	3	BIC:	12.25	Omnibus:	0.156	Durbin-Watson:	2.088		
Df Model:	4			Prob(Omnibus):	0.925	Jarque-Bera (JB):	0.133		
Covariance Type:	nonrobust			Skew:	0.139	Prob(JB):	0.936		
				Kurtosis:	2.433	Cond. No.	3.85e+17		

Nota: Resultados obtenidos con el lenguaje Python, Fuente: Elaboración propia.

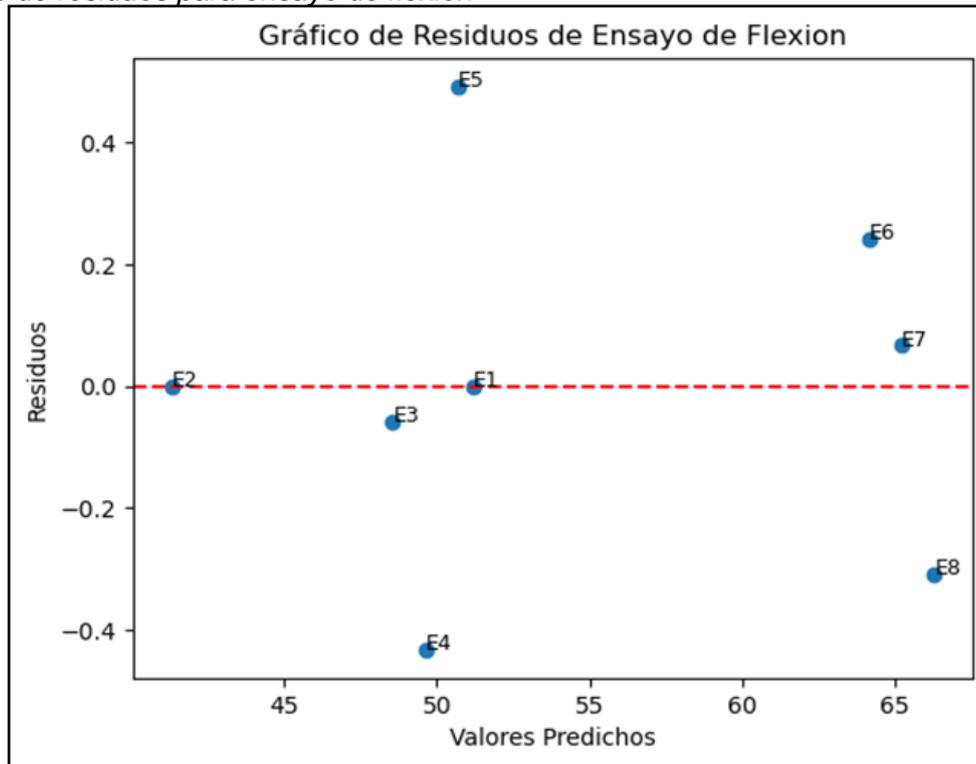
De la Figura 54, el valor del R^2 (*R-squared*) experimental igual a 0.999 indicó que el mencionado modelo estadísticamente explica el 99.9 % de la variabilidad en la resistencia a la flexión. Además, el R^2 ajustado (*Adj. R-squared*) es 0.998, por lo tanto, no existe diferencia significativa con el R^2 (*R-squared*), quiere decir que el modelo incluye variables que explican la fluctuación de la variable dependiente (resistencia a la flexión). Por otra parte, *F-statistic* (769.6) y *Prob(F-statistic)* o *p-value* de 7.59×10^{-5} , muestra que el modelo de regresión lineal múltiple en su conjunto es estadísticamente significativo al nivel de confianza del 95 %.

En el desglose de los materiales como relleno de escoria, tipo de refuerzo fibra de maguey, chambira y ninguno, donde su influencia es significativa con la variable dependiente, resistencia a la flexión, debido a su ($p < 0.05$).

De la Figura 55, el gráfico de residuos mostró la distribución de los mismos frente a los valores predichos para el ensayo de flexión según el modelo de regresión lineal múltiple. La codificación empleada se ve en el ANEXO 4.

Figura 55

Gráfico de residuos para ensayo de flexión



Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, los residuos de la experimentación (E1 al E8), están dispersos alrededor de la línea puntillada de color rojo, lo que indicó que el modelo no presentó un patrón sistemático, es decir no hay evidencia de relaciones no lineales entre las variables del modelo y la respuesta.

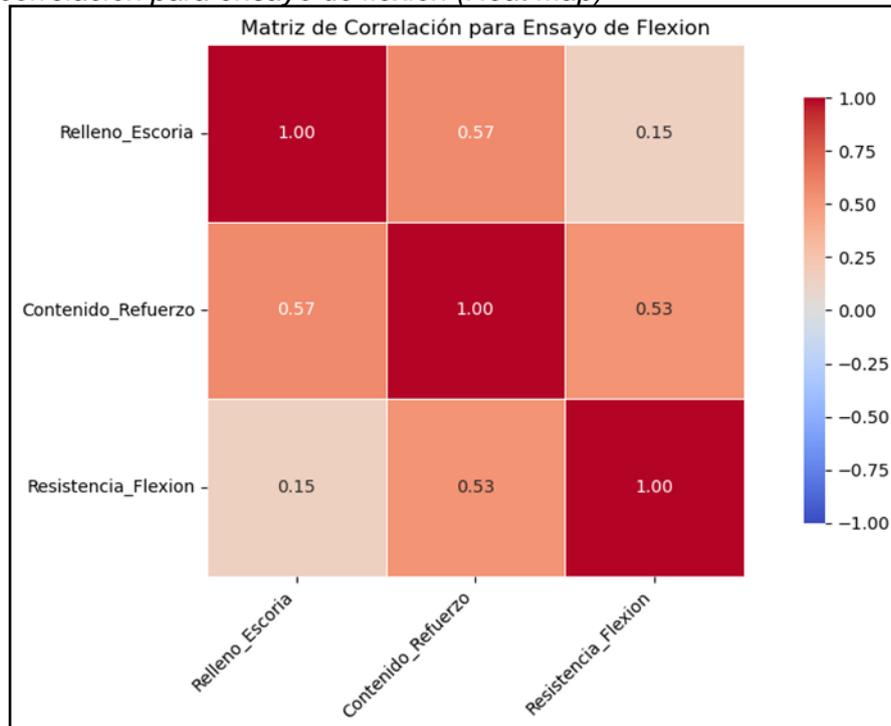
Sin embargo, hay algunos valores más altos (E5 y E6), y más bajos (E4 y E8), lo que sugiere una posible presencia de datos atípicos.

Del mismo modo, si los residuos se dispersaran de manera cónica (más dispersión en valores altos o bajos), cabe la posibilidad de heterocedasticidad (varianza no constante), esto se confirmó en el *test de Levene*.

La gráfica de Matriz de Correlación (*Heat Map*), Figura 56, representó las correlaciones entre las variables relleno de escoria, contenido de refuerzo y resistencia a la flexión. La codificación empleada se aprecia en el ANEXO 5.

Figura 56

Matriz de correlación para ensayo de flexión (Heat Map)



Fuente: Elaboración propia.

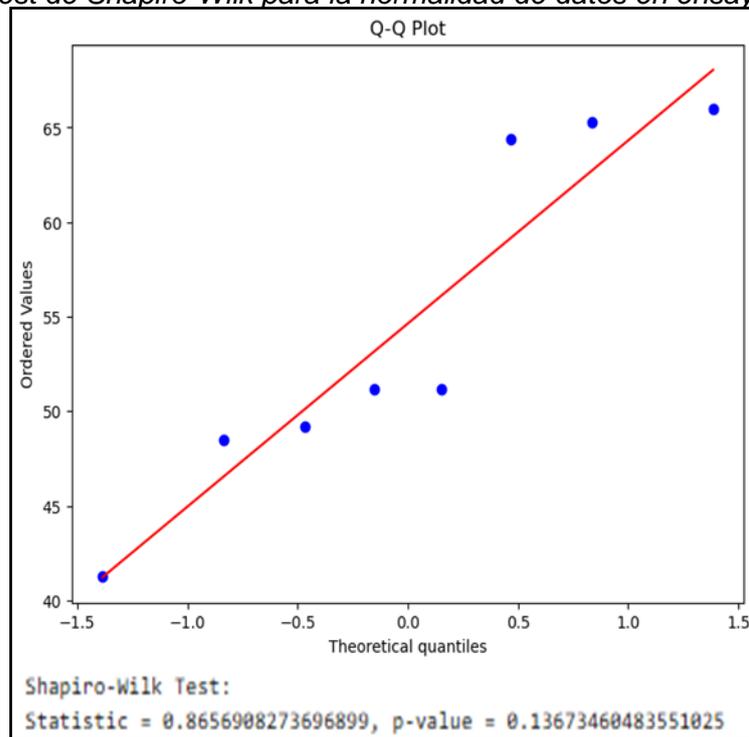
De la Figura 56, matriz de correlación para ensayo de flexión, *Heat map*, para relleno de escoria vs. contenido de refuerzo (0.57, rojo), hay una correlación positiva moderada, es decir, a medida que se incrementa el contenido de refuerzo, también tiende a aumentar el relleno de escoria, en contra posición vs. resistencia a la flexión (0.15, rojo claro) donde la correlación es débil y positiva. Se observó que el aumento de relleno de escoria no impactó fuertemente la resistencia mecánica del material. Asimismo, en el contenido de refuerzo vs. resistencia a la flexión (0.53, rojo), la relación es directamente proporcional, aunque no es extremadamente fuerte.

4.4.4.2.2 Análisis de Varianza (Analysis of Variance - ANOVA). Análogamente al análisis anterior, se realizó la formulación de las hipótesis (nula y alternativa), verificación de los supuestos de normalidad de los datos y homogeneidad de varianzas, para garantizar la validez de los resultados.

- **Hipótesis nula (H_0):** No existe una diferencia significativa en la resistencia a la flexión entre los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo de refuerzo y contenido de refuerzo.
- **Hipótesis alternativa (H_a):** Al menos uno de los factores (relleno de escoria, tipo de refuerzo o contenido de refuerzo) o sus interacciones tiene un efecto significativo en la resistencia a la flexión.
- **Normalidad de los datos:** Se realiza el *test de Shapiro-Wilk* para verificar la normalidad, además se visualiza con un gráfico Q-Q (*Quantile – Quantile plot*) como se ve en la Figura 57. La codificación empleada se ve en el ANEXO 6.

Figura 57

Gráfico Q-Q y test de Shapiro-Wilk para la normalidad de datos en ensayo de flexión



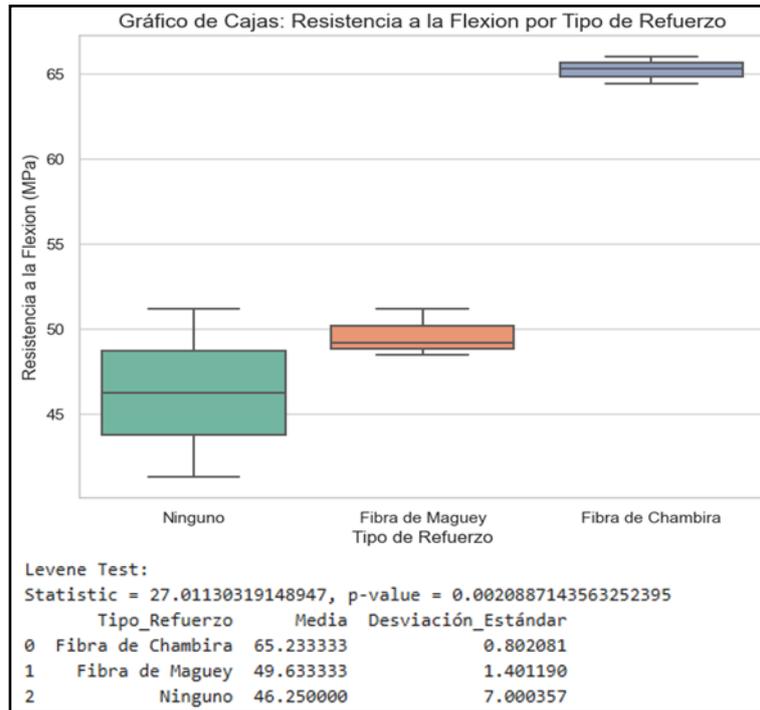
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 57, la prueba o *Test de Shapiro-Wilk* el $p\text{-value} = 0.136 > 0.05$, no se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se asume normalidad en los datos. Esto se verificó con la gráfica Q-Q (*Quantile – Quantile plot*), donde los puntos siguen la dirección de la línea recta cercana a la diagonal, aunque existen ligeras desviaciones en los valores extremos (cola superior).

- **Homogeneidad de varianzas, medición de la media y desviación estándar:** Se realizó el test de Levene, además se visualizó con un gráfico de cajas (*boxplot*) como se ve en la Figura 58. La codificación empleada se observa en el ANEXO 7.

Figura 58

Grafica de Cajas (Boxplot), media, desviación estándar y Test de Levene para ensayo de flexión



Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 58, *Test de Levene* ($p\text{-value} = 0.002 < 0.05$), se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica que las varianzas de los grupos no son homogéneas. Esto se verificó con la gráfica de cajas (*Boxplot*), los rangos intercuartílicos (cajas), y las longitudes de los bigotes son diferentes. Por otro lado, para tipo de refuerzo ninguno o sin refuerzo la media está en torno a 46 MPa, el rango de los datos (distancia entre los bigotes) es moderado, pero es más amplio que los otros grupos indicando mayor variabilidad de los datos (desviación estándar = 7.00). Luego, el tipo de refuerzo fibra de maguey la media está cerca de 49 MPa, el rango intercuartílico (caja) es estrecho, lo que indica un valor intermedio de dispersión de los datos (desviación estándar = 1.4). Por último, tipo de fibra de chambira la media está cerca de 65 MPa, la mayor entre los grupos “ninguno” y “fibra

de maguey”, el rango intercuartílico y los bigotes son más estrechos, indicando menor dispersión (desviación estándar = 0.8).

Dado que en el *Test de Levene* indicó que no hay homogeneidad de varianzas, se tiene que realizar el ANOVA de Welch, que es una variante del ANOVA tradicional, donde no asume igualdad de varianzas. En la siguiente Tabla 36, se realizaron interacciones, es decir aplicaron modelos de regresión, para buscar el que mejor se ajuste a los resultados.

La codificación empleada se ve en el ANEXO 10.

Tabla 36

Interacción de variables independientes para ensayo de flexión - ANOVA de Welch

Modelo	Interacción de variables Independientes para Ensayo de Flexión	Tamaño de Interacción
1	{C(Contenido refuerzo) + C(relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)} ³	3
2	{C(Contenido refuerzo) + C(relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)} ²	2
3	C(Contenido refuerzo) + C(Relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)	1
4	{C(Relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)} ²	2
5	C(Relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)	1

Nota. FC y FM se refiere fibra de chambira y maguey, Fuente: Elaboración propia.

El resumen de la regresión de cada uno de los modelos se puede observar en la Tabla 37.

Tabla 37

Resumen de las regresiones de los modelos de interacción para ensayo de flexión

Modelo	R2	R2 Ajustado	F-statistic	Prob(F-statistic)	AIC	BIC
1	1.000	NaN	NaN	NaN	-477.5	-476.9
2	1.000	NaN	Nan	NaN	-465.9	-465.2
3	0.999	0.997	495	0.00202	12.36	12.84
4	0.991	0.985	153.9	0.000138	27.28	27.6
5	0.991	0.985	153.9	0.000138	27.28	27.6

Nota. NaN (not a number) se refiere valor no definido, Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 37, el modelo 1 y 2 de interacción cúbica y cuadrática respectivamente, no exhibieron ajustes de R² ajustado, *F-statistic* y *Prob(F-statistic)* razón por la cual es necesario reducir el número de términos de interacción debido que el modelo tiene tantos parámetros como observaciones, lo que provoca problemas estadísticos. Por el contrario,

el modelo 3 indicó el mayor R^2 (0.999) en comparación con los demás modelos, además, la diferencia entre R^2 y R^2 ajustado es mínima. A partir del modelo 4 y 5 los R^2 , R^2 ajustado, F -statistic, $Prob(F$ -statistic), AIC y BIC son iguales. La diferencia se concentra en los factores estadísticos como AIC y BIC, donde el modelo 3 tiene los valores más bajos y por parte de F -statistic el valor más alto, el cual es un indicador de un buen ajuste, en consecuencia, es el mejor modelo.

En la Figura 59, se presentó la regresión estadística para el modelo 3 con las interacciones de relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo.

Figura 59

Regresión del modelo 3 para ensayo de flexión

OLS Regression Results				coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]	
Dep. Variable:	Resistencia_Flexion	R-squared:	0.999	Intercept	41.2500	0.395	104.440	0.000	39.551	42.949
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.997	C(Contenido_Refuerzo)[T.5.0]	9.4500	0.321	29.394	0.001	8.067	10.833
Method:	Least Squares	F-statistic:	495.0	C(Contenido_Refuerzo)[T.7.5]	10.2500	0.321	31.882	0.001	8.867	11.633
Date:	Sat, 01 Mar 2025	Prob (F-statistic):	0.00202	C(Contenido_Refuerzo)[T.10.0]	11.6000	0.321	36.081	0.001	10.217	12.983
Time:	17:59:38	Log-Likelihood:	-0.18034	C(Relleno_Escoria)[T.5]	-9.9000	0.700	-14.143	0.005	-12.912	-6.888
No. Observations:	8	AIC:	12.36	Tipo_Refuerzo_FM	7.8500	0.299	26.219	0.001	6.562	9.138
Df Residuals:	2	BIC:	12.84	Tipo_Refuerzo_FC	23.4500	0.299	78.323	0.000	22.162	24.738
Df Model:	5			Tipo_Refuerzo_Ninguno	9.9500	0.253	39.294	0.001	8.860	11.040
Covariance Type:	nonrobust			Omnibus:	0.136	Durbin-Watson:	1.939			
				Prob(Omnibus):	0.934	Jarque-Bera (JB):	0.333			
				Skew:	-0.000	Prob(JB):	0.846			
				Kurtosis:	2.000	Cond. No.	3.29e+17			

Nota. Resultados obtenidos con el lenguaje Python, Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 59, se observa que el modelo 3 es altamente predictivo y se ajustó bien a los datos ($R^2 = 0.999$ y R^2 ajustado = 0.997). Además, los resultados de la correlación de la combinación de tratamientos o corridas que afectaron la resistencia a la flexión, se puede observar que todos los coeficientes son significativos ($p < 0.05$), lo que indicó que cada variable tiene un efecto estadísticamente relevante, donde el contenido y tipo de refuerzo, tiene un impacto positivo, relleno de escoria lo disminuyen.

De la Figura 60, el ANOVA de Welch del modelo 3 evaluó los efectos del relleno de escoria, tipo y contenido de refuerzo, y su interacción sobre la variable de respuesta (resistencia a la flexión). La codificación empleada se ve en el ANEXO 10.

Figura 60

Análisis de varianza (ANOVA de Welch) del modelo 3 para ensayo de flexión

	df	sum_sq	mean_sq	F	PR(>F)
C(Relleno_Escoria)	1.0	13.504464	13.504464	55.120262	0.017663
C(Tipo_Refuerzo)	2.0	588.140952	294.070476	1200.287658	0.000832
C(Contenido_Refuerzo)	3.0	5.204940	1.734980	7.081552	0.126245
Residual	2.0	0.490000	0.245000	NaN	NaN

Nota. Resultados obtenidos con el lenguaje Python, Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 60, los factores rellenos de escoria y el tipo de refuerzo influyeron en la resistencia a la flexión según los valores de *p-value* son 0.0176 y 0.000832 respectivamente, siendo que este último tiene un efecto altamente significativo.

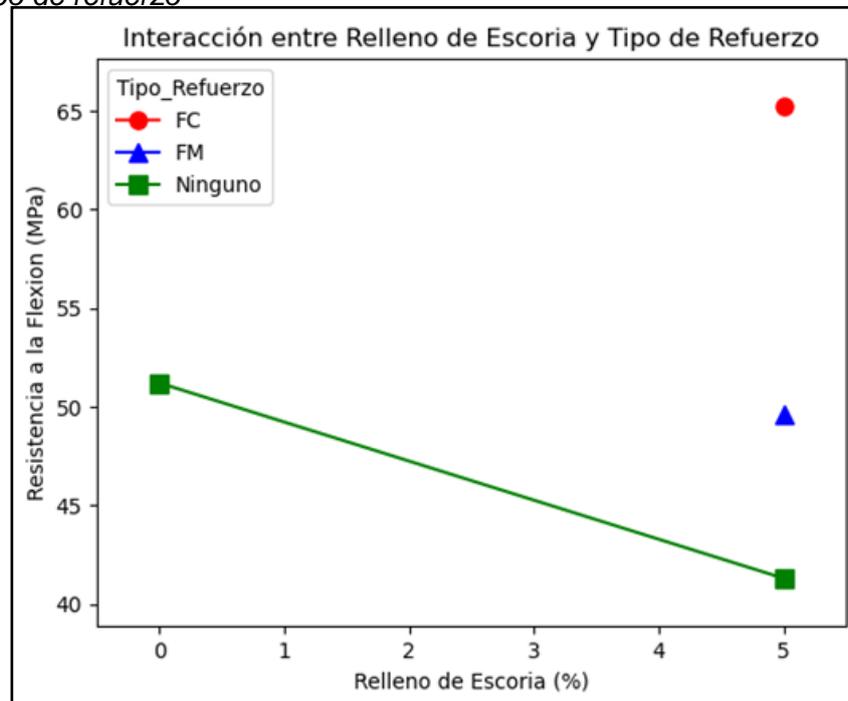
El contenido de refuerzo no es significativo (*p-value* = 0.1262 > 0.05), denotó que el porcentaje de refuerzo agregado no tiene un efecto significativo.

El error residual es muy bajo (*sum_sq* = 0.49), entonces la mayor parte de la variabilidad de los datos ha sido explicada por los factores evaluados.

La Figura 61, visualiza la gráfica de interacción entre el relleno de escoria y tipo de refuerzo en la resistencia a la flexión. La codificación empleada se ve en el ANEXO 11.

Figura 61

Grafica de variación de la resistencia a la flexión en función a la interacción de relleno de escoria y tipo de refuerzo



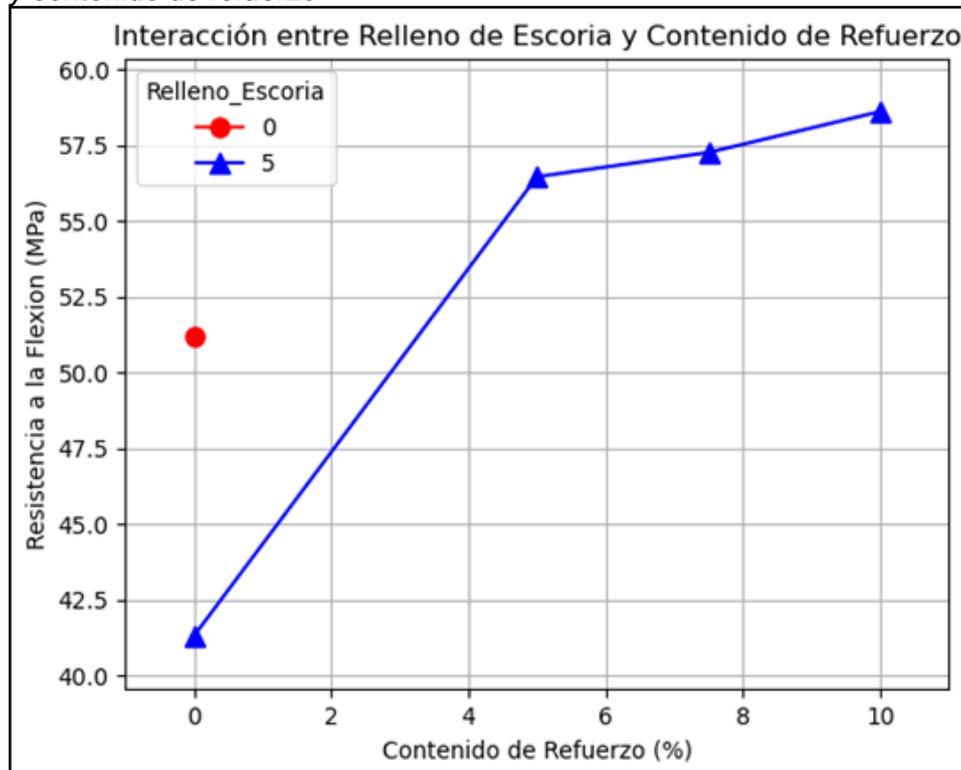
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la interacción entre el contenido de escoria y el tipo de refuerzo en la resistencia a la flexión obedeció un comportamiento bien diferenciado según el tipo de material empleado. Se evaluaron muestras con 0 y 5 % de escoria bajo tres condiciones: sin refuerzo (línea y cuadro verde), con fibras de chambira (círculo rojo) y maguey (triángulo azul). Los resultados mostraron que, en ausencia de refuerzo, el incremento del contenido de escoria tiene un efecto negativo en la resistencia a la flexión, reduciéndola de 50 a 40 MPa. Sin embargo, cuando se incorpora refuerzo, la tendencia cambia significativamente. En particular, el uso de fibra de chambira con 5% de escoria permitió alcanzar la mayor resistencia, 66 MPa, lo que sugiere que este tipo de fibra compensó la pérdida de resistencia ocasionada por la escoria. Por otro lado, el refuerzo con fibra de maguey también mejoró la resistencia en comparación con la muestra sin refuerzo, pero en menor medida.

La Figura 62, exhibe la gráfica de interacción entre el relleno de escoria y contenido de refuerzo en la resistencia a la flexión.

Figura 62

Grafica de variación de la resistencia a la flexión en función a la interacción de relleno de escoria y contenido de refuerzo



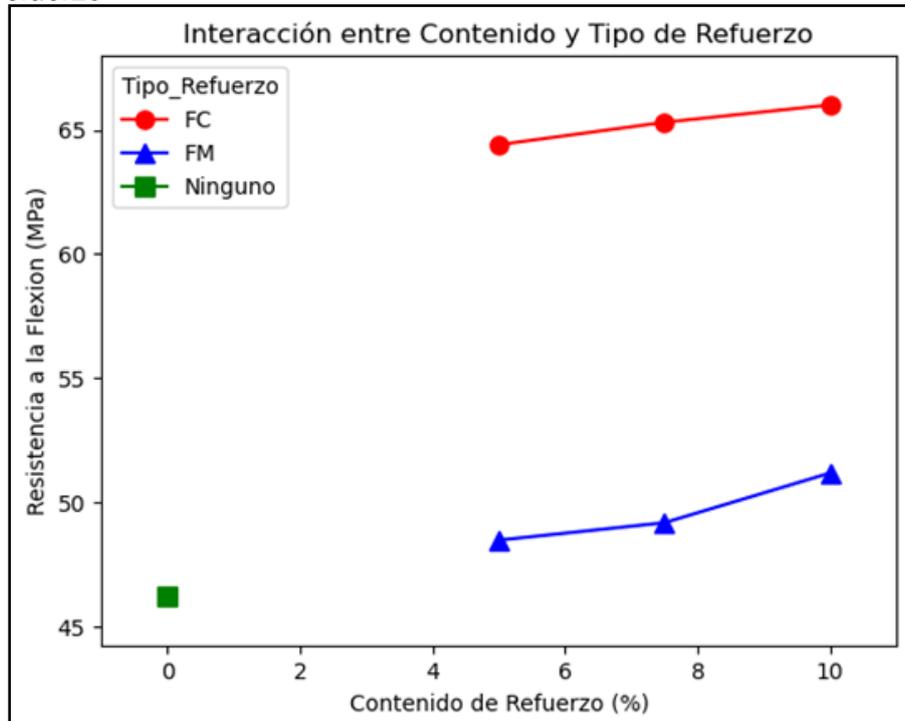
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la interacción entre el contenido de refuerzo y el relleno de escoria en la resistencia a la flexión denotó que ambos factores influyeron significativamente en las propiedades mecánicas del material. Los resultados indicaron que, sin escoria, la resistencia inicial es mayor aproximadamente igual a 51 MPa en comparación con la muestra con 5 % de escoria, 41 MPa. Sin embargo, a medida que aumentó el contenido de refuerzo, la resistencia a la flexión mejoró considerablemente en la muestra con 5% de escoria, alcanzando valores cercanos a 58 MPa con 10% de refuerzo. Este comportamiento denotó que, aunque la incorporación de escoria disminuyó la resistencia de flexión inicial del material, la combinación con refuerzo en proporciones adecuadas puede contrarrestar este efecto y mejorar significativamente esta propiedad mecánica.

La Figura 63, presenta la gráfica de interacción entre el tipo y contenido de refuerzo en la resistencia a la flexión.

Figura 63

Grafica de variación de la resistencia a la flexión en función a la interacción de contenido y tipo de refuerzo



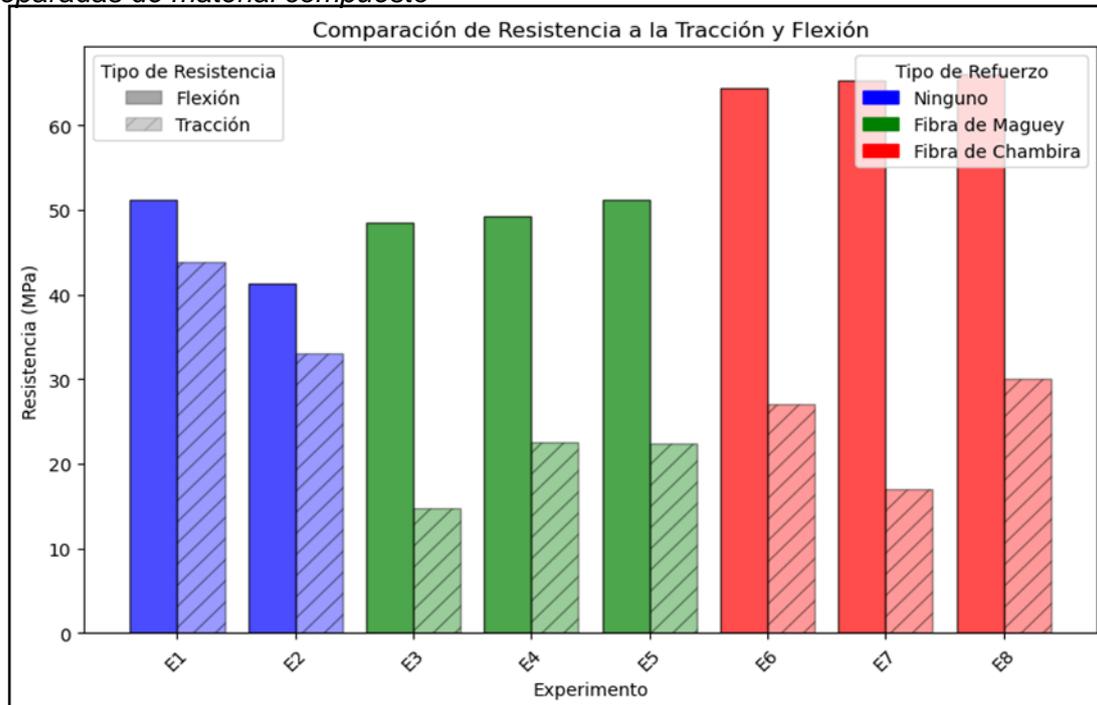
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la interacción entre el contenido y el tipo de refuerzo en la resistencia a la flexión evidenció que la incorporación de refuerzos mejora significativamente la resistencia a la flexión del material. Se evaluaron tres condiciones: sin refuerzo (cuadro verde), con refuerzo de fibra de maguey (triángulo azul) y fibra de chambira (círculo rojo). Los resultados indicaron que la ausencia de refuerzo generó la menor resistencia a la flexión, 46 MPa, mientras que la adición de refuerzos incrementó progresivamente la resistencia a medida que aumentó su contenido. El refuerzo de fibra de chambira mostró los mejores resultados, alcanzando valores de hasta 66 MPa con 10 % de refuerzo, en contraste con el refuerzo de fibra de maguey, que alcanzó aproximadamente 52 MPa en la misma proporción. Estos resultados confirmaron que el uso de refuerzo, especialmente fibra de chambira es una estrategia efectiva para mejorar la resistencia a la flexión del material.

Finalmente, una comparación entre los resultados de la resistencia a la tracción y flexión para cada experimento se muestra en la Figura 64.

Figura 64

Resistencia a la tracción y flexión máxima en MPa para cada una de las muestras preparadas de material compuesto



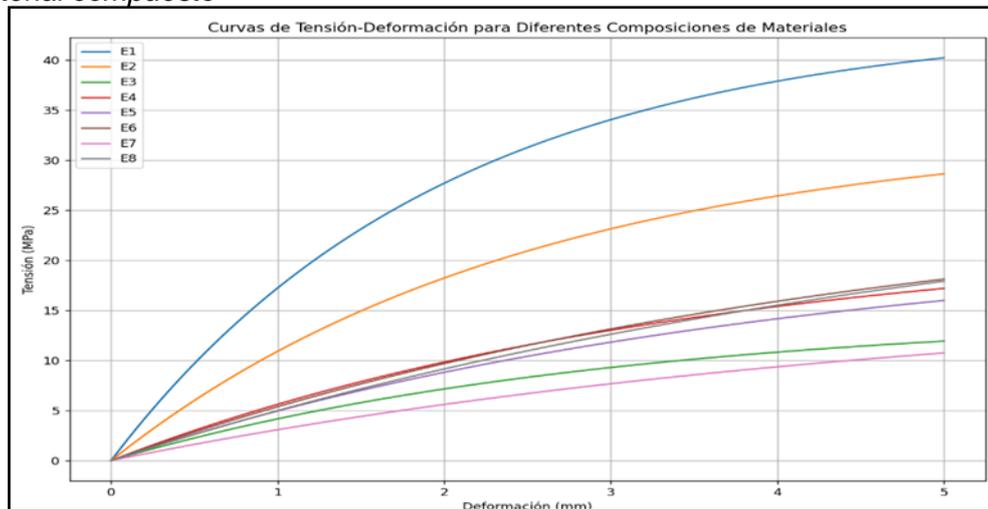
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 64, la muestra de resina sola (E1) presentó la mayor resistencia a la tracción, indicando que la matriz pura sin refuerzos mantiene una integridad estructural sólida bajo tensión uniaxial. Sin embargo, la adición de escoria (E2) redujo estos dos tipos de resistencia, entonces se puede afirmar que, si bien la escoria contribuye a otras propiedades del material, como la densidad o la sostenibilidad, puede no ser beneficiosa en términos de resistencia a la tracción sin un tratamiento o procesamiento adecuado que mejore su dispersión y la adhesión a la matriz, entre ellos, someterlo a una molienda ultrafina que garantice una granulometría mínima de 100%-m100. Una estimación del comportamiento de resistencia a la tracción se observa en la Figura 65. La incorporación de fibras naturales, tanto de maguey como de chambira, mostró una tendencia a mejorar la resistencia a la flexión (E3-E8), especialmente notable en muestras con mayor porcentaje de fibra (E7-E8). También se puede resaltar la importancia de considerar no solo la cantidad de refuerzo añadido, sino también su tipo y la interacción existente con la matriz del polímero, resina epoxi, que podría haber sido investigado con un estudio de

microscopía electrónica de barrido (MEB/SEM). Estos factores deben ser necesariamente optimizados para desarrollar materiales compuestos con propiedades mecánicas mejoradas.

Figura 65

Aproximación de curvas tensión deformación para cada una de las muestras preparadas de material compuesto



Fuente: Elaboración propia.

4.4.4.3 Picos endotérmicos (DTG). De la Tabla 29, se muestra los resultados de análisis termogravimétricos de las muestras de materiales compuestos E1 al E8, los cuales resumen los valores de los picos de descomposición o endotérmicos que van a ser estadísticamente ajustados.

4.4.4.3.1 Regresión lineal múltiple. Análogamente a los análisis anteriores, ensayos de tracción y flexión, los valores de picos endotérmicos se ajustaron por el método de regresión lineal múltiple usando *Python*.

La codificación utilizada en lenguaje *Python*, sigue los mismos pasos que se utilizaron en la sección de análisis estadístico para ensayo de tracción, ver ANEXO 3.

La Figura 66, muestra el resumen de los valores de picos endotérmicos ajustados según el modelo de regresión lineal múltiple y la Figura 67, visualiza un gráfico de residuos para picos endotérmicos °C (DTG).

Figura 66

Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para picos endotérmicos °C (DTG)

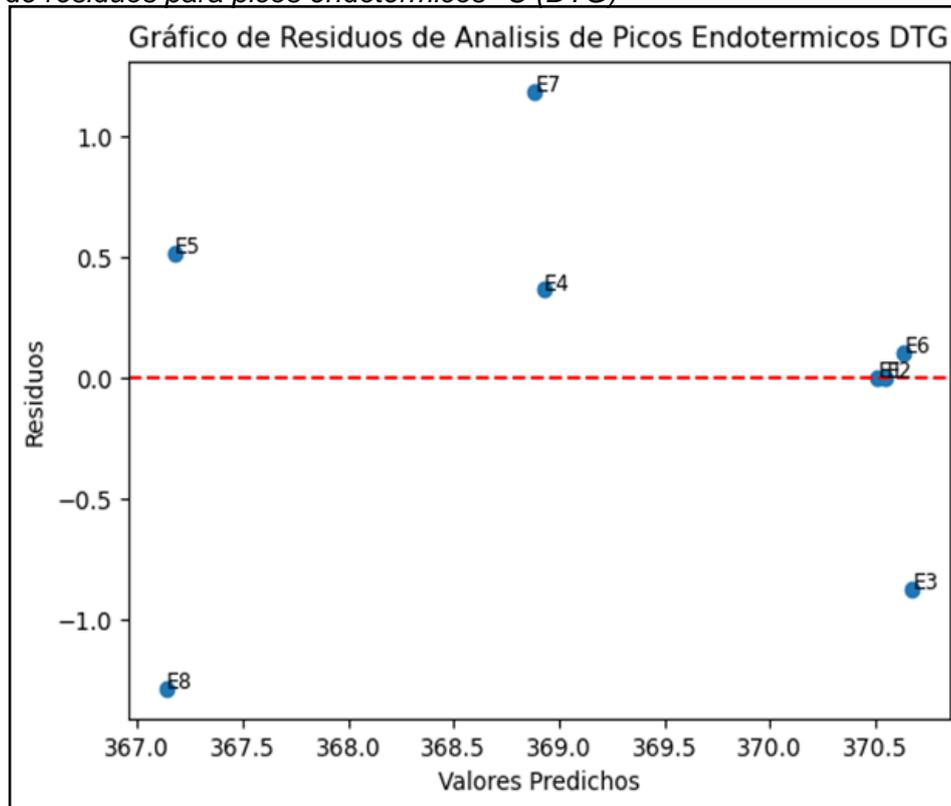
OLS Regression Results				coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Dep. Variable:	Picos_Endotermicos	R-squared:	0.793	const	279.6858	1.413	197.879	0.000	275.188 284.184
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.517	Relleno_Escoria	0.0080	0.336	0.024	0.982	-1.061 1.077
Method:	Least Squares	F-statistic:	2.873	Contenido_Refuerzo	-0.7000	0.238	-2.947	0.060	-1.456 0.056
Date:	Wed, 26 Feb 2025	Prob (F-statistic):	0.206	Tipo_Refuerzo_Fibra de Chambira	94.4108	1.236	76.384	0.000	90.477 98.344
Time:	18:12:49	Log-Likelihood:	-8.8031	Tipo_Refuerzo_Fibra de Maguey	94.4508	1.236	76.417	0.000	90.517 98.384
No. Observations:	8	AIC:	27.61	Tipo_Refuerzo_Ninguno	90.8242	1.137	79.884	0.000	87.206 94.442
Df Residuals:	3	BIC:	28.00	Omnibus:	0.354	Durbin-Watson:	2.308		
Df Model:	4			Prob(Omnibus):	0.838	Jarque-Bera (JB):	0.249		
Covariance Type:	nonrobust			Skew:	-0.313	Prob(JB):	0.883		
				Kurtosis:	2.404	Cond. No.:	3.85e+17		

Nota. Resultados obtenidos con el lenguaje Python, Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 66, el valor del R^2 (*R-squared*) experimental fue igual a 0.793, el cual indicó un 79.3 % de la variabilidad en los picos endotérmicos vía regresión lineal múltiple. Además, el R^2 ajustado (*Adj. R-squared*) alcanzó un valor de 0.517, por lo tanto, se puede observar que existe diferencia significativa con el R^2 (*R-squared*), o sea el modelo incluyó variables que no contribuyeron a explicar la fluctuación de la variable dependiente (picos endotérmicos). Asimismo, *F-statistic* (2.873) y *Prob(F-statistic)* o *p - value* de 0.206, mostraron que el modelo en su conjunto es estadísticamente no significativo. En el desglose de los DTG de los materiales como relleno de escoria y contenido de refuerzo donde $p = 0.982$ y 0.060 , respectivamente son mayores al nivel de significancia que es igual a 0.05, entonces estos ajustes determinaron que estas estimaciones no son estadísticamente significativas. Asimismo, los tipos de refuerzo de fibra de chambira, maguey y ninguno son estadísticamente significativos ($p = 0.000 < 0.05$), por lo que se puede concluir que ambos tienen un impacto en la variable respuesta o dependiente (picos endotérmicos).

Figura 67

Gráfico de residuos para picos endotérmicos °C (DTG)



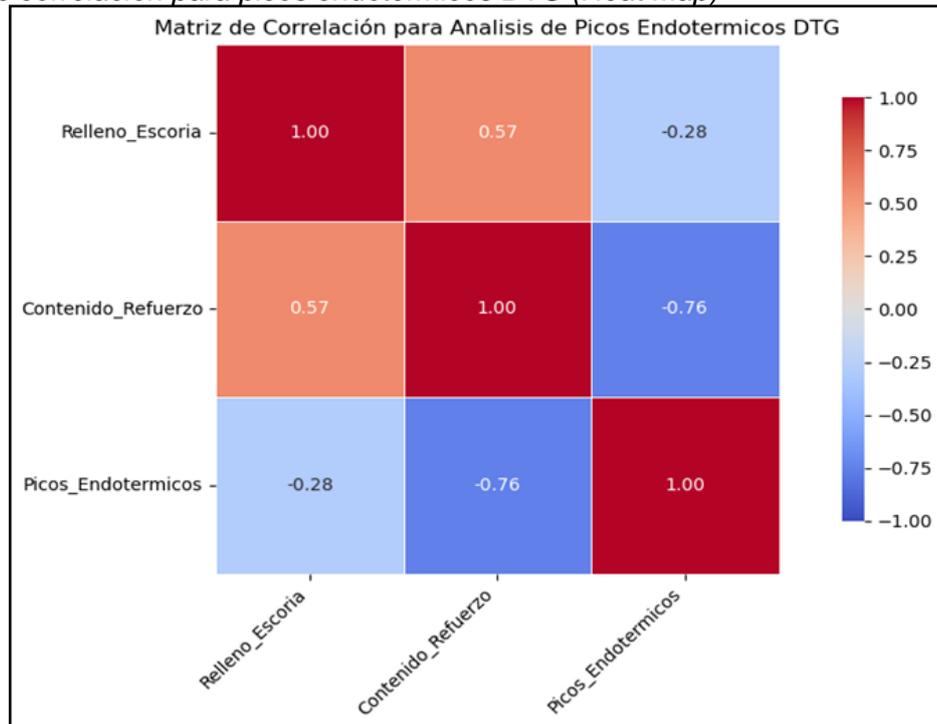
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 67, el gráfico de residuos mostró la distribución de estos frente a los valores predichos para el análisis de picos endotérmicos (DTG) según el modelo de regresión lineal múltiple. Como puede observarse, los residuos de la experimentación (E1 al E8), se distribuyeron alrededor de la línea punteada de color rojo, lo que indicó que el modelo no presentó un patrón sistemático, es decir no hay evidencia de relaciones no lineales entre las variables del modelo y la respuesta. Sin embargo, se identificaron valores atípicos en los puntos o picos endotérmicos E7 y E8, estos podrían estar influyendo en la precisión del modelo.

La gráfica de Matriz de Correlación (*Heat Map*), Figura 68, representó las correlaciones entre las variables relleno de escoria, contenido esfuerzo y picos endotérmicos DTG.

Figura 68

Matriz de correlación para picos endotérmicos DTG (Heat Map)



Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 68, puede observarse que el contenido de refuerzo tiene una influencia significativa en la reducción de los picos endotérmicos (-0.76), lo que sugiere que una mayor cantidad de refuerzo puede mejorar la estabilidad térmica del material. Además, se evidencia una correlación moderada entre el relleno de escoria y el contenido de refuerzo (0.57), indicando que estas variables están relacionadas. Sin embargo, la correlación entre el relleno de escoria y los picos endotérmicos es baja (-0.28), resultando que este factor no es influyente en la respuesta térmica del material.

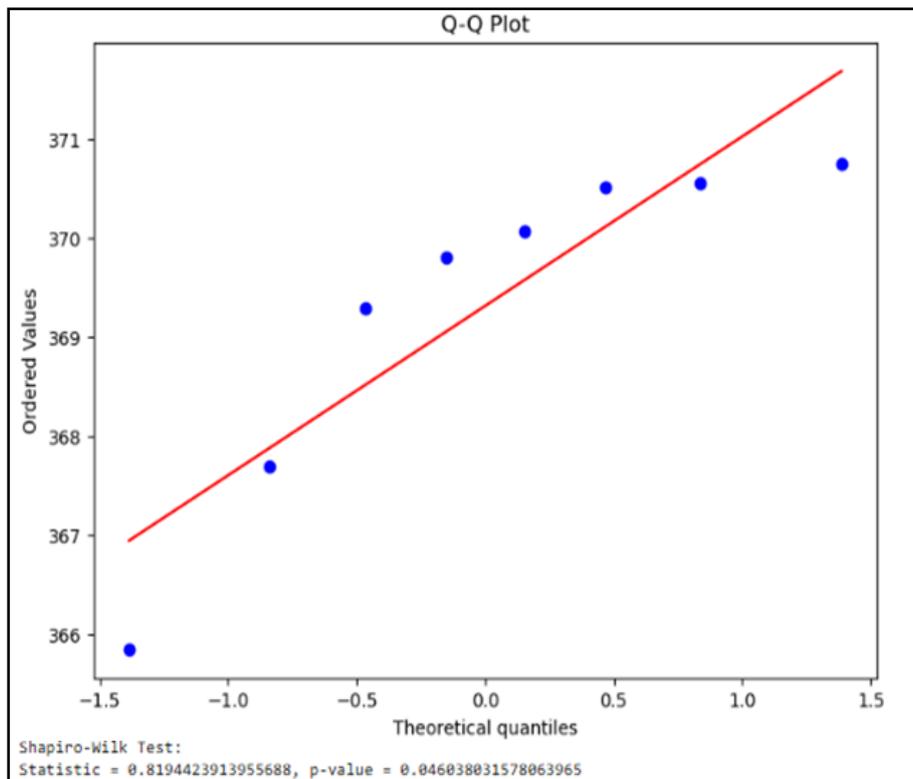
4.4.4.3.2 Análisis de Varianza (Analysis of Variance - ANOVA). Análogamente al análisis anterior, se realizó la formulación de las hipótesis (nula y alternativa), para realizar la verificación de los supuestos de normalidad de los datos y homogeneidad de varianzas, para garantizar la validez de los resultados.

- **Hipótesis nula (H_0):** No existe una diferencia significativa en los valores de los picos endotérmicos (DTG) entre los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo de refuerzo y contenido de refuerzo.

- **Hipótesis alternativa (H_a):** Al menos uno de los factores (relleno de escoria, tipo de refuerzo o contenido de refuerzo) o sus interacciones tiene un efecto significativo en los picos endotérmicos (DTG).
- **Normalidad de los datos:** Se realiza el *test de Shapiro-Wilk* para verificar la normalidad, además se visualiza con un gráfico Q-Q (*Quantile – Quantile plot*) como se ve en la Figura 69.

Figura 69

Gráfico Q-Q y *test de Shapiro-Wilk* para la normalidad de datos en picos endotérmicos °C (DTG)



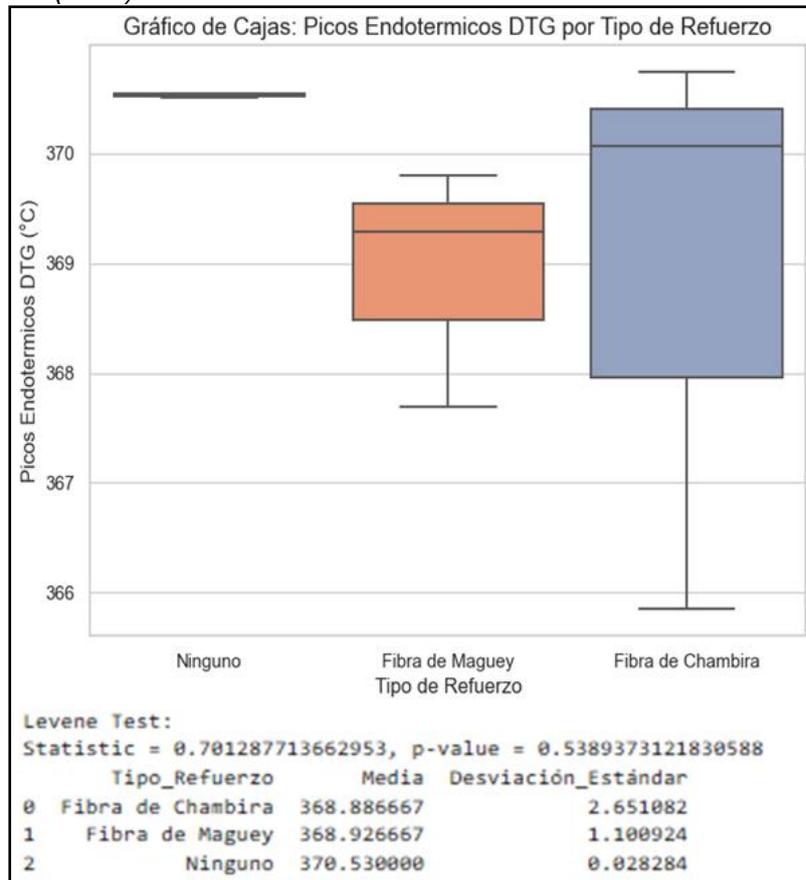
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 69, la prueba o el *test de Shapiro-Wilk* estimó un p-valor de $0.0460 < 0.05$, es decir se rechaza la hipótesis nula (H_0), indicando que los datos no siguen una distribución normal con un nivel de significancia del 5%. La gráfica Q-Q Plot, confirmó esta observación, mostrando desviaciones especialmente en los extremos.

- **Homogeneidad de varianzas, medición de la media y desviación estándar:** Se realizó el *test de Levene*, además se visualiza con un gráfico de cajas (*boxplot*) como se ve en la Figura 70.

Figura 70

Grafica de Cajas (Boxplot), media, desviación estándar y Test de Levene para picos endotérmicos °C (DTG)



Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 70, *Test de Levene* el p-value = 0.538 > 0.05, no se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica que las varianzas de los grupos son homogéneas. Esto se verifica con la gráfica de cajas (*Boxplot*), para tipo de refuerzo ninguno la media está en torno a 370.53 °C, el rango de los datos (distancia entre los bigotes) prácticamente no existe, y fue el más estable (desviación estándar = 0.028). Luego, el tipo de refuerzo fibra de maguey la media es 368.92 °C, el rango intercuartílico (caja) es moderada, lo que indica un valor intermedio de dispersión de los datos (desviación estándar = 1.10). Por último, en el tipo de fibra de chambira la media es 368.88 °C, el rango intercuartílico y los bigotes son más dispersos, indicando la mayor desviación estándar con 2.65. La incorporación de fibras como refuerzo influye en la estabilidad térmica del material, especialmente la fibra de chambira, que introduce una mayor variabilidad en los picos endotérmicos.

Dado que el Análisis de Varianza (ANOVA), es una prueba paramétrica que asume normalidad en los datos, y este supuesto no se cumple. En consecuencia, la prueba de normalidad (*Test de Shapiro-Wilk*) se obtuvo un valor de $p = 0.0460 < 0.05$, lo que indica que los datos no siguen una distribución normal, entonces no es apropiado utilizar ANOVA para la comparación de los grupos.

4.4.4.4 Pérdida de pesos (TGA). De la Tabla 29, que muestra los resultados de los análisis termogravimétricos de las muestras de materiales compuestos E1 al E8, análogamente al caso anterior, los valores del % de pérdida total (TGA) de peso serán estadísticamente ajustados.

4.4.4.4.1 Regresión lineal múltiple. Para este efecto, se aplicó el mismo modelo de regresión lineal múltiple. La codificación utilizada en lenguaje *Python*, también sigue los mismos pasos que se utilizaron en la sección de análisis estadístico para ensayo de tracción, ver ANEXO 3.

La Figura 71, muestra el resumen de resultados del % de pérdida total de peso (TGA) ajustados según el modelo de la regresión lineal múltiple, mientras que la Figura 72 muestra el gráfico de residuos para pérdida de peso % (TGA).

Figura 71

Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para pérdida de peso % (TGA)

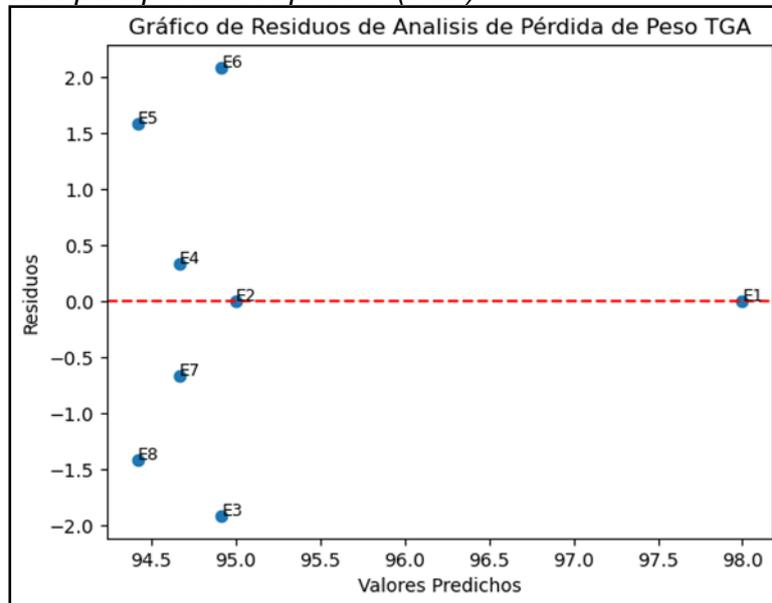
OLS Regression Results				coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Dep. Variable:	Perdida_Peso_TGA	R-squared:	0.428						
Model:	OLS	Adj. R-squared:	-0.335	const	73.7083	2.486	29.654	0.000	65.798 81.619
Method:	Least Squares	F-statistic:	0.5613	Relleno_Escoria	-0.6000	0.591	-1.016	0.385	-2.480 1.280
Date:	Thu, 27 Feb 2025	Prob (F-statistic):	0.710	Contenido_Refuerzo	-0.1000	0.418	-0.239	0.826	-1.429 1.229
Time:	14:40:02	Log-Likelihood:	-13.319	Tipo_Refuerzo_Fibra de Chambira	24.7083	2.174	11.367	0.001	17.791 31.626
No. Observations:	8	AIC:	36.64	Tipo_Refuerzo_Fibra de Maguey	24.7083	2.174	11.367	0.001	17.791 31.626
Df Residuals:	3	BIC:	37.04	Tipo_Refuerzo_Ninguno	24.2917	1.999	12.149	0.001	17.929 30.655
Df Model:	4			Omnibus:	0.215	Durbin-Watson:	1.427		
Covariance Type:	nonrobust			Prob(Omnibus):	0.898	Jarque-Bera (JB):	0.371		
				Skew:	0.171	Prob(JB):	0.831		
				Kurtosis:	2.003	Cond. No.	3.85e+17		

Nota. Resultados obtenidos con el lenguaje Python, Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 71, el valor del R^2 (*R-squared*) experimental alcanzó un valor de 0.428, el cual indicó que el mencionado modelo estadísticamente explica el 42.8 % de la variabilidad en la pérdida de pesos (TGA). Además, el R^2 ajustado (*Adj. R-squared*) fue de -0.335, por lo tanto, es perceptible que el modelo no obtuvo un buen ajuste estadísticamente hablando. Asimismo, *F-statistic* (0.5613) y *Prob(F-statistic)* o *p - value* de 0.710, también mostraron que el modelo en su conjunto es estadísticamente no significativo. En el desglose de los valores de TGA de los materiales como relleno de escoria y contenido de refuerzo donde $p = 0.385$ y 0.826 respectivamente, donde ambos son valores son mayores a 0.05, estos también demostraron que no son estadísticamente significativos. Finalmente, los TGA de los tipos de refuerzo de fibra de chambira, maguey y ninguno son estadísticamente significativos ($p = 0.001 < 0.05$), por lo que puede observarse que estos valores si tienen un impacto a la variable respuesta o dependiente (pérdida de peso TGA).

Figura 72

Gráfico de residuos para pérdida de peso % (TGA)



Fuente: Elaboración propia.

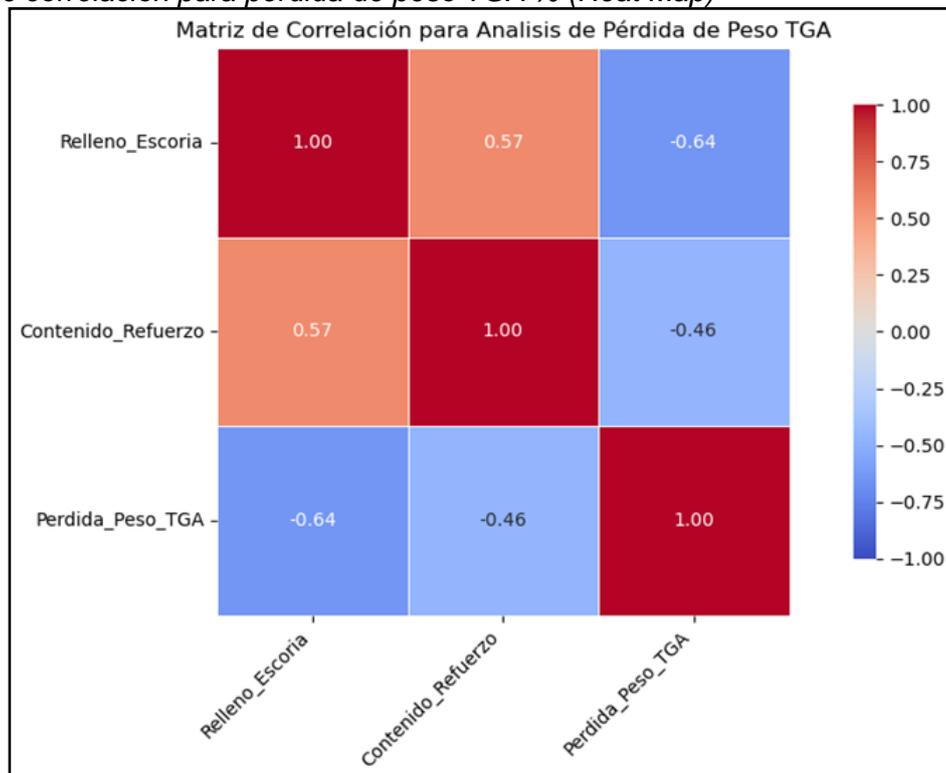
De la Figura 72, el gráfico de residuos mostró la distribución de estos frente a los valores predichos para el análisis de pérdida de peso (TGA) según el modelo de regresión lineal múltiple. Asimismo, los residuos de la experimentación (E1 al E8), no mostraron una

distribución aleatoria, por ejemplo, algunos de los residuos como E3, E5, E6 y E8, están alejados de la línea central, por lo tanto, no corresponden completamente una distribución normal, además indicaron posibles valores atípicos.

La gráfica de Matriz de Correlación (Heat Map), Figura 73, representó las correlaciones entre las variables relleno de escoria, contenido esfuerzo y pérdida de pesos (%) TGA.

Figura 73

Matriz de correlación para pérdida de peso TGA % (Heat Map)



Fuente: Elaboración propia.

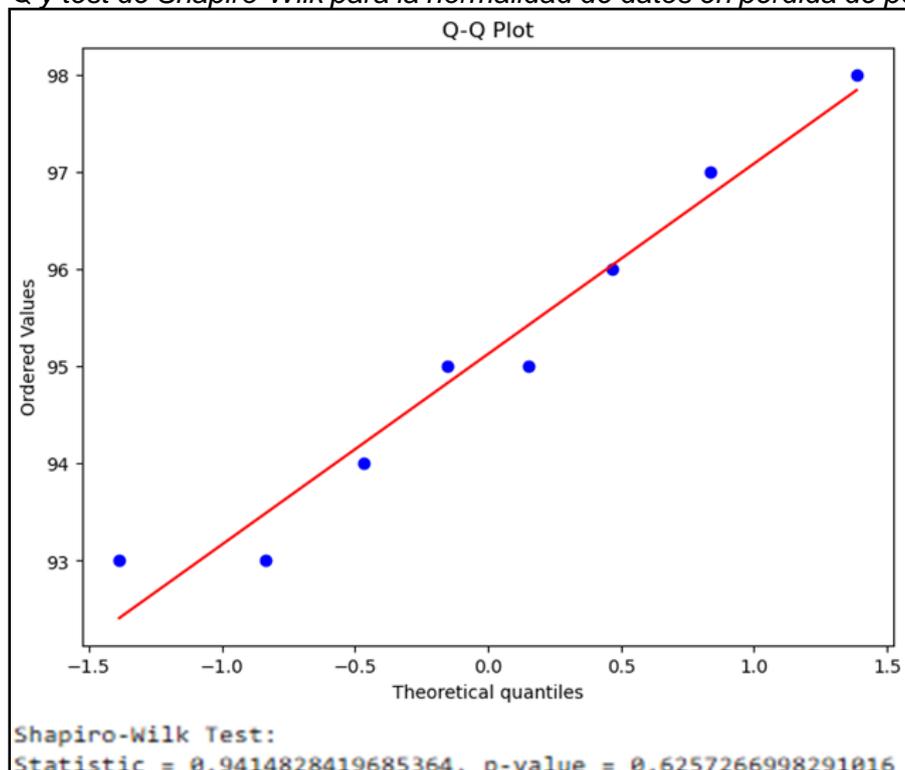
La Figura 73, mostró que el TGA del contenido de refuerzo tiene una correlación negativa débil en la reducción de la pérdida de peso TGA (-0.46), lo que sugiere una relación inversa entre ellos. Además, se evidencia una correlación moderada entre el relleno de escoria y pérdida de peso TGA (-0.64), indicando que a mayor contenido de relleno tiende a reducir la pérdida de peso. Sin embargo, la correlación entre el TGA del relleno de escoria y contenido de refuerzo es positiva moderada (0.57), o sea este factor no es influyente en la respuesta de pérdida de peso del material.

4.4.4.4.2 Análisis de Varianza (Analysis of Variance - ANOVA). Análogamente al análisis anterior, se realizó la formulación de las hipótesis (nula y alternativa), verificación de los supuestos de normalidad de los datos y homogeneidad de varianzas, para garantizar la validez de los resultados.

- **Hipótesis nula (H_0):** No existe una diferencia significativa en la pérdida de pesos (TGA) entre los diferentes niveles de relleno de escoria, tipo de refuerzo y contenido de refuerzo.
- **Hipótesis alternativa (H_a):** Al menos uno de los factores (relleno de escoria, tipo de refuerzo o contenido de refuerzo) o sus interacciones tiene un efecto significativo en la pérdida de pesos (TGA).
- **Normalidad de los datos:** Se realizó el *test de Shapiro-Wilk* para verificar la normalidad, además se visualiza con un gráfico Q-Q (*Quantile – Quantile plot*) como se ve en la Figura 74.

Figura 74

Gráfico Q-Q y test de Shapiro-Wilk para la normalidad de datos en pérdida de pesos (TGA)



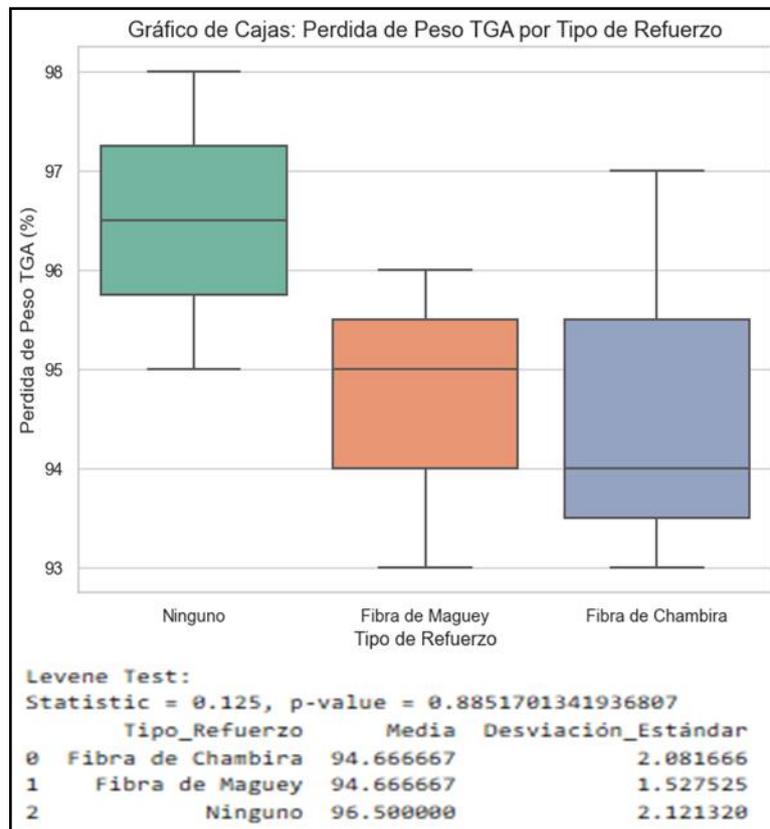
Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 74, se observa que la prueba o *Test de Shapiro-Wilk* el $p\text{-value} = 0.625 > 0.05$, no rechaza la hipótesis nula (H_0) y se asume la normalidad en los datos. Esto se verificó con la gráfica *Q-Q (Quantile – Quantile plot)*, debido a que los puntos siguen la línea recta cercana a la diagonal.

- **Homogeneidad de varianzas, medición de la media y desviación estándar:** Se realizó el test de Levene, además esto se visualizó con un gráfico de cajas (*boxplot*) tal como se ve en la Figura 75.

Figura 75

Grafica de Cajas (Boxplot), media, desviación estándar y Test de Levene para pérdida de pesos (TGA)



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 75, el *Test de Levene* el $p\text{-value} = 0.885 > 0.05$, no rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica que las varianzas de los grupos son homogéneas. Esto se verifica con la gráfica de cajas (*Boxplot*), los rangos intercuartílicos (cajas), y las longitudes de los bigotes son similares, para TGA del tipo de refuerzo ninguno la media está en torno a 96.5 %, el rango de los datos (distancia entre los bigotes) son moderados, pero más amplio que

los otros grupos indicando mayor variabilidad con una desviación estándar de 2.12. Luego, el tipo de refuerzo fibra de maguey la media es 94.67 %, el rango intercuartílico (caja) es un poco más estrecho, lo que indicó la menor dispersión de los datos (desviación estándar = 1.52). Por último, el TGA del tipo de fibra de chambira la media es 94.67 %, el rango intercuartílico y los bigotes son mayores que la fibra de maguey, indicando una desviación estándar de 2.08. En consecuencia, las muestras con refuerzo de fibras de maguey y chambira tuvieron menor pérdida de peso en comparación con las muestras sin ninguna fibra.

Finalmente, a través de los supuestos de normalidad de los datos y homogeneidad de varianza se garantizaron las condiciones de validación de los resultados del análisis de varianza (ANOVA). En consecuencia, se realizaron interacciones, es decir se aplicaron modelos de regresión, para buscar el que mejor se ajuste a los resultados o sea el más óptimo. Esto se puede apreciar en la Tabla 38. La codificación empleada se ve en el ANEXO 12.

Tabla 38

Interacción de variables independientes para pérdida de peso TGA (%) - ANOVA

Modelo	Interacción de variables Independientes para pérdida de peso TGA (%)	Tamaño de Interacción
1	{C(Contenido refuerzo) + C(Relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)} ³	3
2	{C(Contenido refuerzo) + C(Relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)} ²	2
3	C(Contenido refuerzo) + C(Relleno escoria) + (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)	1
4	C(Contenido refuerzo) + (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)	1
5	(Contenido refuerzo) * (Tipo refuerzo FM + Tipo refuerzo FC + Tipo refuerzo ninguno)	1

Fuente: Elaboración propia.

El resumen de la regresión de cada uno de los modelos se puede observar en la Tabla 39.

Tabla 39*Resumen de las regresiones de los modelos de interacción para pérdida de peso TGA (%)*

Modelo	R2	R2 Ajustado	F-statistic	Prob(F-statistic) -p	AIC	BIC
1	1.000	NaN	NaN	NaN	-439.6	-439
2	1.000	NaN	NaN	NaN	-450.1	-449.4
3	0.432	-0.989	0.3038	0.878	38.59	39.06
4	0.235	-0.785	0.2304	0.905	38.97	39.36
5	0.803	-0.377	0.6806	0.729	32.1	32.66

Nota: NaN (not a number) se refiere valor no definido, Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 39, muestra los resultados de las regresiones lineales usando el modelo OLS (Mínimos Cuadrados Ordinarios), en el cual se evaluó la interacción entre las variables categóricas y cuantitativas. Es observable que en los modelos 1 y 2 de interacción cúbica y cuadrática respectivamente, se tiene que reducir el número de términos de interacción debido a que ambos tienen tantos parámetros como observaciones, lo que produce problemas estadísticos. Por el contrario, los modelos 3 y 4 mostraron un bajo ajuste a los datos ($R^2 = 0.432$ y 0.235 , respectivamente), además los R^2 ajustados son negativos. El modelo 5 fue seleccionado como el más adecuado, ya que presentó un R^2 de 0.803 , es decir explicó el 80.3% de la variabilidad en los datos, R^2 ajustado (-0.377), AIC (32.1) y BIC (32.66) fueron relativamente bajos en comparación con los otros modelos, sin embargo, el p-value de $0.729 > 0.05$ indicó que el modelo no es estadísticamente significativo.

En la Figura 76, se presentó la regresión estadística para el modelo 5 con las interacciones de tipo y contenido de refuerzo.

Figura 76

Regresión lineal del modelo 5 para pérdida de peso TGA (%)

OLS Regression Results				coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Dep. Variable:	Perdida_Peso_TGA	R-squared:	0.803	Intercept	63.7222	0.577	110.370	0.006	56.386 71.058
Model:	OLS	Adj. R-squared:	-0.377	C(Contenido_Refuerzo)[T.5.0]	10.5370	0.855	12.320	0.052	-0.330 21.404
Method:	Least Squares	F-statistic:	0.6806	C(Contenido_Refuerzo)[T.7.5]	10.2037	0.855	11.930	0.053	-0.663 21.071
Date:	Thu, 27 Feb 2025	Prob (F-statistic):	0.729	C(Contenido_Refuerzo)[T.10.0]	10.2037	0.855	11.930	0.053	-0.663 21.071
Time:	19:36:56	Log-Likelihood:	-9.0501	Tipo_Refuerzo_FM	15.4722	0.753	20.535	0.031	5.899 25.046
No. Observations:	8	AIC:	32.10	C(Contenido_Refuerzo)[T.5.0]:Tipo_Refuerzo_FM	3.2685	1.315	2.485	0.244	-13.443 19.980
Df Residuals:	1	BIC:	32.66	C(Contenido_Refuerzo)[T.7.5]:Tipo_Refuerzo_FM	5.6019	1.315	4.259	0.147	-11.109 22.313
Df Model:	6			C(Contenido_Refuerzo)[T.10.0]:Tipo_Refuerzo_FM	6.6019	1.315	5.020	0.125	-10.109 23.313
Covariance Type:	nonrobust			Tipo_Refuerzo_FC	15.4722	0.753	20.535	0.031	5.899 25.046
				C(Contenido_Refuerzo)[T.5.0]:Tipo_Refuerzo_FC	7.2685	1.315	5.527	0.114	-9.443 23.980
				C(Contenido_Refuerzo)[T.7.5]:Tipo_Refuerzo_FC	4.6019	1.315	3.499	0.177	-12.109 21.313
				C(Contenido_Refuerzo)[T.10.0]:Tipo_Refuerzo_FC	3.6019	1.315	2.739	0.223	-13.109 20.313
				Tipo_Refuerzo_Ninguno	32.7778	1.041	31.492	0.020	19.553 46.003
				C(Contenido_Refuerzo)[T.5.0]:Tipo_Refuerzo_Ninguno	0	0	nan	nan	0 0
				C(Contenido_Refuerzo)[T.7.5]:Tipo_Refuerzo_Ninguno	0	0	nan	nan	0 0
				C(Contenido_Refuerzo)[T.10.0]:Tipo_Refuerzo_Ninguno	0	0	nan	nan	0 0
				Omnibus:	3.763	Durbin-Watson:	2.500		
				Prob(Omnibus):	0.152	Jarque-Bera (JB):	0.333		
				Skew:	0.000	Prob(JB):	0.846		
				Kurtosis:	4.000	Cond. No.	1.03e+16		

Nota. Resultados obtenidos con el lenguaje Python, Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 76, el modelo 5 con $R^2 = 0.803$ indicó que las variables independientes explicaron el 80.3 % de la variabilidad en la pérdida de peso, sin embargo, el R^2 ajustado negativo e igual a -0.377. Este valor sugirió un posible sobreajuste del modelo. Por otro lado, estadísticamente los coeficientes mostraron que el contenido de refuerzo tuvo efectos positivos y significativos en la pérdida de peso, mientras que el tipo de refuerzo, donde la fibra de chambira y maguey generaron interacciones significativas con el contenido ($p < 0.05$). Sin embargo, estadísticamente, aunque el modelo experimentó uno de los mejores ajustes, todavía es deficiente en predecir si los TGA de la fibra de chambira y de maguey son significativas.

De la Figura 77, el ANOVA del modelo 5 evaluó los efectos del tipo y contenido de refuerzo, y su interacción sobre la variable de respuesta (pérdida de peso TGA (%)).

Figura 77

Análisis de varianza (ANOVA) del modelo 5 para pérdida de peso TGA (%)

	df	sum_sq	mean_sq	F	PR(>F)
C(Contenido_Refuerzo)	3.0	5.375000e+00	1.791667e+00	3.071429e-01	0.820898
Tipo_Refuerzo_FM	1.0	5.179981e-30	5.179981e-30	8.879968e-31	1.000000
Tipo_Refuerzo_FC	1.0	1.223963e+01	1.223963e+01	2.098223e+00	0.243310
Tipo_Refuerzo_Ninguno	1.0	1.066393e+00	1.066393e+00	1.828103e-01	0.697803
Residual	3.0	1.750000e+01	5.833333e+00	NaN	NaN

Nota. Resultados obtenidos con el lenguaje Python, Fuente: Elaboración propia.

Del análisis estadístico de la Figura 77, los resultados indicaron que ni el TGA del contenido de refuerzo ($p = 0.8209$) ni los tipos de refuerzo, fibra de maguey ($p = 1.000$), chambira ($p = 0.2433$) o ninguno ($p = 0.6978$) tienen un efecto estadísticamente significativo en la pérdida de peso. También el alto valor de la varianza residual (*sum_sq*), indicó que otros factores no considerados y pueden estar influyendo en la variable respuesta.

Cabe señalar que los modelos empleados en regresión lineal múltiple y ANOVA no llegaron a ser los mejores, ya que no tuvieron buen ajuste en los datos, en consecuencia, no son adecuados para predecir la pérdida de peso TGA (%) y se podría incluir nuevas variables explicativas para mejorar su capacidad predictiva.

4.5 Producción de protectores solares y separadores de ambientes en laboratorios

Las potenciales aplicaciones de los materiales compuestos desarrollados por el Grupo de Investigación Siderurgia FIGMM (Laboratorio de Hornos y Combustibles FIGMM), fueron desarrollar un prototipo compuesto de pequeños paneles para la exposición de la expo feria tecnológica UNICTEC 2024 y el mayor objetivo fue confeccionar protectores solares para ventanas y separadores de ambientes en el mismo Laboratorio de Hornos y Combustibles FIGMM UNI, como material alternativo al *dry wall*.

Los materiales compuestos que sirvieron para la preparación de los prototipos de paneles se muestran en la Figura 78 y en la Figura 79 el grupo de estudiantes e investigadores (de izquierda a derecha: Cristhian Pérez, Kenny Salazar, Jeandet

Cusihuamán, Sandy Valeriano, Stephanie Mendoza, Mery Gómez y Valeria Olivera que presentaron los mismos en el stand del Instituto de Investigación FIGMM de la Expo Feria Tecnológica UNICTEC 2024, el pasado 22 de noviembre del 2024.

Figura 78

Materiales compuestos que sirvieron para la preparación de los prototipos de paneles



Fuente: Elaboración propia.

Figura 79

Grupo de estudiantes e investigadores del GI Siderurgia FIGMM UNI, que trabajaron el proyecto FIGMM-PFR-25-2024



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los contenidos de elementos metálicos de las fibras de maguey (FM) son mayores que los de chambira (FC), lo contrario ocurre con las fibras no metálicas. El análisis termogravimétrico mostró que la pérdida de peso fue mayor al 90%, lo que fue confirmado por el alto contenido de materia volátil, presencia de sustancias orgánicas como CO, CO₂, N y S, y H₂O (% humedad) obtenido por análisis de proximidad o inmediato de carbones, de ambas fibras naturales. Los resultados del análisis de espectros FTIR de las muestras de FM y FC se llevaron a cabo a través de diferentes pasos: vibración OH, vibración asimétrica de CH, estiramiento de CO, vibración del esqueleto aromático de lignina, vibración de hemicelulosa y estiramiento de CO en el rango de 3300 a 1000 cm⁻¹. Es una prueba de que tanto las fibras de FM como las de FC contienen celulosa, lignina y hemicelulosa, principalmente. Por otro lado, el carbono fijo observado en las muestras de FM y FC es menor pero suficiente para convertirlo en carbón activado o un adsorbente natural, también el contenido de azufre orgánico de las muestras de NM (0.08%) es adecuado para eliminar metales pesados de los sitios de pasivos mineros y para remediar suelos. Además, el mayor contenido de Fe de las muestras de cascarillas de acero (CA) podría permitir que estos desechos sean utilizados como material de relleno de materiales compuestos a base de polímeros poliéster, sin embargo, la escoria de acería (EA) es un mejor agente modificador de resina epoxi porque tiene altos contenidos de Si y bajo porcentaje de Fe, lo cual es reforzado con el alto Si que contiene las fibras de chambira (FC) consiguiendo así un aumento en la resistencia de flexión para el material compuesto correspondiente.

La contrastación de la hipótesis general mostró que la variación en el porcentaje de relleno de escoria de acería, el tipo y contenido de refuerzo influyeron en las propiedades mecánicas del material, sin embargo, la mejora no fue uniforme en todas las condiciones evaluadas. En cuanto a las hipótesis específicas, la incorporación de un 5 % de escoria de acería no mostró una mejora significativa en la resistencia a la tracción en comparación

con la muestra sin escoria, pues esta disminuyó de 45 a 35 MPa. No obstante, su presencia en combinación con fibras naturales permitió incrementar la resistencia a la flexión, destacando la fibra de chambira al 10 % de contenido de refuerzo y con 5 % de escoria de acería, con la mayor resistencia registrada de 66 MPa, lo que indicó que su uso fue beneficioso. Por otra parte, la influencia de fibras naturales en la matriz polimérica fue variable. Con un 5 % de fibra de chambira y maguey la resistencia a la tracción fue de 26 y 14 MPa, respectivamente. A pesar de ello, a mayores concentraciones de refuerzo (≥ 7.5 %), se observó una recuperación. En flexión, la ausencia de refuerzo mostró la menor resistencia (45 MPa), mientras que un mayor contenido de refuerzo, mejoraron los resultados, para 10 % de refuerzo de tanto fibra de maguey como fibra de chambira, la resistencia a la flexión alcanzó un 52 y 66 MPa, respectivamente. Este resultado indicó que el uso de este refuerzo mejoró la rigidez estructural del material, en consecuencia, un mayor contenido de refuerzo no siempre presenta un aumento lineal de la resistencia a la flexión.

Asimismo, los análisis termogravimétricos vía DTG mostraron un pico endotérmico o temperatura de descomposición cercano a 370.55 °C para la misma muestra de material compuesto E1 como la más alta, en un rango de 365.85 a 370.55°C además de que permitieron percibir que todas las muestras ensayadas vía TGA observaron una pérdida de peso entre 93 y 98%. Si bien existen indicios de que el tipo de refuerzo de fibra chambira (FC) y maguey (FM) podría influir en los picos endotérmicos (DTG) y la pérdida de peso (TGA), la falta de significancia global en los modelos de regresión lineal múltiple y análisis de varianza (ANOVA) no permitió establecer una relación concluyente entre las variables independientes y las variables dependientes. Por lo tanto, no se puede afirmar con certeza que el uso de escoria como relleno, el contenido y tipo de refuerzo impacten en los análisis termogravimétricos.

Recomendaciones

Realizar un tratamiento previo a las fibras naturales estudiadas, maguey y chambira, mediante diseño de experimentos que involucre distintas concentraciones de NaOH y/o KOH y tiempos de contacto.

Realizar un diseño de experimentos que permita mejorar el tiempo de curado de la resina epoxi o epóxica, primero sola y luego con el material de relleno la escoria de acería.

Moler la escoria de acería utilizada a fracciones más finas que 100% -m100 (149 μm) para promover una mejor adhesión entre la resina epoxi y el material de relleno y los de refuerzo (fibras).

Preparar moldes y en consecuencia compuestos usando equipos de infusión al vacío, debido a que las probetas preparadas a partir de moldes confeccionados de forma manual no exhibieron espesores constantes o sea las superficies del compuesto laminado estaban rugosas y con la distribución de las fibras no unidireccionales.

Realizar investigaciones complementarias acerca de la adhesión entre la matriz y los refuerzos, así como, cómo ésta podría contribuir a optimizar la transferencia de carga y consecuentemente, las propiedades mecánicas del compuesto. Para esto se debe considerar no solo la cantidad de refuerzo añadido, sino también su tipo y la interacción existente con la matriz del polímero sino también un estudio de microscopía electrónica de barrido, para visualizar la microestructura de las interfaces y e identificar los posibles puntos, líneas, planos (áreas) y volúmenes(regiones) de falla de los compuestos confeccionados.

También se propone la experimentación con nuevos métodos de mezcla de insumos y tecnología de manufactura que puedan fomentar una distribución más equitativa de los refuerzos. Estos factores deben ser necesariamente optimizados para desarrollar materiales compuestos con propiedades mecánicas mejoradas.

Referencias bibliográficas

- Abdellah, M. Y., Sadek, M. G., Alharthi, H., Abdel-Jaber, G. T., & Backar, A. H. (2023). *Characteristic properties of date-palm fiber/sheep wool reinforced polyester composites*. Journal of Bioresources and Bioproducts.
- Abdurohman, K., Satrio, T., Muzayadah, N. L., & Teten. (2018, November). *A comparison process between hand lay-up, vacuum infusion, and vacuum bagging method toward e-glass EW 185/lycal composites*. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1130, p. 012018). IOP Publishing.
- Andrés Vizán, S., Huerta Martínez, G., Llera Traviesa, R., & Luiña Fernández, R. (2011). *Valoración tecno-ambiental de las escorias de acería LD mediante análisis dinámico de ciclo de vida*. Área de proyectos de Ingeniería – Universidad de Oviedo.
- An, W., Zhang, Y., Li, J., Zhang, S., Shen, C., Liu, X., ... & Wang, Y. Z. (2024). *Fragmentation effect of solvent in recovery of unsaturated polyester resin and its composites*. Composites Part B: Engineering, 286, 111804.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2012). *Ciencia e ingeniería de materiales*. 6ta Ed., CENGAGE Learning, México.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2009). *Engineering Materials 2 An Introduction to Microstructures, Processing and Design*. Department of Engineering, University of Cambridge, UK.
- Ashby, M. F., & Bréchet, Y. J. (2003). *Designing hybrid materials*. Acta materialia, 51(19), 5801-5821.
- Ashby, M. F., & Johnson, K. (2014). *Materials and design: The art and science of material selection in product design* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- ASTM International. (2023). ASTM D3039/D3039M-23: *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. ASTM International.

- ASTM International. (2023). *ASTM D790-23: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. ASTM International.
- Aravinth, K., Kondusamy, V., Ramakrishnan, T., Tamilarasan, V. D., & Rasu, K. K. (2023). *Investigation of mechanical properties on agave plant fiber composite by experimental and numerical methods*. *Materials Today: Proceedings*.
- Akkoyun, M., & Akkoyun, S. (2019). *Blast furnace slag or fly ash filled rigid polyurethane composite foams: A comprehensive investigation*. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(20), 47433.
- Bernardo A. Oliver Borrachero (2021). *Estudio de la utilización de fibras naturales en materiales compuestos laminados para fabricación de componentes de automoción*. [Tesis doctoral – Universitat Politècnica de Valencia]. Repositorio institucional – Universitat Politècnica de Valencia.
- Benítez-Guerrero, M., López-Beceiro, J., Sánchez-Jiménez, P. E., & Pascual-Cosp, J. (2014). *Comparison of thermal behavior of natural and hot-washed sisal fibers based on their main components: Cellulose, xylan and lignin. TG-FTIR analysis of volatile products*. *Thermochimica Acta*, 581, 70-86.
- Bolokang, A. S. (2019). *Designing a Sn-slag composite with possible non-toxic applications to provide a pure metal casting environment*. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1313-1321.
- Camacho, H., Martínez, G., Ávila, L., & Montes de Oca, P. (2022). *Fibras naturales y la radiación gamma en la elaboración de materiales compuestos*. En E. Viguera Santiago y G. Martínez Barrera (Ed.), *Materiales Avanzados y Nanomateriales: aprovechamiento de fuentes naturales y sus beneficios al medio ambiente* (pp. 95-129). Barcelona, España: OmniaScience.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.)*. Wiley, E.U.A.

- Ceroni-Galoso, A., Carbonel, D., Fredy Huarcaya-Nina, J., Janeth Esquivel-Lorenzo, S., Colorado, H., & Gomez-Marroquin, M. C. (2023). *Mercury immobilization in mining waste soils using thiol-modified olive stones biochar*. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 22(6).
- De Cindio, B., Gabriele, D., & Lupi, F. R. (2015). *Pectin: Properties determination and uses*. In *Encyclopedia of food and health* (pp. 294-300). Elsevier Inc.
- De Melo, K. M., dos Santos, T. F., da Silva Santos, C. M., da Fonseca, R. T., de Lucena, N. D., de Medeiros, J. I., & de Aquino, M. S. (2019). *Study of the reuse potential of the sisal fibers powder as a particulate material in polymer composites*. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4019-4025.
- Dizbay-Onat, M., Vaidya, U. K., & Lungu, C. T. (2017). *Preparation of industrial sisal fiber waste derived activated carbon by chemical activation and effects of carbonization parameters on surface characteristics*. *Industrial crops and products*, 95, 583-590.
- Dos Santos, W. N., Cavalcante, D. D., da Silva, E. G. P., das Virgens, C. F., & de Souza Dias, F. (2011). *Biosorption of Pb (II) and Cd (II) ions by Agave sisalana (sisal fiber)*. *Microchemical Journal*, 97(2), 269-273.
- Epiquien Saavedra, M., Lavado Lázaro, K., Rojas, M. L., Lescano, L., Sánchez-González, J., Linares, G., ... & Vega Anticon, A. (2020). *Polyester composite reinforced with fiber of Mauritia flexuosa treated with alkali: Impact energy, chemical composition and surface topography* [Compuestos de poliéster reforzados con fibra de Mauritia flexuosa tratada con álcali: Energía de impacto, composición química y topografía superficial.].
- Elsadek, M., Mousa, E., & Ahmed, H. (2024). *Green approach to ironmaking: Briquetting and hydrogen reduction of mill scale using novel binders*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 62, 732-738.
- El-Shiekh, H., El-Fawakhry, M. K., Mitwally, M. E., & Shash, A. Y. (2023). *Production of reduced iron from mill scale waste using tilting rotary furnace*. *Results in Materials*, 19, 100429.

- Erdogan, A., Gok, M. S., Koc, V., & Gunen, A. (2019). *Friction and wear behavior of epoxy composite filled with industrial wastes*. Journal of Cleaner Production. Volume 237. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.063>
- Feng, Y., Zhang, Z., Yue, D., Belko, V. O., Maksimenko, S. A., Deng, J., ... & Chen, Q. (2024). *Recent progress in degradation and recycling of epoxy resin*. Journal of Materials Research and Technology.
- Flutto, L. (2003). PECTIN| *properties and determination*. Encyclopedia of food sciences and nutrition, 2, 4440-4449.
- Gibson, R. F. (2011). *Principles of Composite Material Mechanics* (4th ed.). CRC Press.
- Godara, S. S., Yadav, A., & Singh, V. P. (2021). *Characterization of glass fiber reinforced composite materials with use of Kota stone dust*. Materials Today: Proceedings, 44, 2566-2569.
- Gómez Marroquín, M.C. (2004). *Contribution to the study of the formation and reduction of Zinc Ferrite. Thesis Dissertation* – Department of Science of the Materials and Metallurgy, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro. DCMM – PUC- Rio, 2004 179p. Adviser: Prof. D'Abreu José Carlos.
- Gómez-Marroquín, M. C., Colorado, H., Carbonel-Ramos, D. E., Huarcaya-Nina, J. F., Esquivel-Lorenzo, S. J., Ceroni-Galoso, A., & Chirinos-Collantes, H. D. (2022). *Characterization and Thermal Treatment of Eggshell and Olive Stones for Heavy Metals Removal in Mining Environmental Liabilities Sites*. In REWAS 2022: Developing Tomorrow's Technical Cycles (Volume I) (pp. 213-226). Cham: Springer International Publishing.
- Gomez-Marroquín, M. C., Carbonel, D., Esquivel, S., & Colorado, H. (2023). *Thiol-modified olive-stone biochar preparation for Hg (II) removal from aqueous solutions*. Journal of Environmental Engineering and Science, 40(XXXX), 1-12.
- Gómez, M., & Fernández, R. (2019). *Fibras vegetales en materiales compuestos*. Ciencia y Tecnología de Recursos Naturales, 10(2), 67-73.

- Gomes, G. M. F., Mendes, T. F., & Wada, K. (2011). *Reduction in toxicity and generation of slag in secondary lead process*. Journal of Cleaner Production, 19(9-10), 1096-1103.
- Hanhan, I., Agyei, R., Xiao, X., & Sangid, M. D. (2019). *Comparing non-destructive 3D X-ray computed tomography with destructive optical microscopy for microstructural characterization of fiber reinforced composites*. Composites Science and Technology, 184, 107843.
- Haro Blas, P.C., & Ramirez Ríos, D.K. (2024). *Influencia de la secuencia de hibridación y porcentaje de peso de fibras cortas de cabuya sobre la energía de impacto de un compuesto de matriz poliéster*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Trujillo.
- Huamani Salazar, O.A. (2024). *Incorporación de fibras sintéticas para la estabilización de la subrasante en el distrito de Chilca – Huancayo 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio Institucional – Universidad Privada de Tacna.
- Kamide, K. (2005). *Cellulose and cellulose derivatives*. Elsevier.
- Kessler, R. W., Kohler, R., Nebel, K., & Tubach, M. (2000). Natural Fibers. Special Jubilee Edition. Perspectives of Fibers in High Level Applications For the New Century. Publikacja dofinansowana przez Komitet Badán Naukowych. Extraído de: www.rte.espol.edu.ec/archivos/Revista_2006/127Final.pdf
- Kennedy, M, N., S. M., M, S., & Pandian, V. M. (2024). *Enhanced Mechanical and Thermal Properties in Epoxy-Based Glass Fabric Composites via Nano Silica Integration*. Polymer-Plastics Technology and Materials, 64(2), 208–221. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2394828>
- Krishnanunni, M., Kiran, M., Philipose, R., Alex, A. E., & Nair, P. R. (2023). *Characterization of mechanical and thermal properties of copper slag filled composite material with and without coconut fiber*. Materials Today: Proceedings.

- Kilic, E., Font, J., Puig, R., Çolak, S., & Çelik, D. (2011). *Chromium recovery from tannery sludge with saponin and oxidative remediation*. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1), 456-462.
- Kumar, N. V., Basha, S. A., Kishore, C. C., Aswarthanarayana, P., Kumar, P. P., Rao, M. M., & Babu, S. R. (2023). *Wear Analysis of Iron Slag Reinforced Polyester Composites with Taguchi Optimization*. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(6), 221-229.
- Kumar, A., Sharma, K., & Dixit, A. R. (2021). *A review on the mechanical properties of polymer composites reinforced by carbon nanotubes and graphene*. *Carbon letters*, 31(2), 149-165.
- Kumar, R., Ganguly, A., & Purohit, R. (2023). *Thermogravimetric analysis of natural fiber reinforced hybrid composites—A review*. *Materials Today: Proceedings*.
- Kumari, N., Paswan, M., & Prasad, K. (2022). *Effect of sawdust addition on the mechanical and water absorption properties of banana-sisal/epoxy natural fiber composites*. *Materials Today: Proceedings*, 49, 1719-1722.
- Köhler, A. R., Som, C., Helland, A., & Gottschalk, F. (2008). *Studying the potential release of carbon nanotubes throughout the application life cycle*. *Journal of Cleaner Production*, 16(8-9), 927-937.
- Lokesh, P., Kumari, T. S., Gopi, R., & Loganathan, G. B. (2020). *A study on mechanical properties of bamboo fiber reinforced polymer composite*. *Materials Today: Proceedings*, 22, 897-903.
- Luna, P., & Lizarazo-Marriaga, J. M. (2022). *Fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica*. *Momento*, (65), 65-79.
- Marín, M., Millán, B., & Kahn, F. (2012). *Anatomy and physicochemical properties of the chambira fiber*. *Revista Peruana de Biología*, 19(1), 3-9.
- Martín, M. I., López, F. A., López-Delgado, A., Pérez, C., & Alguacil, F. J. (2004). *Posibilidades sobre el uso de residuos de la industria del acero en la eliminación de metales de efluentes líquidos*. *Revista de metalurgia*, 40(5), 324-328.

- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design* (3rd ed.). CRC Press.
- Michaeli, W., Wegener, M., & Capella, F. (1989). *Tecnología de los Composites/Plásticos Reforzados*, Ed. Hanser, España.
- Miravete, A. (2000), *Materiales Compuestos*. Zaragoza, España
- Mishnaevsky, L., Jr., & Brøndsted, P. (2009). *Micromechanical modeling of damage and fracture in composites: A review*. *Composites Science and Technology*, 69(14), 2283–2297.
- Morales, D. (2007). *Síntesis y caracterización de materiales híbridos y versátiles PMMA-SiO₂ para el desarrollo de recubrimientos* (Doctoral dissertation, Tesis para optar el grado de maestría en electroquímica, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica).
- Morales, G. (2008). *Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nano fibras de carbono para aplicaciones tecnológicas*. [Tesis doctoral]. Repositorio institucional – Universidad Complutense de Madrid, España.
- Mostafa, A., Laske, S., Pacher, G., Holzer, C., Flachberger, H., Krschey, E., & Fritz, B. (2016). *Blast furnace slags as functional fillers on rheological, thermal, and mechanical behavior of thermoplastics*. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(8).
- Mühlethaler, K. (1949). Electron micrographs of plant fibers. *Biochimica et Biophysica Acta*, 3, 15-25.
- Muthukannan, M., Kannan, P. S., Selwin, M., & Kathiravan, T. (2023). *Experimental investigation of mechanical properties of Palm-Bamboo–Glass fiber composites*. *Materials Today: Proceedings*.
- Nana, A., Kaze, R. C., Alomayri, T. S., Assaedi, H. S., Deutou, J. G. N., Ngoune, J., ... & Leonelli, C. (2021). *Innovative porous ceramic matrices from inorganic polymer composites (IPCs): microstructure and mechanical properties*. *Construction and Building Materials*, 273, 122032.

- Nikforooz, M., Golzar, M., Shokrieh, M. M., & Montesano, J. (2018). *Processability and tensile performance of continuous glass fiber/polyamide laminates for structural load-bearing applications*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 105, 156-164.
- Luna, P., & Lizarazo-Marriaga, J.M. (2022). *Fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica*. Repositorio de la Universidad Nacional de Colombia.
- Palacios, M.E. (2023). *Optimización – MSR del material compuesto de matriz epoxi reforzado con fibra natural chambira (Astrocaryum) y sintética (carbono) mediante infusión de resina al vacío y su incidencia en las propiedades mecánicas*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional – Universidad Técnica de Ambato
- Paisig Saucedo, B.Y. (2024). *Influencia de la fibra de maguey en la determinación de las propiedades mecánicas y microestructurales del concreto*. [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional – Universidad Señor de Sipán
- Pérez, A., & Rodríguez, L. (2020). *Uso de fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos*. *Revista de Materiales Ecológicos*, 15(3), 45-57.
- Rao, J., Lv, Z., Chen, G., & Peng, F. (2023). *Hemicellulose: Structure, chemical modification, and application*. *Progress in Polymer Science*, 140, 101675.
- Ralph, J., Lapierre, C., & Boerjan, W. (2019). *Lignin structure and its engineering*. *Current opinion in biotechnology*, 56, 240-249.
- Raj, J. I. D., Geethan, K. A. V., Rajan, A. J., & Ananth, S. V. (2023). *Characterization of epoxy resin-based banana fiber reinforced composite with waste CD powder filler*. *Materials Today: Proceedings*, 90, 19-23
- Rajendran, S., Palani, G., Shanmugam, V., Kanagaraj, A., Veerasimman, A., & Marimuthu, U. (2024). *Comparative analysis of mechanical and erosion performance of cashew*

- and sugarcane waste-based biochar-reinforced polyester composites*. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, 100718.
- Rahman, R., & Putra, S. Z. F. S. (2019). *Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites*. *Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*, 81-102.
- Ribeiro, B. D., Barreto, D. W., & Coelho, M. A. Z. (2015). *Use of micellar extraction and cloud point preconcentration for valorization of saponins from sisal (Agave sisalana) waste*. *Food and bioproducts processing*, 94, 601-609.
- Rodríguez Ramos, C. S. *Estudio comparativo de la reducción carbotérmica de cascarillas de piezas de acero fundido producidas en el tratamiento térmico usando carbón antracítico y vegetal*. [en línea]. Asesorado por Mery Cecilia Gómez Marroquín. Tesis de grado. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2023. [consulta: 02 diciembre 2024]. Formato PDF, 8.49 MB. Disponible en: <https://orcid.org/0000-0001-6889-7641>
- Sawlani, P., Tyagi, D., Rajput, V., Sahu, M., Gupta, G., Jha, A., Agrawal, A. (2023). *Physical and mechanical behaviour of polyester-based composites with micro-sized blast furnace slag as filler material*. *Materials Today: Proceedings*
- Sandeep, B. N., Buddha, K., & Basha, D. B. (2024). *Fabrication and characterization of a composite material from polymer matrix using citrus limetta fiber*. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 39, 101323.
- Sellitto, M. A., & Murakami, F. K. (2018). *Destination of the waste generated by a steelmaking plant: A case study in Latin America*. *Aestimum*, (72), 131–140. <https://doi.org/10.13128/aestim-9025>
- Sithole, N. T., Tsoetsi, N. T., Mashifana, T., & Sillanpää, M. (2022). *Alternative cleaner production of sustainable concrete from waste foundry sand and slag*. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130399.
- Subba Rao, D. V. (2016). *Minerals and Coal Process Calculations* (1ra ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315225524>

- Sultan, M. T. H., Worden, K., Pierce, S. G., Hickey, D., Staszewski, W. J., Dulieu-Barton, J. M., & Hodzic, A. (2011). *On impact damage detection and quantification for CFRP laminates using structural response data only*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(8), 3135-3152.
- Smith, W., & Hashemi, J. (2008). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4ta Ed, Edit. Mc Graw Hill – New York, E.U.A.
- Smith, T., & Jones, A. (2021). *Fiber Reinforcements in Composite Materials*. *Advanced Composites Journal*, 30(5), 89-104.
- Tang, H., Chen, X., & Luo, Y. (1996). *Electrical and dynamic mechanical behavior of carbon black filled polymer composites*. *European polymer journal*, 32(8), 963-966.
- Toledo Ponce, E.A., & Torres Diaz, F.R. (2024). *Influencia del hidróxido de potasio – aminopropiltrimetoxysilano, sobre resistencia a la tracción e impacto del compuesto poliéster – agave*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Trujillo
- Torres, A., Bartlett, L., & Pilgrim, C. (2017). *Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete*. *Construction and building materials*, 135, 674-681
- Venero, J. (2006). *Formas de uso del “maguey” (agave americana, agavaceae) en el humedal lucre-huacarpay. Cusco-Perú. CONCYTEC. (s. f.)*. Evaluación de recursos mineros y su impacto en el desarrollo económico. Alicia - Biblioteca Virtual.
- Velasco, F., Torralba, J. M. & Edil da Costa, C. (1994). *Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones*. Universidad Politécnica de Madrid. Extraído el 13 de enero del 2025 de: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/download/570/580>
- Walte, A. B., Bhole, K., & Gholave, J. (2020). *Mechanical characterization of coir fiber reinforced composite*. *Materials Today: Proceedings*, 24, 557-566.

- Yashas Gowda, T. G., Sanjay, M. R., Subrahmanya Bhat, K., Madhu, P., Senthamaraikannan, P., Yogesha, B., & Pham, D. (2018). *Polymer matrix-natural fiber composites: an overview*. *Cogent Eng* 5 (1).
- Yadav, P., Agrawal, A., Ayachit, B., & Khan, I. A. (2022). *Physical and mechanical behaviour of epoxy-based hybrid composites with blast furnace slag and sisal fiber as reinforcement*. *Materials Today: Proceedings*, 63, 268-271.
- Yang, J., Firsbach, F., & Sohn, I. (2022). *Pyrometallurgical processing of ferrous slag “co-product” zero waste full utilization: A critical review*. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106021.
- Yang, C., Zhang, Z., Yu, H., Xu, N., Rui, Z., & Chu, H. (2025). *Preparation and characterization of modified steel slag-based composite phase change materials*. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 111, 109666.
- Zhang, Q., Cai, H., Yang, K., & Yi, W. (2017). *Effect of biochar on mechanical and flame-retardant properties of wood–plastic composites*. *Results in physics*, 7, 2391-2395.
- Zhang, Q., Zhang, D., Xu, H., Lu, W., Ren, X., Cai, H., ... & Mateo, W. (2020). *Biochar filled high-density polyethylene composites with excellent properties: Towards maximizing the utilization of agricultural wastes*. *Industrial crops and products*, 146, 112185.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Resultados de los ensayos mecánicos de tracción y flexión	1
Anexo 2: Librerías de lenguaje de programación Python utilizado para el análisis estadístico avanzado	33
Anexo 3: Creación de variables dummy, definición de las variables independientes y dependiente, creación de modelo, constante y ajuste para la Regresión Lineal múltiple.	33
Anexo 4: Codificación en lenguaje Python de la gráfica de residuos.....	33
Anexo 5: Codificación en lenguaje Python de la gráfica de Matriz de Correlación (HeatMap).....	34
Anexo 6: Codificación en lenguaje Python del Test de Shapiro-Wilk y gráfica Q-Q.....	34
Anexo 7: Codificación en lenguaje Python del Test de Levene, cálculo de la media, desviación estándar y gráfico de caja (boxplot).....	35
Anexo 8: Codificación en lenguaje Python de los modelos de interacción en ANOVA para el ensayo de tracción.	35
Anexo 9: Codificación en lenguaje Python de las gráficas de interacción de la variación de la resistencia a la tracción en función de sus variables independientes.....	36
Anexo 10: Codificación en lenguaje Python de los modelos de interacción en ANOVA de Welch para el ensayo de flexión.....	36
Anexo 11: Codificación en lenguaje Python de las gráficas de interacción de la variación de la resistencia a la flexión en función de sus variables independientes.....	36
Anexo 12: Codificación en lenguaje Python de los modelos de interacción en ANOVA para el análisis termogravimétrico – pérdida de peso TGA (%)	37

Anexo 1: Resultados de los ensayos mecánicos de tracción y flexión



INFORME DE ENSAYO N° 1224 – 24 – LABICER

1. **DATOS DEL CLIENTE**
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomez@uni.edu.pe
2. **FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME** : 11 / 12 / 2024
3. **ENSAYO SOLICITADO** : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

4. **DATOS DE LA MUESTRA**

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1453-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 1	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. **OBSERVACIONES (SI APLICA)** : -
5. **CONDICIONES DEL MUESTREO**
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACIÓN DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. **CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO**
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pabellón R3-UNI.
- 6.4. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperature: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. **MÉTODOS DE ENSAYO**

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la tracción	ASTM D3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÁXIMA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN MÁXIMA (mm)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (mm)	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)
1	42.9	6.5	42.9	6.5	2.72	24.77
2	48.9	5.0	48.9	5.0	1.88	24.73
3	40.5	5.5	40.5	5.5	3.12	24.82
4	47.0	6.2	47.0	6.2	3.20	24.80
5	39.5	5.0	39.5	5.0	3.35	24.75
PROMEDIO	43.8	5.8	43.8	5.8	2.86	24.78
DESVIACIÓN ESTANDAR	4.08	0.89	4.08	0.89	0.69	0.07

TV Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 2 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas, descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:

Persona que autoriza el informe:



Bach. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI



Firmado digitalmente por:
 MARIJU MEZA MEJIA FIR
 108000371040
 Móvil: 095 17 61
 Fecha: 11/12/2024 10:14:40-05:00

M.Sc. Ily Mariju Meza Mejia
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no realizó el muestreo, entonces no es responsable del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluido en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sello y firma correspondientes.
- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporta utilizando un factor de cobertura de k=2.0 al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1225 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CUENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROJÚN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRONICO : mgomezm@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

4. DATOS DE LA MUESTRA

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1454-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 2	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACION DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pelelón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %

7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la tracción	ASTM D3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÁXIMA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN MÁXIMA (mm)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (mm)	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)
1	33.8	5.1	33.8	5.1	1.91	24.80
2	31.8	5.0	31.8	5.0	2.19	24.80
3	36.3	5.0	36.3	5.0	2.16	24.80
4	34.3	3.9	34.3	3.9	2.40	24.80
5	29.4	3.5	29.4	3.5	2.35	24.81
PROMEDIO	33.1	4.6	33.1	4.6	2.20	24.72
DESVIACIÓN ESTANDAR	2.66	0.74	2.66	0.74	0.19	0.11

¹⁾ Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 2 mm/min; temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:

Persona que autoriza el informe:



Bach. David Rojas Morales
Analista
LABICER-UNI



Firma digitalizada por:
MACAVEJA L Y MARTÍNEZ F M
1080027 head
Motivo: Day V 8"
Fecha: 11/12/2024 16:10:240880

M.Sc. Ily Mariú Meza Mejía
Jefe de Laboratorio
COP 1149

NOTAS:

1. Si LABICER-UNI no realiza el muestreo, entonces no es responsable del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
2. LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
3. Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
4. Este documento carece de validez sin sello y firma correspondientes.
5. Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
6. El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
7. Cuando se reporte la inconfiabilidad del resultado obtenido, este se reporta utilizando un factor de cobertura de 1+2.0 al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1226 – 24 – LABICER

1. **DATOS DEL CLIENTE**
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomez@uni.edu.pe
2. **FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME** : 11 / 12 / 2024
3. **ENSAYO SOLICITADO** : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

4. **DATOS DE LA MUESTRA**

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1485-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 3	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. **OBSERVACIONES (SI APLICA)** : -
5. **CONDICIONES DEL MUESTREO**
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACION DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. **CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO**
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pabellón R3-UNI.
- 6.4. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %

7. **MÉTODOS DE ENSAYO**

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la tracción	ASTM D3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÁXIMA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN MÁXIMA (mm)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (mm)	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)
1	17.8	2.4	17.8	2.4	2.78	24.82
2	11.8	2.0	11.8	2.0	2.77	24.13
3	19.5	3.3	19.5	3.3	2.26	24.71
4	11.1	2.5	7.9	3.0	2.47	24.66
5	13.1	2.3	9.2	3.0	2.10	24.36
PROMEDIO	14.7	2.6	18.2	2.7	2.48	24.64
DESVIACION ESTANDAR	3.78	0.47	6.17	0.62	0.30	0.28

⁽¹⁾ Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 2 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s) descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:



Bach. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI

Persona que autoriza el informe:



Firmado digitalmente por:
 ILY MARIU FIRSIROTI
 10800237
 Móvil: 099 146 81
 Fecha: 11/12/2024 10:35:04-05:00

M.Sc. Ily Mariú Meza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no realizó el muestreo, entonces no es responsable del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1 (la excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sello y firma correspondientes.
- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporta utilizando un factor de cobertura de k=2.0 al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1227 – 24 – LABICER

1. **DATOS DEL CLIENTE**
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomez@uni.edu.pe
2. **FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME** : 11 / 12 / 2024
3. **ENSAYO SOLICITADO** : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN
4. **DATOS DE LA MUESTRA**
- 4.1. **DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾**

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1485-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 4	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. **OBSERVACIONES (SI APLICA)** : -
5. **CONDICIONES DEL MUESTREO**
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACIÓN DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. **CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO**
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pabellón R3-UNI.
- 6.4. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 23,6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. **MÉTODOS DE ENSAYO**

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la tracción	ASTM D3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÁXIMA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN MÁXIMA (mm)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (mm)	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)
1	13.0	2.7	13.0	2.7	2.68	24.86
2	22.4	3.6	22.4	3.6	2.77	24.74
3	21.8	3.6	21.8	3.6	2.94	24.86
4	27.2	4.1	27.2	4.1	2.67	24.77
5	28.4	3.8	28.4	3.8	2.71	24.75
PROMEDIO	22.8	3.6	22.8	3.6	2.75	24.78
DESVIACION ESTANDAR	6.08	0.61	6.08	0.61	0.11	0.07

(*) Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 2 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo solo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:



Boch. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI

Persona que autoriza el informe:



Firma digitalizada por:
 MICHAELA L.Y. MARTINI FM
 1080027 head
 Número: Day 1° 8°
 Fecha: 11/12/2024 16:17:24:080

M.Sc. Ily Mariú Moza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no realiza el muestreo, entonces no es responsable del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/código) del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.
- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporte utilizando un factor de cobertura de $k=2.0$ al 95% de confianza.

INFORME DE ENSAYO N° 1228 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomezm@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

4. DATOS DE LA MUESTRA

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1487-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA S	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACIÓN DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Peñón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %

7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la tracción	ASTM D3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÁXIMA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN MÁXIMA (mm)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (mm)	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)
1	16.5	2.4	16.5	2.4	3.80	24.86
2	26.1	4.1	18.5	4.1	4.03	24.89
3	23.3	3.6	23.3	3.6	3.15	24.66
4	19.0	2.8	19.0	2.8	3.01	24.74
5	27.1	4.0	27.1	4.0	3.88	24.86
PROMEDIO	22.4	3.4	20.9	3.4	3.89	24.81
DESVIACIÓN ESTANDAR	4.66	0.78	4.27	0.78	0.34	0.09

⁽¹⁾ Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 2 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:

Persona que autoriza el informe:



Bach. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI



Firma digitalizada por:
 MIZANIELA LY MARIU FIR
 10800237.html
 Móvil: 099 14 81
 Fecha: 11/12/2024 10:10:05-08:00

M.Sc. Ily Meriú Meza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

1. Si LABICER-UNI no recibe el muestra, entonces no es responsable del muestra ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
2. LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluido en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación (formato) del presente documento).
3. Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
4. Este documento carece de validez sin sellos y firmas correspondientes.
5. Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
6. El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
7. Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporta utilizando un factor de cobertura de k=2.0 al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1229 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomezm@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN
4. DATOS DE LA MUESTRA
- 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1488-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 6	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACION DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pabellón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la tracción	ASTM D3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÁXIMA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN MÁXIMA (mm)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (mm)	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)
1	29.7	3.4	29.7	3.4	2.97	24.85
2	35.4	4.5	35.4	4.5	2.91	24.81
3	25.1	2.5	17.5	2.5	2.33	24.84
4	18.4	4.0	18.2	4.1	3.00	24.87
5	26.3	3.8	21.0	3.8	2.83	24.77
PROMEDIO	27.0	3.8	24.4	3.7	2.98	24.76
DESVIACIÓN ESTANDAR	6.24	0.76	7.86	0.77	0.46	0.12

(1) Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 2 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo solo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:

Persona que autoriza el informe:



Bach. David Rojas Morales
Analista
LABICER-UNI



Firma digitalizada por:
MARCELA LY MARTIJU F.R.
10800271ent
Módulo: Day 1º B1
Fecha: 11/12/2024 18:18:08:080

M.Sc. Ily Mariú Meza Mejía
Jefe de Laboratorio
COP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no realiza el muestreo, entonces no es responsable del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.
- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporte utilizando un factor de cobertura de $k=2.0$ al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1230 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROJÚN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomez@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN
4. DATOS DE LA MUESTRA
- 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1489-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 7	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACION DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Peabellón F3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperature: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la tracción	ASTM D3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÁXIMA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN MÁXIMA (mm)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (mm)	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)
1	13.3	3.1	13.3	3.1	3.75	24.70
2	18.7	3.5	13.1	3.6	3.84	24.83
3	13.8	2.8	13.8	2.8	3.69	24.76
4	17.4	3.2	12.5	3.8	3.62	24.66
5	21.8	3.5	21.8	3.5	3.47	24.58
PROMEDIO	17.0	3.2	14.9	3.4	3.87	24.71
DESVIACIÓN ESTANDAR	3.64	0.31	3.89	0.41	0.14	0.10

⁽¹⁾ Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 2 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo solo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:

Persona que autoriza el informe:



Bach. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI



Firmado digitalmente por:
 MDCAMILLA ILY MERLÍU MAIZA
 10800237.html
 Móvil: 099 17 87
 Fecha: 11/12/2024 10:19:40-05:00

M.Sc. Ily Merliú Maiza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

1. Si LABICER-UNI no realiza el ensayo, entonces no se responsabiliza del ensayo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
2. LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluido en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
3. Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
4. Este documento carece de validez sin sellos y firmas correspondientes.
5. Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
6. El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
7. Cuando se reporte la inconfiabilidad del resultado asociado, este se reporte utilizando un factor de cobertura de $k=2.0$ al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1231 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROJÚN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomez@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN
4. DATOS DE LA MUESTRA
- 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1470-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 8	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACIÓN DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Peñón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la tracción	ASTM D3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MÁXIMA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN MÁXIMA (mm)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN A LA TRACCIÓN EN LA ROTURA (mm)	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)
1	35.2	4.7	35.2	4.7	3.91	24.80
2	31.5	4.7	22.4	5.0	3.91	25.00
3	25.8	3.8	25.8	3.8	3.86	24.65
4	21.2	4.1	21.2	4.1	3.67	24.76
5	36.3	4.6	36.3	4.6	3.66	24.74
PROMEDIO	30.0	4.4	28.2	4.4	3.80	24.78
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	6.40	0.40	7.12	0.48	0.13	0.13

(*) Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 2 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo solo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:



Bach. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI

Persona que autoriza el informe:



Firmado digitalmente por:
 MACAVEJIA ILY MARIU F M
 1080027 head
 Motivo: Day 1/ 0'
 Fecha: 11/12/2024 18:20:140880

M.Sc. Ily Mariú Meza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no realiza el muestreo, entonces no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1, (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sellos y firmas correspondientes.
- Este documento al ser emitido en el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporte utilizando un factor de cobertura de k=2.0 al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1232 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomezm@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

4. DATOS DE LA MUESTRA

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1453-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 1	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -

5. CONDICIONES DEL MUESTREO

- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACIÓN DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica

6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO

- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pabellón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperature: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %

7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la flexión	ASTM D790	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (MPa)
1	1.03	49.00	199.4	87.5
2	2.18	49.87	199.2	32.5
3	3.08	49.78	199.1	72.4
4	3.03	50.00	199.2	49.8
5	4.05	49.85	199.5	34.1
PROMEDIO	2.78	49.78	199.3	61.2
DESVIACION ESTANDAR	0.89	0.18	0.18	18.44

(1) Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 13.7 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo solo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:



Bech. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI

Persona que autoriza el informe:



Firmado digitalmente por:
 MACAVEJA L Y MARTIQU I M
 10900271468
 Fecha: 11/11/2024 18:20:05-0800

M.Sc. Ily Merliú Meza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no realizó el muestreo, entonces no es responsable del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sellos y firmas correspondientes.
- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporte utilizando un factor de cobertura de $k=2.0$ al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1233 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomez@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN
4. DATOS DE LA MUESTRA
- 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1484-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 2	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACION DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pebeñón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperature: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la flexión	ASTM D790	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (MPa)
1	2.41	49.79	199.5	65.3
2	2.12	49.58	199.8	47.4
3	2.72	49.80	199.0	45.3
4	3.38	49.83	199.4	15.2
5	2.10	49.78	199.0	33.5
PROMEDIO	2.66	49.76	199.3	41.3
DESVIACION ESTANDAR	0.68	0.11	0.28	18.62

(1) Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 13.7 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo solo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:



Bech. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI

Persona que autoriza el informe:



Firmado digitalmente por:
 MARZAVELLA ILY MERLIU MEZ
 10800227 Perú
 Móvil: 999 14 87
 Fecha: 11/10/2024 10:21:21-08:00

M.Sc. Ily Merliú Meza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no realiza el muestreo, entonces no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.
- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporte utilizando un factor de cobertura de $k=2.0$ al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1234 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomez@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN
4. DATOS DE LA MUESTRA
- 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1485-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 3	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACIÓN DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pabellón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 23,6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la flexión	ASTM D790	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (MPa)
1	2.83	49.81	199.1	65.5
2	3.16	49.79	199.1	48.8
3	3.26	49.75	199.2	43.6
4	3.48	49.72	199.2	47.7
5	3.24	49.53	199.0	38.8
PROMEDIO	3.19	49.72	199.2	48.6
DESVIACION ESTANDAR	0.28	0.11	0.21	10.18

IV Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 13.7 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:



Bach. David Rojas Morales
Analista
LABICER-UNI

Persona que autoriza el informe:



Firmado digitalmente por:
MAGDALENA LY MARILU FIR
10800207
Módulo: Doc Vº 6º
Fecha: 11/12/2024 10:21:52-05:00

M.Sc. Ily Mariú Meza Mejía
Jefe de Laboratorio
COP 1149

NOTAS:

1. Si LABICER-UNI no realiza el ensayo, entonces no es responsable del resultado ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
2. LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
3. Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
4. Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.
5. Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
6. El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
7. Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporta utilizando un factor de cobertura de k=2.0 al 95% de confianza.

ANEXO

EMI-F.01, v01 (17-04-24) / INFORME DE ENSAYO N° 1204-24 - LABICER

Página 2 de 4

Prohibida la alteración a uso indebido del presente informe. Prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de LABICER-UNI.



Centro de Investigación de la
Facultad de Ciencias - Puerto y
Av. Túpac Amaru 230, Rimac



800 8908
451 1878 - Are. 5018



labicer@uni.edu.pe
www.labicer.uni.edu.pe



INFORME DE ENSAYO N° 1235 – 24 – LABICER

1. **DATOS DEL CLIENTE**
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomezm@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN
4. **DATOS DE LA MUESTRA**
- 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1485-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 4	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. **CONDICIONES DEL MUESTREO**
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACION DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. **CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO**
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pabellón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperature: 23,6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. **MÉTODOS DE ENSAYO**

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la flexión	ASTM D790	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (MPa)
1	2.74	49.80	199.5	68.8
2	4.29	50.44	199.7	45.9
3	2.56	49.88	199.1	48.1
4	5.06	49.90	199.0	29.1
5	2.72	49.81	199.1	54.3
PROMEDIO	3.47	49.87	199.3	49.2
DESVIACION ESTANDAR	1.18	0.27	0.30	14.87

(1) Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 13.7 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:

Persona que autoriza el informe:



Bach. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI



Firma electrónica por:
 MAIZAVIEJA L.Y MERLIU FIR
 10800327.html
 Idioma: Ouy V' 8'
 Fecha: 11/12/2024 10:22:19-0500

M.Sc. My Merliú Maiza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no recibe el muestra, entonces no es responsable del muestra ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluido en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sello y firma correspondientes.
- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporta utilizando un factor de cobertura de $k=2.0$ al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1236 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomezm@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN
4. DATOS DE LA MUESTRA
- 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1487-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 5	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACION DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pabellón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la flexión	ASTM D790	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (MPa)
1	3.51	49.97	199.4	40.7
2	4.47	49.95	200.0	48.5
3	3.20	49.85	199.2	61.9
4	4.52	49.91	199.0	42.2
5	3.94	49.85	199.5	62.5
PROMEDIO	3.93	48.91	199.4	61.2
DESVIACION ESTANDAR	0.68	0.06	0.38	10.60

(1) Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 13.7 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de Tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas, descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:



Bach. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI

Persona que autoriza el informe:



Firmado digitalmente por:
 INACAL-DA ILY MARIU FIR
 10800037.html
 Método: Doy Vº Bº
 Fecha: 11/12/2024 10:22:58-05:00

M.Sc. Ily Mariú Meza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

1. Si LABICER-UNI no realiza el muestreo, entonces no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
2. LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluido en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/versión) del presente documento.
3. Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
4. Este documento carece de validez sin sellos y firmas correspondientes.
5. Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
6. El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
7. Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporta utilizando un factor de cobertura de $k=2.0$ al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1237 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROJÚN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomez@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN
4. DATOS DE LA MUESTRA
- 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (1)

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1488-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 6	PLÁSTICO

(1) Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACION DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Peñón 83-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA (1)	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la flexión	ASTM D790	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

(1) Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.

8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (MPa)
1	3.95	49.99	199.1	71.5
2	3.83	49.92	199.5	59.5
3	2.64	49.89	199.0	67.3
4	3.33	49.76	199.2	66.1
5	3.15	49.78	199.4	55.6
PROMEDIO	3.38	49.87	199.2	64.4
DESVIACION ESTANDAR	0.68	0.10	0.21	6.82

(1) Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 13.7 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:



Bach. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI

Persona que autoriza el informe:



Firmado digitalmente por:
 MDCANVELLA ILY MERLIU FRI
 10890237 Inad
 Idioma: Spa / V 8°
 Fecha: 11/12/2024 10:22:00-0500

M.Sc. Ily Merliú Meza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no realiza el muestreo, entonces no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sello y firma correspondientes.
- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporta utilizando un factor de cobertura de $k=2.0$ al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1238 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomezm@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

4. DATOS DE LA MUESTRA

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA (1)

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1402-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 7	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACIÓN DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pebeñón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %

7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA (1)	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la flexión	ASTM D790	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (MPa)
1	3.91	49.90	199.8	83.3
2	2.99	49.87	199.4	85.9
3	3.04	49.82	199.2	88.0
4	4.28	49.93	200.0	85.1
5	3.88	50.45	199.5	84.4
PROMEDIO	3.82	49.99	199.8	86.3
DESVIACION ESTANDAR	0.67	0.28	0.32	1.77

1) Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 13.7 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayada(s), descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:



Bach. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI

Persona que autoriza el informe:



Firma digitalizada por:
 MDCAMELA LY MARILU FR
 1080027 /and
 Móvile: 099 14 81
 Fecha: 11/12/2024 10:22:50-05:00

M.Sc. Ily Merliú Meza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 CCP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no realiza el muestreo, entonces no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición) del presente documento.
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sello y firma correspondientes.
- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporta utilizando un factor de cobertura de $k=2.0$ al 95% de confianza.



INFORME DE ENSAYO N° 1239 – 24 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
- 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : MERY CECILIA GÓMEZ MARROQUÍN
- 1.2. D.N.I / R.U.C. : 08273155
- 1.3. DIRECCIÓN : -
- 1.4. PERSONA DE CONTACTO : Mery Gómez
- 1.5. CORREO ELECTRÓNICO : mgomezmi@uni.edu.pe
2. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 11 / 12 / 2024
3. ENSAYO SOLICITADO : ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN
4. DATOS DE LA MUESTRA
- 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ⁽¹⁾

MUESTRA/CÓDIGO LABORATORIO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	TIPO DE MUESTRA
M1 / 1470-24	MATERIAL COMPUESTO DE BASE POLIMÉRICA 8	PLÁSTICO

⁽¹⁾ Ver Nota 2 al final del documento.

- 4.2. OBSERVACIONES (SI APLICA) : -
5. CONDICIONES DEL MUESTREO
- 5.1. MUESTREO POR : No aplica
- 5.2. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : No aplica
- 5.3. PLAN DE MUESTREO : No aplica
- 5.4. FECHA Y HORA DE MUESTREO : No aplica
- 5.5. LUGAR / COORDENADAS DE MUESTREO : No aplica
- 5.6. ESTACION DE MUESTREO : No aplica
- 5.7. FECHA Y HORA DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
- 5.8. LUGAR DE ENSAYO EN CAMPO : No aplica
6. CONDICIONES DE ENSAYO EN LABORATORIO
- 6.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 11 / 2024
- 6.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 28 / 11 / 2024 AL 05 / 12 / 2024
- 6.3. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ENSAYO : LABORATORIO LABICER-UNI
Primer piso del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias, Pabellón R3-UNI.
- 6.4. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 23.6 °C; Humedad relativa: 57 %
7. MÉTODOS DE ENSAYO

N°	PARÁMETRO	METODO DE REFERENCIA ⁽¹⁾	TÍTULO / OBSERVACIONES (Si aplica)
1	Resistencia a la flexión	ASTM D790	Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

⁽¹⁾ Método de ensayo de referencia, norma o técnica aceptada por el cliente.



8. RESULTADOS

N° REPETICIÓN	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	LARGO (mm)	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (MPa)
1	4.37	49.79	199.3	48.8
2	3.58	49.80	199.8	61.5
3	4.40	49.95	199.4	48.7
4	3.10	50.05	199.5	91.5
5	3.57	50.01	199.5	79.3
PROMEDIO	3.80	49.82	199.6	66.0
DESVIACION ESTANDAR	0.68	0.12	0.19	18.99

(1) Condiciones de ensayo: Velocidad de ensayo 13.7 mm/min, temperatura de ensayo: 23.0°C. Equipo: Máquina de tracción universal ZWICK ROELL, 2010.

9. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo solo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas, descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Analista Responsable:

Persona que autoriza el informe:



Bach. David Rojas Morales
 Analista
 LABICER-UNI



Firmado digitalmente por:
 MARCAVILLA ILY MERITU FIR
 10890237.html
 Móvil: 099 14 81
 Fecha: 11/12/2024 10:24:22-08:00

M.Sc. Ily Meritú Meza Mejía
 Jefe de Laboratorio
 COP 1149

NOTAS:

- Si LABICER-UNI no realiza el muestreo, entonces no es responsable del muestreo ni de la procedencia de la muestra. Los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluida en los ítems 1 y 4.1. (a excepción del código del laboratorio y la presentación/condición del presente documento).
- Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- Este documento carece de validez sin sellos y firmas correspondientes.
- Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.
- El uso indebido de este informe de ensayo constituye un delito sancionado conforme a la ley, por la autoridad competente.
- Cuando se reporte la incertidumbre del resultado asociado, este se reporte utilizando un factor de cobertura de $k=2.0$ al 95% de confianza.



Anexo 2: Librerías de lenguaje de programación Python utilizado para el análisis estadístico avanzado

```
In [133... #Importar librerías
import pandas as pd
import numpy as np
import statsmodels.api as sm
from sklearn.preprocessing import OneHotEncoder
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

In [62]: #Cargar el archivo excel
data = pd.read_excel('Data_Traccion.xlsx')
data.head(10)
```

Anexo 3: Creación de variables dummy, definición de las variables independientes y dependiente, creación de modelo, constante y ajuste para la Regresión Lineal múltiple.

```
In [116... # Crear variables dummy sin eliminar ninguna categoría
data_dummies = pd.get_dummies(data, columns=['Tipo_Refuerzo'], drop_first=False)

# Revisar Las columnas generadas
data_dummies.head(10)

In [118... # Definir Las variables independientes (X) y dependiente (y)
X = data_dummies[['Relleno_Escoria',
                  'Contenido_Refuerzo',
                  'Tipo_Refuerzo_Fibra de Chambira',
                  'Tipo_Refuerzo_Fibra de Maguey',
                  'Tipo_Refuerzo_Ninguno' ]]
y = data_dummies['Resistencia_Traccion']

In [120... # Agregar una constante al modelo
X = sm.add_constant(X)

In [122... # Crear el modelo y ajustarlo
model = sm.OLS(y, X).fit()

# Resumen del modelo
model.summary()
```

Anexo 4: Codificación en lenguaje Python de la gráfica de residuos

```
In [135... # Calcular residuos
residuals = model.resid
valores_predichos = model.fittedvalues
# Identificadores de Los experimentos
experimentos = data['Experimento']

# Gráfico de residuos
plt.scatter(valores_predichos, residuals)
plt.axhline(y=0, color='red', linestyle='--')
plt.xlabel('Valores Predichos')
plt.ylabel('Residuos')
plt.title('Gráfico de Residuos de Ensayo de Tracción')

#Añadir etiquetas para cada punto
for i, exp in enumerate(experimentos):
    plt.text(valores_predichos[i], residuals[i], exp, fontsize=9, ha='left')
plt.show()
```

Anexo 5: Codificación en lenguaje Python de la gráfica de Matriz de Correlación (HeatMap)

```
In [137... # Matriz de correlación
correlation_matrix = data.corr()
# Tamaño de la figura
plt.figure(figsize=(10,6))
sns.heatmap(correlation_matrix, #Matriz de correlación
            annot=True,        # Mostrar valores en cada celda
            fmt=".2f",         # Formato de los números
            cmap='coolwarm',   # Mapa de colores
            vmin=-1, vmax=1,   # Escala de -1 a 1
            linewidths=0.5,    # Líneas entre celdas
            square=True,       # Mantener celdas cuadradas
            cbar_kws={"shrink":0.8} #Ajustar el tamaño de la barra de color
            )
#Personalización
plt.title("Matriz de Correlación para Ensayo de Tracción", fontsize=12)
plt.xticks(rotation=45, ha='right') #Rotación de etiquetas en X
plt.yticks(rotation=0) #Mantener etiquetas en Y horizontales
plt.tight_layout() #Ajustar diseño para evitar solapamientos
plt.show()
```

Anexo 6: Codificación en lenguaje Python del Test de Shapiro-Wilk y gráfica Q-Q

```
In [13]: # Variable dependiente
resistencia = data["Resistencia_Traccion"]

# 1. Test de Shapiro-Wilk
shapiro_test = stats.shapiro(resistencia)
print("Shapiro-Wilk Test:")
print(f"Statistic = {shapiro_test.statistic}, p-value = {shapiro_test.pvalue}")

# 2. Gráfico Q-Q
plt.figure(figsize=(8, 6))
stats.probplot(resistencia, dist="norm", plot=plt)
plt.title("Q-Q Plot")
plt.show()
```

Anexo 7: Codificación en lenguaje Python del Test de Levene, cálculo de la media, desviación estándar y gráfico de caja (boxplot)

```
In [37]: # 1. Test de Levene (para homogeneidad de varianzas)
levene_test = levene(
    data[data["Tipo_Refuerzo"] == "Ninguno"]["Resistencia_Traccion"],
    data[data["Tipo_Refuerzo"] == "Fibra de Maguey"]["Resistencia_Traccion"],
    data[data["Tipo_Refuerzo"] == "Fibra de Chambira"]["Resistencia_Traccion"]
)
print("Levene Test:")
print(f"Statistic = {levene_test.statistic}, p-value = {levene_test.pvalue}")

# 2. Calcular media y desviación estándar por grupo (Tipo_Refuerzo)
estadisticas = data.groupby('Tipo_Refuerzo')['Resistencia_Traccion'].agg(['mean', 'std']).reset_index()
estadisticas.columns = ['Tipo_Refuerzo', 'Media', 'Desviación_Estándar']

# Mostrar las estadísticas calculadas
print(estadisticas)

# 3. Grafico de cajas (Boxplot)

# Configurar estilo de seaborn
sns.set(style="whitegrid")

# Crear el gráfico de cajas (boxplot)
plt.figure(figsize=(8, 6))
sns.boxplot(data=data, x='Tipo_Refuerzo', y='Resistencia_Traccion', palette='Set2')

# Títulos y etiquetas
plt.title('Gráfico de Cajas: Resistencia a la Tracción por Tipo de Refuerzo', fontsize=14)
plt.xlabel('Tipo de Refuerzo', fontsize=12)
plt.ylabel('Resistencia a la Tracción (MPa)', fontsize=12)
plt.show()
```

Anexo 8: Codificación en lenguaje Python de los modelos de interacción en ANOVA para el ensayo de tracción.

```
s_1 = smf.ols('Resistencia_Traccion ~ (C(Contenido_Refuerzo)+C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))**3', data=data_dummies).fit()
s_1.summary()

s_2 = smf.ols('Resistencia_Traccion ~ (C(Contenido_Refuerzo)+C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))**2', data=data_dummies).fit()
s_2.summary()

s_3 = smf.ols('Resistencia_Traccion ~ (C(Contenido_Refuerzo)+C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))', data=data_dummies).fit()
s_3.summary()

s_4 = smf.ols('Resistencia_Traccion ~ (C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))', data=data_dummies).fit()
s_4.summary()

s_5 = smf.ols('Resistencia_Traccion ~ (C(Relleno_Escoria)*(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))', data=data_dummies).fit()
s_5.summary()

s_6 = smf.ols('Resistencia_Traccion ~ (C(Relleno_Escoria)*(Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))', data=data_dummies).fit()
s_6.summary()

from statsmodels.stats.anova import anova_lm
anova_lm(s_4)
```

Anexo 9: Codificación en lenguaje Python de las gráficas de interacción de la variación de la resistencia a la tracción en función de sus variables independientes.

```
In [338... from statsmodels.graphics.factorplots import interaction_plot

interaction_plot(
    df['Relleno_Escoria'], # Eje X
    df['Tipo_Refuerzo'], # Factor a analizar
    df['Resistencia_Traccion'], # Eje Y
    colors=['red', 'blue', 'green'],
    markers=['o', '^', 's'],
    ms=8
)
plt.title('Interacción entre Relleno de Escoria y Tipo de Refuerzo')
plt.xlabel('Relleno de Escoria (%)')
plt.ylabel('Resistencia a la Tracción (MPa)')
plt.show()
```

Anexo 10: Codificación en lenguaje Python de los modelos de interacción en ANOVA de Welch para el ensayo de flexión

```
modelo_welch_1 = smf.ols('Resistencia_Flexion ~ (C(Contenido_Refuerzo)+C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))**3', data=data_dummies).fit()
modelo_welch_1.summary()

modelo_welch_2 = smf.ols('Resistencia_Flexion ~ (C(Contenido_Refuerzo)+C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))**2', data=data_dummies).fit()
modelo_welch_2.summary()

modelo_welch_3 = smf.ols('Resistencia_Flexion ~ (C(Contenido_Refuerzo)+C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))', data=data_dummies).fit()
modelo_welch_3.summary()

modelo_welch_7 = smf.ols('Resistencia_Flexion ~ (C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))**2', data=data_dummies).fit()
modelo_welch_7.summary()

modelo_welch_8 = smf.ols('Resistencia_Flexion ~ (C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))', data=data_dummies).fit()
modelo_welch_8.summary()

from statsmodels.stats.anova import anova_lm
anova_welch = anova_lm(modelo_welch_3, robust="hc")
anova_welch
```

Anexo 11: Codificación en lenguaje Python de las gráficas de interacción de la variación de la resistencia a la flexión en función de sus variables independientes

```
In [90]: from statsmodels.graphics.factorplots import interaction_plot

interaction_plot(
    df['Relleno_Escoria'], # Eje X
    df['Tipo_Refuerzo'], # Factor a analizar
    df['Resistencia_Flexion'], # Eje Y
    colors=['red', 'blue', 'green'],
    markers=['o', '^', 's'],
    ms=8
)
plt.title('Interacción entre Relleno de Escoria y Tipo de Refuerzo')
plt.xlabel('Relleno de Escoria (%)')
plt.ylabel('Resistencia a la Flexión (MPa)')
plt.show()
```

Anexo 12: Codificación en lenguaje Python de los modelos de interacción en ANOVA para el análisis termogravimétrico – pérdida de peso TGA (%)

```
s_1 = smf.ols('Pérdida_Peso_TGA ~ (C(Contenido_Refuerzo)+C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))**3', data=data_dummies).fit()
s_1.summary()

s_2 = smf.ols('Pérdida_Peso_TGA ~ (C(Contenido_Refuerzo)+C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))**2', data=data_dummies).fit()
s_2.summary()

s_3 = smf.ols('Pérdida_Peso_TGA ~ (C(Contenido_Refuerzo)+C(Relleno_Escoria)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))', data=data_dummies).fit()
s_3.summary()

s_4 = smf.ols('Pérdida_Peso_TGA ~ (C(Contenido_Refuerzo)+(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))', data=data_dummies).fit()
s_4.summary()

s_5 = smf.ols('Pérdida_Peso_TGA ~ (C(Contenido_Refuerzo)*(Tipo_Refuerzo_FM + Tipo_Refuerzo_FC + Tipo_Refuerzo_Ninguno))', data=data_dummies).fit()
s_5.summary()

from statsmodels.stats.anova import anova_lm
anova_lm(s_5)
```