



**Evaluación de la viabilidad de incorporar residuos de PRFV a una resina termoestable  
para la compañía Invesa S.A.**

Edwin Andrés Arroyave Cano

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero de Materiales

Asesores

Carmina Gartner, doctora en Ciencias Químicas, profesora del Departamento de Ingeniería de  
Materiales.

Andrés Cano Rendón, Líder Ingeniería negocio Energía y Telecomunicaciones, Invesa S.A

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería de Materiales  
Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Arroyave Cano) [1]
Referencia	[1] E. A. Arroyave Cano, “Evaluación de la viabilidad de incorporar residuos de PRFV a una resina termoestable para la compañía Invesa S.A.”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/Director:** Julio César Saldarriaga

**Jefe departamento:** Francisco Javier Herrera Builes

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

El presente trabajo es dedicado a mi familia que con su amor y paciencia me apoyaron en este sueño de ser un profesional; a la Universidad de Antioquia porque durante el tiempo que estuve estudiando me permitió, no solo obtener los conocimientos necesarios en mi carrera, sino que me dio la oportunidad de tener una visión amplia de la vida, por medio de las personas con quienes tuve una vivencia en el ámbito académico y en los programas ofrecidos por Bienestar Universitario.

## **Agradecimientos**

Un agradecimiento a todos los profesores, monitores y amigos que fueron un gran apoyo en esta etapa de mi vida. Especialmente a mi asesora Carmiña Gartner que estuvo brindándome apoyo desde que inicié mis prácticas profesionales; a mi asesor interno Andrés Cano, por sus explicaciones y dirección en la empresa Invesa S.A. y al profesor Diego Giraldo por brindarme el apoyo en el proyecto desarrollado.

## TABLA DE CONTENIDO

### CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	9
<b>ABSTRACT</b> .....	10
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	12
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	12
3.1 Objetivo general .....	12
3.2 Objetivos específicos .....	12
<b>IV. MARCO TEÓRICO</b> .....	13
4.1 Materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio .....	13
4.1.1 Resina poliéster .....	13
4.1.2 Refuerzo .....	14
4.1.3 Cargas .....	14
4.1.4 Iniciadores y promotores .....	14
4.2 Métodos de reciclaje de PRFV .....	15
4.2.1 Reciclaje mecánico .....	15
4.2.2 Reciclaje térmico .....	15
4.2.3 Reciclaje oxidativo .....	15
4.2.4 Reciclaje electroquímico .....	15
5.1 Identificación de residuos de materiales compuestos .....	16
5.2 Muestras .....	16
5.2.1 Caracterización muestras .....	16
5.3 Construcción probetas y adiciones de residuo de PRFV .....	17
5.4 Pruebas flexión .....	18

5.5 Pruebas deflexión bajo carga (HDT).....	18
5.6 Prueba de adhesión.....	18
5.7 Índice de acidez.....	19
5.8 Viabilidad.....	20
<b>VI. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>21</b>
6.1 Identificación de residuos de PRFV.....	21
6.2 Materias primas utilizadas en las probetas de resina de poliéster.....	21
6.3 Caracterización.....	22
6.3.1 Tamizaje del polvo de residuo de PRFV.....	22
6.3.2 Viscosidades, tiempos de gel, tiempos y temperaturas de exotermia.....	22
6.4 Medición de dureza y apariencia en probetas.....	26
6.5 Ensayo flexión.....	28
6.6 Deflexión bajo carga (HDT).....	34
6.7 Ensayo de adherencia.....	34
6.8 Viabilidad.....	35
<b>VIII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Distribución porcentual del residuo de PRFV -----	22
<b>Tabla 2.</b> Parámetros encontrados en las muestras con resina pura, refuerzos particulados y con residuo de PRFV. -----	23
<b>Tabla 3.</b> Comportamiento en el tiempo del índice de acidez medidos mediante titulación a la resina de poliéster estudiada. -----	26
<b>Tabla 4.</b> Dureza promedio tomada de las muestras estudiadas. -----	27
<b>Tabla 5.</b> Resultados de los ensayos de flexión en las diferentes probetas -----	31
<b>Tabla 6.</b> Viabilidad de incorporación de la resina con residuo de PRFV en Invesa S.A. -----	36

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Figura 1A, residuos generados por el área de materiales compuestos. Figuras 1B y 1C, residuos generados por el área de postes. -----	21
<b>Figura 2.</b> Figura 2A, refuerzo particulado empleado en probetas. Figura 2B, Resina de poliéster. Figura 2C, polvo de PRFV. -----	22
<b>Figura 3.</b> Índice de acidez medido por medio de titulación a la resina de poliéster con y sin residuo de PRFV. -----	24
<b>Figura 4.</b> Comportamiento de la resina de poliéster sin residuo. Resina con PRFV de tamaño menor a los 600 $\mu\text{m}$ y resina con PRFV de distribución granulométrica entre 600 $\mu\text{m}$ y 850 $\mu\text{m}$ . -----	25
<b>Figura 5.</b> Medición de durezas Barcol y apariencia física de las probetas. -----	27
<b>Figura 6.</b> Coordenadas CIE L* A* B* de las muestras M1, M2, M3 y M4. -----	28
<b>Figura 7.</b> Figura 7 A, B, C probetas fabricadas para el ensayo flexión. Figura 7 D, ensayo de flexión en las probetas de poliéster mediante máquina universal Shimadzu. -----	29
<b>Figura 8.</b> Ensayo preliminar de flexión con celda de carga Dirimpex para las probetas de poliéster fabricadas -----	29
<b>Figura 9.</b> Comportamiento esfuerzo versus deformación unitaria de las muestras M1, M2, M3 y M4 sometidas a flexión. -----	30
<b>Figura 10.</b> Micrografía desde diferentes perspectivas de la probeta M1. -----	31
<b>Figura 11.</b> Micrografía de una de las caras donde se produjo el fallo de la probeta M2. -----	32
<b>Figura 12.</b> Zona donde se produjo la falla en la probeta M3. Figura 13A, zona de la burbuja de aire en el centro de falla. Figura 13B, Filamentos de una de las partículas del residuo de PRFV dentro de la burbuja de aire. -----	32
<b>Figura 13.</b> Figura 13A, zona de falla en la nuestra. Figura 13B, impureza dentro de la zona de falla. Figura 13C, filamentos de fibra de vidrio vistos a mas aumentos en la zona de inicio de falla. Figura 13D, pequeñas zonas de tonalidad más oscura, correspondientes a burbujas de aire. -----	33
<b>Figura 14.</b> Comportamiento de las muestras M1, M2, M3 y M4 frente a una carga flexionante y la temperatura. -----	34
<b>Figura 15.</b> Prueba de adherencia en resina de poliéster con 10% de residuo de PRFV. Figura 14A, laminado inicial correspondiente a 2 capas tipo Mat. Figura 14 B y C, desgarré obtenido en el área de adherencia entre un laminado y otro. -----	35

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

PRFV	Resina de poliéster con fibra de vidrio
M1	Muestra 1
M2	Muestra 2
M3	Muestra 3
M4	Muestra 4
R1	Resina + PRFV
R2	Resina + PRFV con tamaño menor o igual a los 600 $\mu$ m



---

## RESUMEN

En este trabajo se fabricaron probetas de resina de poliéster mezcladas con residuo de resina de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) para estudiar la factibilidad de su incorporación mediante la medición de propiedades como flexión y deflexión bajo carga (HDT). El residuo de PRFV se obtuvo a través de la identificación de residuos en la empresa Invesa S.A. y la caracterización del tamaño de partícula se logró por medio de un tamizado hecho a la muestra. Las pruebas mecánicas muestran una reducción de las propiedades (deflexión, esfuerzo) en los ejemplares que contenían residuo de PRFV y refuerzos en polvo; pero en el caso de las pruebas de HDT mostró un comportamiento favorable. Las caracterizaciones hechas a la resina en las pruebas de tiempo de gel y viscosidad produjeron resultados fuera de los estándares exigidos por la compañía. La adherencia, por el contrario, presenta resultados positivos al probarse mediante un laminado y posterior desgarre. Las pruebas de índice de acidez demostraron que la acidez residual se redujo en el tiempo por acción del residuo de PRFV, pero esto no acortó el tiempo de gel en las muestras estudiadas.

***Palabras clave*** —Residuos, tiempos de gel, viscosidad, flexión, deflexión, adhesión, índice de acidez.

### ABSTRACT

In this work, polyester resin specimens mixed with glass fiber reinforced polyester resin (GRP) residue were fabricated to study the feasibility of their incorporation by measuring properties such as flexural and heat deflection temperature (HDT). The GRP residue was obtained through waste identification at Invesa S.A. and particle size characterization was achieved by sieving the sample. Mechanical tests show a reduction of properties (deflection, stress) in the specimens containing GRP residue and reinforcements; but in the case of HDT tests, it showed a favorable behavior. The characterizations made to the resin in the gel time and viscosity tests produced results outside the standards required by the company. Adherence, on the other hand, shows positive results when tested by lamination and subsequent tearing. Acid number tests showed that the residual acidity was reduced over time by the action of the GRP residue, but this did not shorten the gel time in the samples studied.

***Keywords* — Residues, gel times, viscosity, flexure, deflection, adhesion, acid index.**

## I. INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años los materiales compuestos han cobrado gran relevancia en el mercado, ya que representan 200 de los 1600 materiales que hay en ingeniería. Su importancia se debe al bajo costo con que se producen y las cualidades que presentan como peso ligero, alta calidad, resistencia química, entre otros [1][2]. Dentro de los materiales compuestos están aquellos que poseen una matriz polimérica y un refuerzo que puede ser continuo o discontinuo como el Carbono, el vidrio o Kevlar. Los refuerzos, a su vez, tienen una orientación que hace que el material compuesto se comporte mejor bajo un esfuerzo mecánico[3]. Para poder crear este tipo de materiales hay varias técnicas de procesamiento, una de ellas es la pultrusión, la cual es muy utilizada en componentes estructurales de polímero reforzado que tienen una sección transversal continua. El proceso consiste en pasar las fibras que bien pueden ser de vidrio, aramida o carbono por un baño de resina que puede ser epoxi, viniléster o poliéster, para posteriormente ser introducidas en una matriz que tiene alta temperatura y una geometría determinada según el producto que se desea realizar. La alta temperatura ayuda a curar el polímero termoestable, luego se arrastra el material para finalmente cortarlo con las medidas preestablecidas. Otra técnica de procesamiento es el Filament Winding, igual que la anterior técnica, es necesaria una fibra continua y una matriz termoestable, la diferencia de la técnica anterior, es que la fibra impregnada de resina se enrolla con un patrón definido alrededor de un mandril que puede tener diferentes geometrías (cilíndrico, esférico o cónico), dando como resultado un producto con un alto contenido de fibra, una buena relación rigidez-peso, buena relación resistencia-peso y una calidad que no varía [4]. Además del Filament Winding y la Pultrusión, hay otra técnica de procesamiento que es manual, pero muy útil cuando se fabrican productos con geometrías complejas, y es la Hand Lay up o moldeo por contacto. Esta técnica consiste en aplicar manualmente tejidos de fibra sobre un molde para luego impregnarlos de resina termoestable, el proceso se repite hasta obtener el espesor deseado. Finalmente, está la técnica Spray Up, que consiste en la aspersión de resina ya catalizada junto con fibras cortas sobre un molde que tiene un diseño preestablecido.

Las técnicas mencionadas se aplican en Invesa S.A para la fabricación de diferentes productos entre los que destacan postes, crucetas, tanques y aisladores eléctricos. Como en toda industria se generan residuos por diversos motivos, como productos no conformes, secciones de corte sobrantes y límite de la vida útil de algunas piezas. Por esto se hace necesario pensar no solo en el reciclaje,

sino en la reincorporación a un producto o aplicación, estando acorde con uno de los lemas de la compañía que es la sostenibilidad.

Mediante este trabajo se pretende estudiar el comportamiento los residuos de PRFV al adicionarse en diferentes porcentajes a una matriz termoestable para que estos actúen como cargas en el material consolidado.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cuando la tasa de producción de una empresa aumenta, la cantidad de residuos procedentes de esta producción también lo hace. Dado que eliminar estos desechos como usualmente se acostumbra (incineración y vertederos) es cada vez más restrictivo, es necesario que las empresas comiencen a adoptar prácticas sostenibles[5]. Con el fin de aportar ideas a este problema que enfrenta la industria de los materiales compuestos, en especial el poliéster con refuerzo de fibra de vidrio (PRFV), se busca reciclar y reincorporar dichos residuos a la producción que tiene la compañía Invesa S.A., evaluando las propiedades del material obtenido, mediante algunos ensayos de laboratorio que determinarán la idoneidad o no del mismo.

## III. OBJETIVOS

### *3.1 Objetivo general*

Incorporar y evaluar residuos de PRFV en una matriz termoestable de poliéster para la compañía Invesa S.A.

### *3.2 Objetivos específicos*

- Identificar los tipos de residuos que genera Invesa S.A. en la línea que corresponde a materiales compuestos.
- Caracterizar el material compuesto de residuo de PRFV con el fin de analizar los resultados obtenidos.
- Evaluar la viabilidad de la incorporación de residuos de PRFV en la compañía Invesa S.A.

## IV. MARCO TEÓRICO

La sostenibilidad en la industria está pasando de ser algo voluntario a ser reglamentada por el gobierno. Dentro del marco de la sostenibilidad hay una meta que pretende basura cero, pero no con la intención de reducir la generación de residuos sino con el fin de aprovechar los residuos dentro de la cadena productiva de una compañía y reintroducirlos al ciclo productivo de la misma; este concepto es llamado economía circular.

Con el fin de cumplir con los estándares ambientales y de sostenibilidad muchas empresas buscan certificarse, una de las certificaciones es la ISO 14001 [6], por medio de la cual se demuestra la capacidad que posee una empresa para la mejora continua en la protección del medio ambiente.

Una de las formas de proteger el medio ambiente en la industria de los materiales compuestos es mediante el reciclaje y reincorporación de residuos a la cadena productiva de la compañía, pero para ello es necesario conocer y definir los procesos prácticos y teóricos de lo que se hace, y los medios con los que es posible realizar esta acción.

### *4.1 Materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio*

Este material compuesto está conformado por una matriz que tiene una función muy importante, aporta elasticidad, resistencia química y térmica y una característica muy significativa actualmente que es el bajo peso. Hay diferentes clases de matrices, las más comunes que abarcan un 75% del total son las resinas de poliéster, y dentro de este grupo las que se más se utilizan son las ortoftálicas, las isoftálicas y las bisfenólicas. Las funciones de la matriz se centran en fijar la fibra de acuerdo con la geometría preestablecida, transmitir los esfuerzos a las fibras, proteger las fibras cuando se someten a compresión y actuar como barrera de los agentes externos.

En cuanto al refuerzo, este se presenta comúnmente en fibras cortas o largas, según lo requiera el material o las prestaciones para las que está diseñado. Las fibras más utilizadas son las de vidrio por su excelente adherencia fibra-matriz; resistencia mecánica específica superior a la del acero en la dirección de la fibra; dieléctrica, tiene estabilidad dimensional, buena resistencia a los agentes químicos, de fácil procesamiento y propiedades isotrópicas [7].

#### *4.1.1 Resina poliéster*

Las resinas de poliéster, en especial las insaturadas, se han definido como productos de condensación de diácidos orgánicos y glicoles. Las insaturaciones se incorporan con el fin de

producir dobles enlaces terminales. La insaturación más común es la que es producida por el anhídrido maleico. Estas resinas tienen principalmente un poliéster lineal con diferentes cantidades de unidades insaturadas, un monómero de entrecruzamiento e inhibidores que se utilizan para evitar el entrecruzamiento. El monómero reticulante utilizado en estos casos es el estireno. Estas resinas curan por el mecanismo de radicales libres. Son varias las condiciones en las que estas resinas pueden curar, como: temperatura ambiente, luz ultravioleta o luz visible, siempre que se haya utilizado un iniciador adecuado [8].

#### *4.1.2 Refuerzo*

El refuerzo de fibras de vidrio es muy común, poseen diámetros que varían entre los 2 y los 10  $\mu\text{m}$ . Son muy utilizadas por su alta resistencia y su bajo costo. La mayoría de las fibras de vidrio están basadas en sílice con adiciones de óxido de calcio, boro, sodio, hierro y aluminio [9].

#### *4.1.3 Cargas*

Las cargas son los segundos elementos que se le adicionan en muchas ocasiones a un polímero. Generalmente son componentes particulados y lo que buscan es reducir costos. También pueden actuar como refuerzo aumentando propiedades físicas y químicas de la resina. Algunos de las cargas inorgánicas utilizadas para este fin son: polvo de mica, talco industrial, fibra de vidrio y fibra de cuarzo [10].

#### *4.1.4 Iniciadores y promotores*

El iniciador es el catalizador de la reacción y no forma parte del producto. En las resinas de poliéster el iniciador desaparece durante la reacción. La resina reacciona por medio de radicales libres, el iniciador lo que hace es descomponerse en radicales libres iniciando el proceso de enlace cruzado de las moléculas de poliéster con las de estireno. El iniciador más común para estos casos es el peróxido de metil etil cetona MEKP [8].

Los promotores son sales metálicas o compuestos de amina que reaccionan directamente con el iniciador ocasionando la formación de radicales libres e iniciando la polimerización en cascada y enlazando de forma cruzada el polímero y el monómero. El más común es el octoato de cobalto.

## 4.2 Métodos de reciclaje de PRFV

### 4.2.1 Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico utiliza métodos de trituración y molienda para lograr reducir el tamaño de partícula en forma de polvo o fibras para su utilización como relleno o refuerzo secundario. La desventaja de este proceso de recuperación es que se pierden propiedades mecánicas de la fibra y no es posible recuperar la fibra en perfecto estado. Las longitudes máximas de fibras de carbono reportadas son a lo sumo 20mm [11].

### 4.2.2 Reciclaje térmico

En el reciclaje pirolítico, los residuos se descomponen en una atmosfera en ausencia de oxígeno con o sin catalizadores. Este proceso descompone la matriz en líquidos-aceites, gases y sólidos de menor peso molecular. Este proceso da como resultado unas fibras libres y limpias de matriz, siempre y cuando se haga bien el proceso, y una longitud de fibras entre 6 y 60mm. Los daños más comunes por un mal proceso van desde daños físicos que afectan la superficie de la fibra hasta daños mecánicos, es decir disminución en los módulos de tracción y flexión [11].

### 4.2.3 Reciclaje oxidativo

Al contrario del reciclaje térmico, aquí sí hay presencia del oxígeno. Cuando se da el proceso de calentamiento, a diferencia de otros procesos que llegan hasta los 700°C, en el proceso oxidativo la temperatura puede llegar a los 600°C, esto ayuda a degradar y acelerar la degradación químico-térmica el carbón pirolítico a temperaturas más bajas y en tiempos más cortos [11].

### 4.2.4 Reciclaje electroquímico

La matriz de resina en este método se elimina de la superficie de la fibra mediante energía eléctrica. El compuesto se deposita en una solución generalmente de cloruro de sodio NaCl. Aquí el material compuesto se comporta como ánodo lo que hace que la matriz se electrolice durante el proceso del reciclaje. El proceso puede tardarse hasta 24 días incluyendo 3 días para el secado de las fibras. Este método es de bajo costo y el medio químico se puede reutilizar luego de filtrado. La desventaja de este método es que las fibras podrían quedar con impurezas y el tiempo extenso del proceso [12].

## V. METODOLOGÍA

### *5.1 Identificación de residuos de materiales compuestos*

Se visitó a diario y por dos semanas la planta de producción de materiales compuestos, con el fin de comprender los procesos que se llevan a cabo. Esto permitió tener un conocimiento global del procesamiento, del producto y finalmente de los residuos que genera Invesa S.A.

Las primeras visitas se centraron en la planta de postes donde se tuvo especial cuidado en el área de corte, pulido y pruebas de resistencia a la flexión. Luego se visitó planta tanques, en esta visita se tuvo acompañamiento de un operario que fue el encargado de guiar y explicar las técnicas implementadas en la elaboración de tanques y evaluación de calidad de estos.

Finalmente se visitó el área donde se depositan los residuos que generan ambas plantas y se realizó una inspección visual y fotográfica del sitio.

### *5.2 Muestras*

Las muestras (resina, refuerzos, residuo de PRFV) se solicitaron en planta postes, es decir, la resina con que se trabajó es propia al proceso de Filament Winding de planta postes, e inicialmente estuvo en estado puro (sin promotor y sin cargas). Se solicitaron aproximadamente de 12 a 15Kg de resina Invepol 901 pura, 3Kg de cargas y 3Kg de residuo de PRFV proveniente del área de corte y pulido de planta postes. Obtenido el aval de estos productos, se reclamaron al área encargada para su posterior marcado y traslado.

#### *5.2.1 Caracterización muestras*

Los residuos de PRFV tuvieron granulometrías diferentes inherentes al proceso de pulido, y es necesario tener un conocimiento mínimo del tamaño de partícula, por lo cual se hizo un tamizado manual con dos tamices (números 20 y 30 con tamaños de malla de 850 y 600  $\mu\text{m}$  respectivamente) de la marca Videlab disponibles en el laboratorio de calidad. Inicialmente el residuo de PRFV se homogenizó rigurosamente y se hizo una selección de la muestra por la técnica de cono y cuarteo [13]. Obtenido por lo menos 500g de muestra, se tamizaron para conocer el tamaño de partícula estimado de este insumo.

La resina de se caracterizó por medio de tres pruebas. La primera, es la viscosidad, se midió con un equipo Brookfield RVDVE. Para medir este parámetro se recolectaron 200g de resina en un



recipiente plástico medidos en una balanza Adam. Como paso siguiente se incrementó la temperatura de la resina hasta los 25°C que es la temperatura estándar para este tipo de pruebas. Este tipo de equipo tiene dos parámetros a programar antes de iniciar la prueba, el número de la aguja que para esta clase de resina es la número 3, y la velocidad que es 100RPM. Además, para saber el índice tixotrópico se hicieron dos mediciones más a 2RPM y a 20RPM con la misma aguja. Los resultados de esta prueba se compararon con los estándares de calidad que maneja la empresa. Otra prueba realizada fue la medición del porcentaje de sólidos, para esto se tomaron tres muestras pesadas en una balanza analítica Sartorius PRACTUM 513. Las muestras se sometieron a una temperatura de 110°C en una estufa de secado marca Memmer durante media hora. Luego se pesaron de nuevo y se calculó el porcentaje de sólidos en la resina mediante la siguiente ecuación:

$$\%sólidos = \frac{(P_2 - T)}{P_1 - T} * 100 \quad (1)$$

T es el peso del recipiente en el cual se depositó la resina, P1 es el peso de la muestra más el recipiente y P2 es el peso del recipiente y la muestra luego del calentamiento. Finalmente, los resultados se promediaron entre sí.

Otra prueba, es el tiempo de gel de la resina, que es un parámetro de calidad en la empresa, para ello se pesaron 100g en un recipiente plástico, se añadió una cantidad indicada de promotor y de catalizador medidos en balanza analítica y previamente atemperados a 25 °C. La mezcla se agitó vigorosamente durante un minuto al mismo tiempo que se cronometró (el cronómetro iniciará cuando se adicione el porcentaje calculado de iniciador). Luego, se monitoreó la temperatura hasta que la viscosidad fue tan alta que la resina no fluyó, en ese instante se tomó el tiempo y la temperatura que registra la reacción. Para complementar la prueba se registró el tiempo exotérmico (tiempo que tarda la reacción en alcanzar su temperatura máxima, tomando como punto de partida el tiempo de gel) y la temperatura máxima que alcanzó la reacción.

### *5.3 Construcción probetas y adiciones de residuo de PRFV*

La construcción de probetas se hizo de acuerdo con el método planteado por la norma ASTM D790 en el caso de flexión y para deflexión bajo carga se hizo según la norma ASTM D648 [14][15]. Se contó con refuerzos en partículas y residuos de PRFV. Se hicieron 6 probetas por cada variación de composición. La geometría del molde es rectangular y tuvo unas medidas de 30cm largo X 2,5cm ancho X 10mm profundidad para flexión y para HDT se tuvo unas medidas de .12mm X 12mm X 122mm de largo.

Las composiciones se hicieron inicialmente de la siguiente manera:

M1: Resina Invepol 901

M2: Resina Invepol 901 + refuerzo particulado

M3: Resina Invepol 901 + residuo de PRFV

M4: Resina Invepol 901 + refuerzo particulado+ residuo de PRFV

Se prepararon inicialmente 4 Kg de resina con el promotor. Una vez mezclado completamente el promotor se pesaron 100g de resina y se adicionaron los refuerzos correspondientes a M1, M2, M3 o M4 según corresponda. Se agitó manualmente hasta lograr una buena dispersión y se procedió a adicionar el catalizador medido en balanza analítica. Se agitó nuevamente hasta homogenizar completamente el catalizador y se depositó la resina en los moldes rectangulares hasta completar las 6 probetas por cada composición.

Para cada una de las composiciones mencionadas anteriormente se fabricó una probeta circular para evaluar apariencia y dureza.

#### *5.4 Pruebas de flexión*

Se probaron 4 probetas por cada composición mediante flexión y así logró evaluar las siguientes propiedades:

- Carga máxima [N]
- Deflexión máxima [mm]
- Esfuerzo máximo a flexión [MPa]

#### *5.5 Pruebas de deflexión bajo carga (HDT)*

Al igual que en flexión, se probaron 4 probetas por cada una de las composiciones mencionadas anteriormente, para conocer el comportamiento que tuvieron las muestras al ser sometidas a la temperatura. De esta forma, se obtuvieron los resultados de temperatura de falla y la deflexión promedio de cada probeta.

#### *5.6 Prueba de adhesión*

Se realizó la prueba de adhesión con la muestra M1 correspondiente al 10% de residuo de PRFV. La preparación de la resina usada para estas pruebas fue la misma que para las pruebas de flexión y HDT. Inicialmente se preparó un vidrio que sirvió de base para el laminado. El vidrio se humectó

con cera para poder desmoldar el laminado curado, en este proceso se esparce la cera con un paño y luego se retira el exceso con un paño limpio; este proceso se repite tres veces. Seguidamente se procede a cortar una tela de fibra de vidrio tipo Mat de una dimensión en la que se respeten los  $10\text{cm}^2$ . En este caso se cortó la fibra con dimensiones de  $40\text{cm} \times 12\text{cm}$ . Se necesitaron 4 telas para realizar 2 laminados de dos telas Mat cada uno. La proporción de resina/Mat se hizo con 70% resina y 30% fibra de vidrio en peso. Cuando se tienen las cantidades apropiadas de los componentes se inicia la humectación del vidrio con la resina y se deposita la primera capa de Mat, esta se vuelve a humectar con resina utilizando una brocha, cuando esté bien humectada se pasa un rodillo sobre la superficie toda la superficie para esparcir toda la resina y evitar que queden burbujas de aire en el laminado. Seguido a este procedimiento se adiciona la última capa Mat y al igual que la anterior se humecta con resina, se pasa el rodillo sobre la superficie del laminado, y el conjunto se deja curar.

Una vez curado el primer laminado se hace otro laminado con las mismas características del anterior de forma tal que una parte de  $10\text{cm}^2$  quede encima del primero, y una vez terminado se deja curar. Cuando se ha curado el conjunto se toma un extremo del laminado que está en la parte superior y se despega del vidrio encerado hasta la parte donde está la unión entre ambos laminados. Una vez llegado a ese punto se realiza una fuerza manual perpendicular a longitud del rectángulo que forman los laminados. La prueba se considera exitosa si el desgarre no ocurre en la interfase de la cara posterior del primer laminado e inferior del segundo.

### *5.7 Índice de acidez*

Para lograr medir el índice de acidez residual que hay en la resina de poliéster (muestra M1) se pesó de 0,5g a 1g de resina. Se registró el peso exacto para los cálculos posteriores. Luego, se adicionó solvente neutro a la resina en una cantidad de 50ml, y con un agitador magnético se agitaron ambos compuestos químicos. Posteriormente, se adicionaron 5 gotas de fenolftaleína que fue el indicador. Para realizar la titulación se dispuso de una pipeta volumétrica con una base que se adicionó lentamente a la mezcla hasta obtener un color violeta. Una vez llegado al punto exacto, se registró el volumen gastado de base para luego, mediante la ecuación 2, realizar el cálculo de índice de acidez.

### *5.8 Viabilidad*

Para saber si la propuesta que surgirá a partir de este proceso es viable para la compañía, es necesario hacer una ficha comparativa con el estándar de calidad que maneja la empresa y así poder determinar si el producto o aplicación es apto.

## VI. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 Identificación de residuos de PRFV

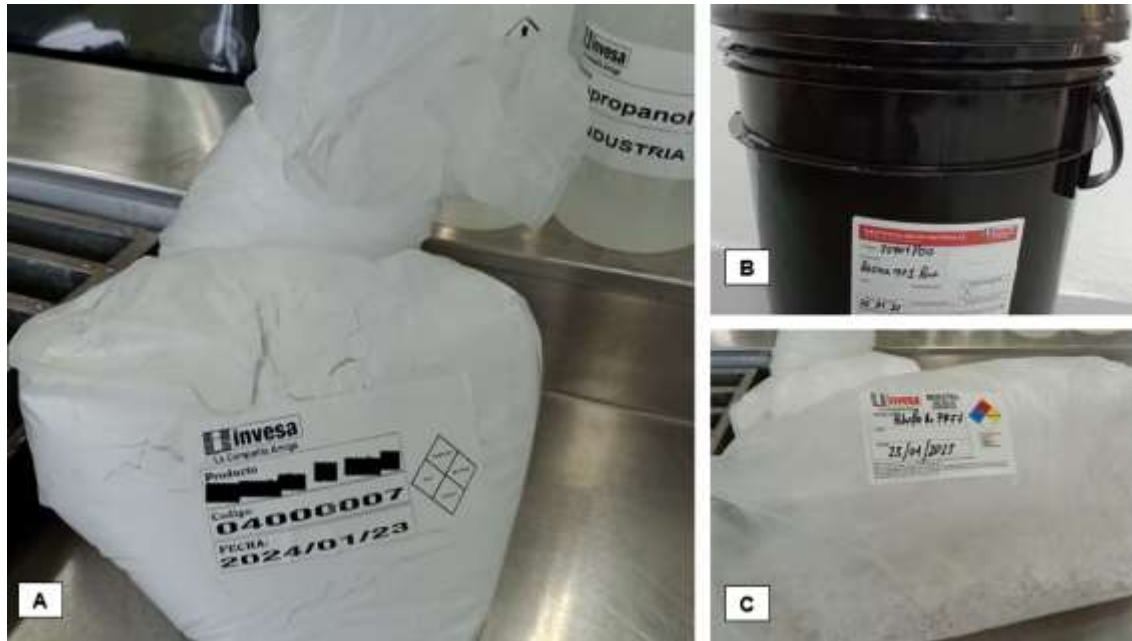


**Figura 1.** Figura 1A, residuos generados por el área de materiales compuestos. Figuras 1B y 1C, residuos generados por el área de postes.

En la Figura 1 se aprecia un pequeño porcentaje de los residuos generados en la unidad de negocio FIBRATORE. En el tiempo que se dispuso para hacer visitas a las plantas de procesamiento se identificó que los residuos se generan por: rechazo de productos por calidad de la empresa, productos intermedios, recortes, perforaciones y pulidos, productos no conformes, pilotos y ensayos destructivos. Esta combinación hace que el volumen de residuos de PRFV sea significativo. Entre 3000Kg y 4000 Kg de residuos de PRFV, equivalentes al 7% de la producción de la compañía, se convierten en desechos cada mes.

### 6.2 Materias primas utilizadas en las probetas de resina de poliéster

Para la creación de las probetas se utilizaron tres materias primas: resina de poliéster, insumo que se utiliza en el área de postes por lo que se hizo el trámite para adquirir 10Kg, de los cuales se obtuvieron 8Kg que fueron suficientes para las pruebas que se pretendían hacer; 3 Kg de refuerzo particulado que usualmente se utilizan en el proceso para hacer postes y 3Kg de polvo de PRFV como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Figura 2A, refuerzo particulado empleado en probetas. Figura 2B, Resina de poliéster. Figura 2C, polvo de PRFV.

### 6.3 Caracterización

#### 6.3.1 Tamizaje del polvo de residuo de PRFV

Se utilizaron dos tamices #20 y #30 con aberturas de 850  $\mu\text{m}$  y 600  $\mu\text{m}$  respectivamente, obteniéndose una distribución porcentual como lo muestra la Tabla 1. A pesar de que la distribución de tamaños tiene una tendencia a partículas mayor o igual a 850  $\mu\text{m}$ , y otra tendencia a partículas más finas con tamaños menores a 600  $\mu\text{m}$ , se trabajó por ser de interés el comportamiento que tendría esta distribución en las probetas que se someterían a flexión.

**Tabla 1.** Distribución porcentual del residuo de PRFV

Tamaño de partículas [ $\mu\text{m}$ ]	Distribución porcentual
850	41,16
600	18,24
<600	40,60

#### 6.3.2 Viscosidades, tiempos de gel, tiempos y temperaturas de exotermia

**Tabla 2.** Parámetros encontrados en las muestras con resina pura, refuerzos particulados y con residuo de PRFV.

Muestras	Tiempo de gel [s]	Temperatura [°C]	Tiempo de exotermia [s]	Temperatura [°C]	Viscosidad [Cp]
M1	2760	30	740	167	583
M2	3315	31	775	164	700
M3	32880	31	650	168	810
M4	3050	31	550	167	720

Cuando se inició la caracterización de la materia prima se hizo un control de calidad para saber si la resina cumplía con los estándares de la compañía. Uno de ellos es el porcentaje de sólidos, que cuantifica la cantidad de resina mezclada con estireno. El resultado de esta prueba dio un porcentaje de sólidos de 59,79% cumpliendo así este criterio de calidad. De igual modo, se chequeó la viscosidad y el índice tixotrópico. La viscosidad, como se refleja en la Tabla 2, para M1, dio un resultado de 583 Cp y el índice tixotrópico asociado fue de 3.1, ambos parámetros cumplieron con los criterios preestablecidos.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 2, la tendencia de la viscosidad es a aumentar cuando se adicionan ya sea el refuerzo particulado o el residuo de PRFV. En el caso de la muestra M3 (resina con residuo de PRFV) la viscosidad presentó su pico más alto, es decir, que las adiciones de sólo residuo tendieron a afectar en gran manera este parámetro y como consecuencia su tixotropía.

En cuanto a las temperaturas para los tiempos de gel y los picos exotérmicos, estos no presentaron una variación significativa con la adición de refuerzo y residuos de PRFV. Los tiempos de gel sí presentaron una variación significativa. Con la adición de refuerzos particulados el tiempo de gel se elevó un 16,74%; lo mismo ocurrió con la muestra M4, que es una combinación de refuerzos y residuos de PRFV, donde los tiempos de gel se elevaron un 9,51%. Pero cuando la muestra contenía solo residuo de PRFV el tiempo de gel se acortó.

Una posible explicación al comportamiento de las muestras M2 y M4 es que los residuos de PRFV tuvieran trazas del iniciador que no alcanzaron a reaccionar, y estos probablemente actuaron como catalizadores en el nuevo material. Los tiempos de exotermia en las muestras presentaron una tendencia similar a los tiempos de gel y también mostraron tiempos más cortos cuando las muestras contenían solo el residuo de PRFV.

A la luz de estos resultados se decide comprobar si en realidad el tiempo de gel se acorta en la resina con la adición de PRFV. Teniendo como base que una resina de poliéster se da por la reacción de un ácido tereftálico y un glicol y a medida que la reacción avanza estos compuestos se van consumiendo, es posible afirmar que la acidez residual en la resina va menguando en el tiempo. Con el fin de comprobar la afirmación anterior se midió el índice de acidez, tomando como referencia 200g de resina de poliéster preparada (ya mezclada con el promotor) y se midió la acidez inicial de la muestra. Una vez obtenido este dato, se le adicionó 10% en peso del residuo de PRFV, para comprobar si la acidez residual en la muestra cambiaba en el tiempo.

Para medir el índice de acidez se tomó como referencia la Ecuación 2

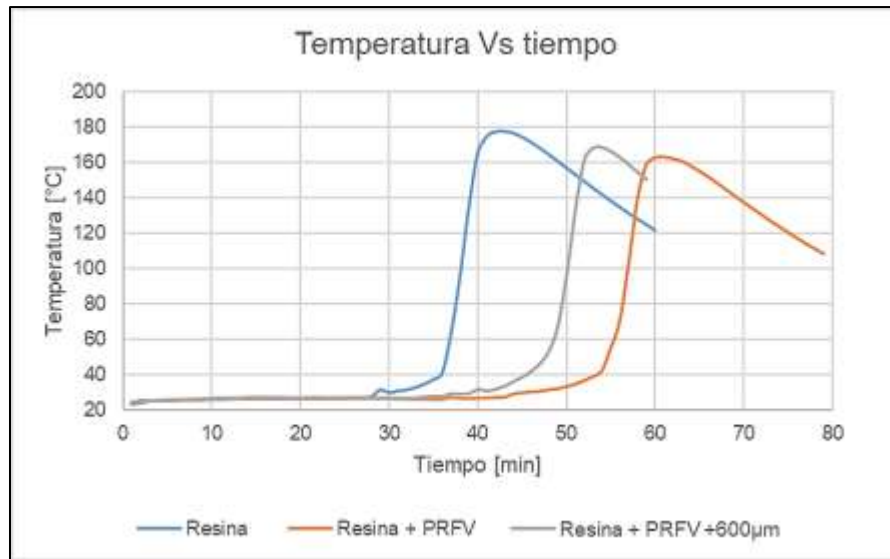
$$I. acidez = \frac{V_{base} * Concentración\ base * Peso\ molecular\ base}{Peso\ de\ la\ muestra\ sólida} \quad (2)$$

Dónde  $V_{base}$  es la cantidad volumétrica de base utilizada en la titulación realizada. Como la resina no era sólida, sino diluida en estireno se debió calcular la cantidad de sólidos experimentalmente para multiplicar esa fracción con el peso de la muestra.



**Figura 3.** Índice de acidez medido por medio de titulación a la resina de poliéster con y sin residuo de PRFV.





**Figura 4.** Comportamiento de la resina de poliéster sin residuo. Resina con PRFV de tamaño menor a los 600  $\mu\text{m}$  y resina con PRFV de distribución granulométrica entre 600  $\mu\text{m}$  y 850  $\mu\text{m}$ .

La Figura 4 muestra el comportamiento que tuvieron las tres muestras analizadas. La muestra denominada Resina hace referencia a la muestra que no contiene residuo de PRFV, esta tuvo un tiempo de gel de 29':10''. Las muestras denominadas Resina + PRFV (R1) y Resina + PRFV con tamaño menor o igual a los 600 $\mu\text{m}$  (R2) tuvieron tiempos de gel de 47':00'' y 37':40'' respectivamente. En un principio se esperaba que los tiempos de gel disminuyeran al adicionar el residuo de PRFV, ya que estos poseen pequeñas cantidades de iniciador que no alcanzaron a reaccionar, pero el comportamiento fue opuesto al esperado.

La muestra R1 tuvo un tiempo de contacto con el PRFV de 8 días hasta la medición del tiempo de gel; dado el resultado anterior, se decidió realizar una segunda prueba utilizando el mismo porcentaje de PRFV, pero con un tamaño más fino, para descartar si el tamaño tenía incidencia en esta prueba, sin embargo, el resultado de R2 mostró un comportamiento similar a R1, a pesar de que se midió el tiempo de gel al segundo día de prepararse la resina.

Otro parámetro que se vio afectado en el tiempo fue la viscosidad como se reportó anteriormente en la Tabla 2. Se midió la viscosidad de R2 tan pronto se preparó la resina, obteniendo un resultado de 870Cp. Al día siguiente se volvió a medir y el resultado fue un 119% mayor al inicial.

Con los tiempos de gel mayores y con las viscosidades altas se descarta, en primera instancia, la influencia del tamaño de grano en las muestras. La medición de tiempos de gel en tiempos largos y cortos (tiempo de espera para realizar los tiempos de gel), pero con resultados similares, permite afirmar que un compuesto presente en la resina se estuvo evaporando; este compuesto llamado

estireno es el responsable de darle una viscosidad idónea a la resina y al evaporarse hace que la resina eleve su viscosidad. Además, este compuesto puede reaccionar formando cadenas dentro la red tridimensional del poliéster, por este motivo, cuando se hizo la prueba con R2, al segundo día de prepararse, el tiempo de gel fue largo, comparado con la resina sin PRFV; pero un 21.27% más corto que la resina R1 que tuvo 8 días de evaporación de estireno. En general, para el caso de la resina Invepol 901 los residuos de PRFV no hacen que los tiempos de gel se acorten.

De los resultados de las titulaciones se obtuvieron los datos consignados en la Tabla 3. De la resina R1 se obtuvo, en un inicio, un índice de acidez de 48,61. Ya finalizando el día 8 este parámetro se había reducido en 14%. Haciendo este mismo procedimiento para el caso de la muestra R2, se obtuvo una reducción del 22,14%. Estos resultados corroboraron la teoría de que cierta cantidad del ácido contenido en la resina reacciona con el PRFV y que el tamaño de partícula es realmente importante ya que hubo una diferencia de 8,14% entre R1 y R2 en el resultado de índice de acidez.

**Tabla 3.** Comportamiento en el tiempo del índice de acidez medidos mediante titulación a la resina de poliéster estudiada.

Titulaciones realizadas		
Día	índice de acidez M3	Índice de acidez resina + residuos de PRFV menor a 600 $\mu\text{m}$
0	48,61	48,61
1	---	36,88
2	---	37,18
3	43,00	---
5	---	37,85
6	41,17	---
8	41,75	---

#### 6.4 Medición de dureza y apariencia en probetas

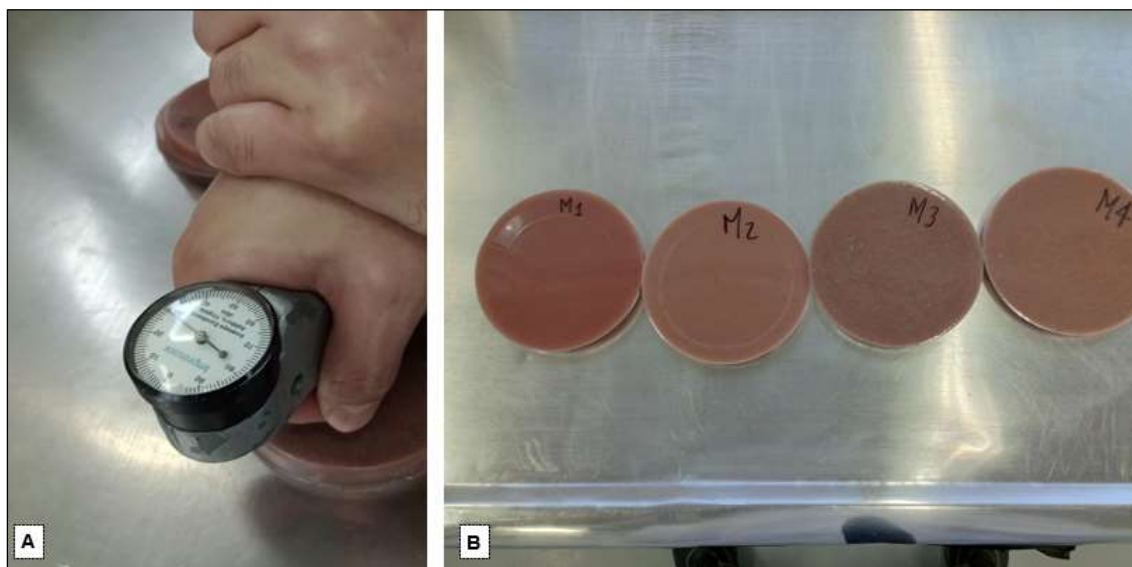
Se produjeron 4 probetas con la misma resina que se venía trabajando, para verificar la apariencia y la dureza en las muestras M1, M2, M3 y M4.

**Tabla 4.** Dureza promedio tomada de las muestras estudiadas.

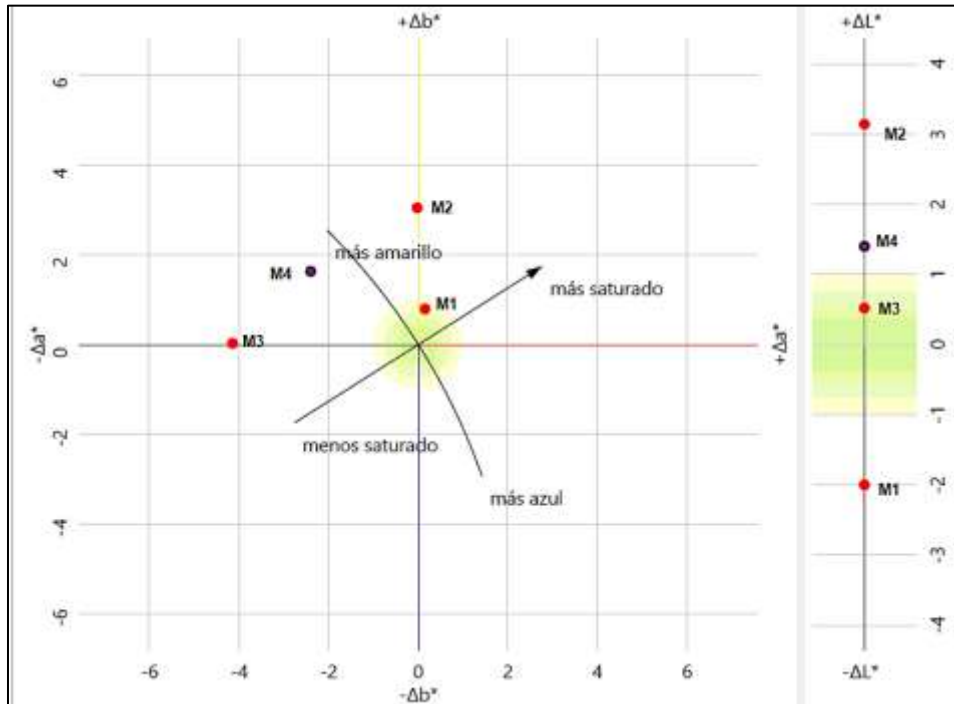
<b>Muestra</b>	<b>Dureza Barcol</b>
M1	40,9
M2	44,5
M3	42,9
M4	44,5

Como se aprecia en la Tabla 4 la dureza posee una leve tendencia a incrementar con la adición de refuerzos y residuos de PRFV, aunque se podría decir que este parámetro no se afecta notablemente. El resultado de dureza cumplió con los estándares de calidad exigidos por la empresa ya que estos deben estar por encima de 30 unidades Barcol.

En cuanto a la apariencia, hubo un cambio de color relacionado con la adición de refuerzo, para el caso de la muestra M2 pasó a ser más clara ya que el refuerzo es de color blanco. Cuando se adicionó el residuo de PRFV la muestra cambió a una tonalidad más oscura (muestra M3) y se notaron algunas fibras en la probeta. Finalmente, la mezcla de refuerzo y PRFV hizo que el color se volviera más claro y las fibras se notaron a simple vista.

**Figura 5.** Medición de durezas Barcol y apariencia física de las probetas.

Para conocer la tonalidad de las muestras se utilizó el equipo Datacolor Spectro 700, que identificó la tonalidad Ocre para las tres muestras, pero con diferentes coordenadas como se puede observar en la Figura 6



**Figura 6.** Coordenadas CIE L\* A\* B\* de las muestras M1, M2, M3 y M4.

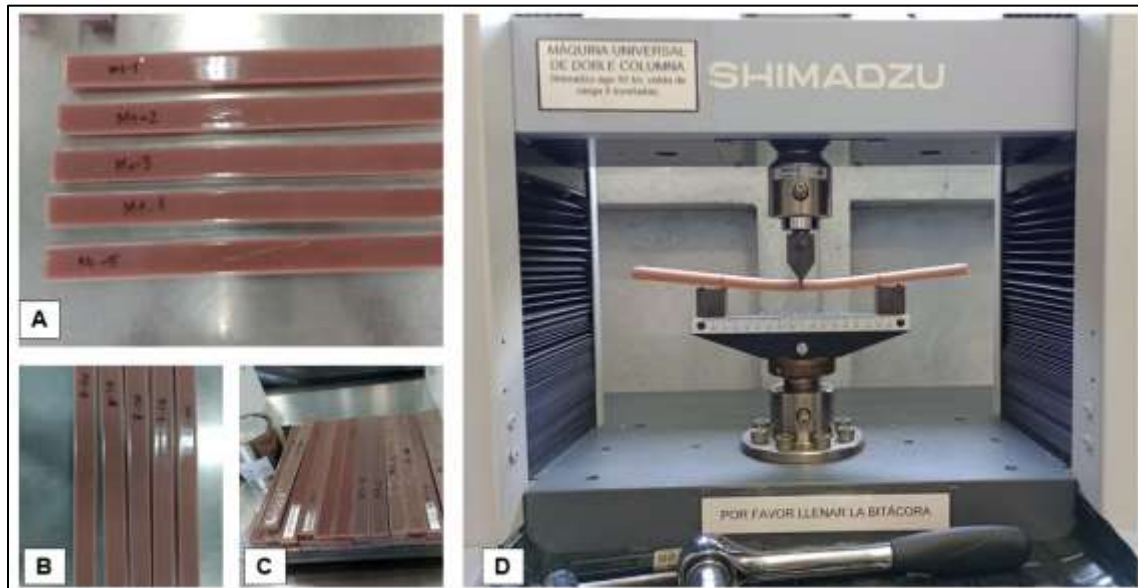
Los datos presentados de manera gráfica en la anterior Figura muestran varias coordenadas que en el caso  $\Delta L^*$  es la diferencia de luz y oscuridad,  $\Delta a^*$  es la diferencia entre rojo y verde y  $\Delta b^*$  es la diferencia entre amarillo y azul.

Si se analiza la coordenada  $\Delta L^*$  la muestra de referencia M1 y la muestra M2 presentaron resultados opuestos, acorde con lo que se decía anteriormente de forma cualitativa, donde la muestra de referencia es más oscura que la muestra M2. En cuanto a la coordenada  $\Delta b^*$  la muestra que presenta menos color amarillo es la muestra M3. Esta muestra es una de las más afectadas en su estética y color.

### 6.5 Ensayo de flexión

Para los ensayos a flexión se construyó una serie de probetas teniendo como guía la norma ASTM D790. En total, fueron 5 probetas, sin embargo, debido al presupuesto para realizar las pruebas, se ensayaron 4 probetas para 4 composiciones diferentes denominadas M1, M2, M3 y M4. El orden

de adición de los componentes a la resina fue el siguiente: primero se adicionó el promotor el cual se homogenizó completamente en la resina; seguido se adicionaron los refuerzos particulados o el residuo de PRFV y finalmente se adicionó el porcentaje calculado de iniciador.



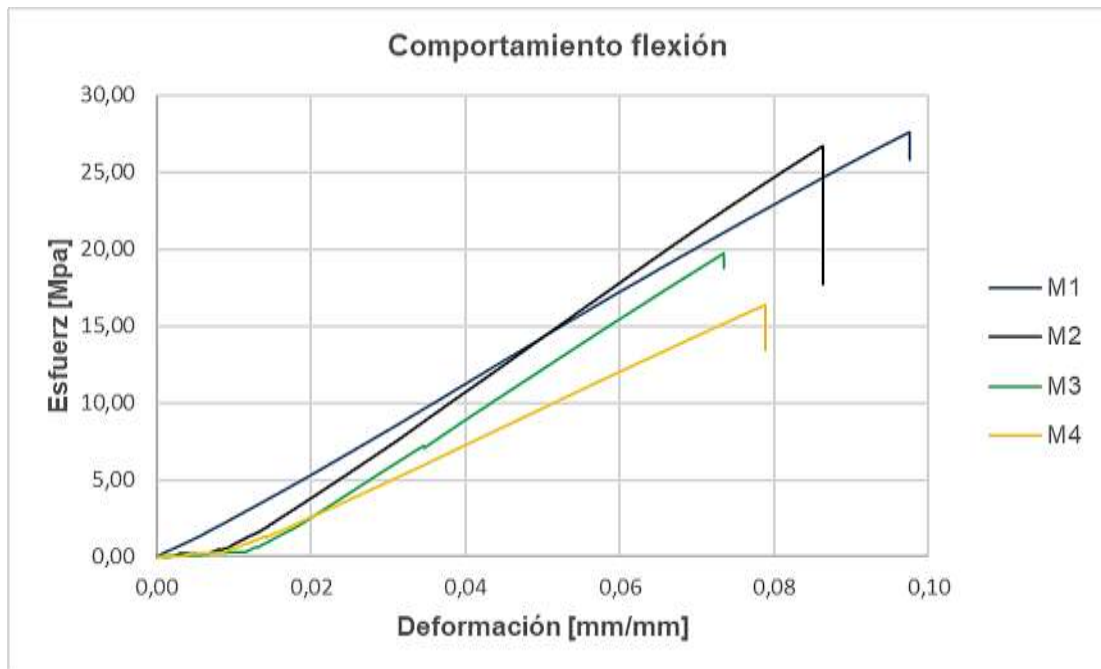
**Figura 7.** Figura 7 A, B, C probetas fabricadas para el ensayo flexión. Figura 7 D, ensayo de flexión en las probetas de poliéster mediante máquina universal Shimadzu.

Antes de realizar los ensayos de flexión en la máquina universal, se hicieron unas pruebas preliminares en la celda de carga para probetas con dimensiones superiores, con el fin saber el comportamiento mecánico de las muestras. Dichos ensayos estuvieron acordes con los resultados que se ven en la Figura 9.



**Figura 8.** Ensayo preliminar de flexión con celda de carga Dirimpex para las probetas de poliéster fabricadas

El comportamiento de las diferentes probetas se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 9.** Comportamiento esfuerzo versus deformación unitaria de las muestras M1, M2, M3 y M4 sometidas a flexión.

Los resultados que se muestran en la Figura 9 corresponden al mejor comportamiento de las muestras M1, M2, M3 y M4 y fueron los resultados esperados. Las muestras que contenían residuos de PRFV (muestras M3 y M4) presentaron los valores más bajos en la deformación y esfuerzo. Tomando como referencia la muestra M1, que es solo resina, el esfuerzo máximo fue de 27.61MPas. Haciendo la comparación con la muestra M3, que tuvo un esfuerzo máximo de 19.74 MPas, hay una pérdida de propiedades considerable, alrededor del 28.50%. Y si se compara con la muestra M4, que tuvo un esfuerzo máximo de 16.38 MPas, la diferencia con la muestra de referencia asciende al 40.67%. De estos resultados se puede decir que la combinación de carga con residuo de PRFV hace que las propiedades del material decaigan considerablemente; todo esto teniendo en cuenta la granulometría que posee el residuo de PRFV mencionado en la Tabla 1. Otro parámetro importante es la deflexión máxima, en el caso de la muestra M1 la probeta obtuvo una deflexión máxima de 9,63mm. Al hacer la comparación con las demás muestras, la muestra M2 obtuvo un 14,95% menos deflexión; para la muestra M3 y M4 se obtuvo un 26,27% y un 29,59% menos deflexión que la muestra de referencia.

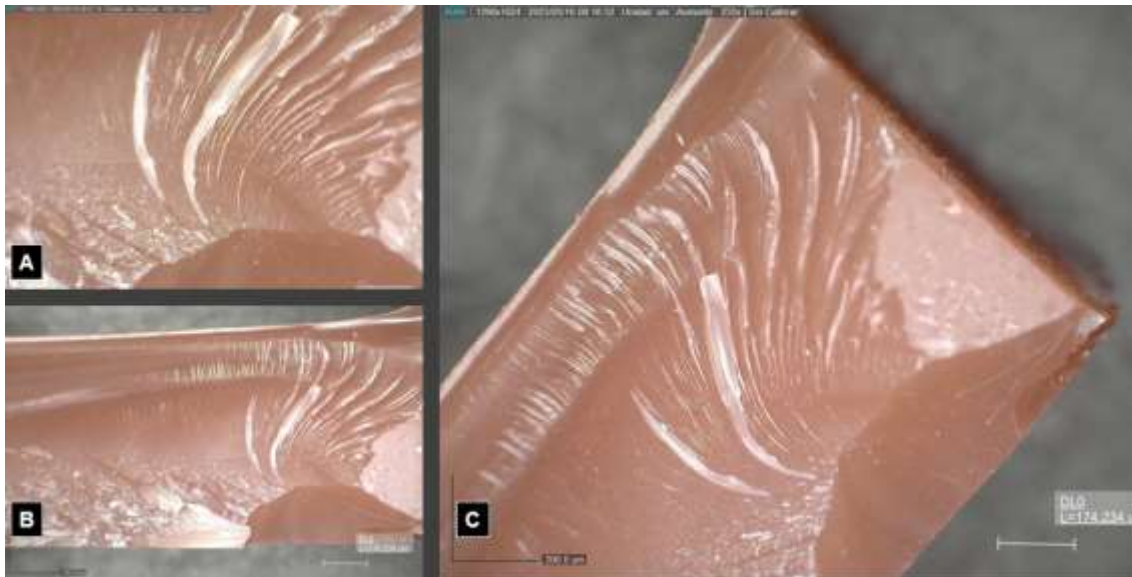


En los ensayos de flexión que involucran metales o materiales de carácter dúctil el esfuerzo-deformación pasan por un máximo, pero la falla del material no ocurre en ese punto, esta ocurre luego de que el material ha reducido su área transversal para luego fallar a un esfuerzo menor que el máximo. Lo contrario ocurre cuando el material es frágil o quebradizo, en estos casos la falla ocurre en el esfuerzo máximo. En las probetas que se muestran en la Figura 9 existe un comportamiento de carácter frágil, en cada una de ellas se llega a un máximo y justo en ese punto el material falla.

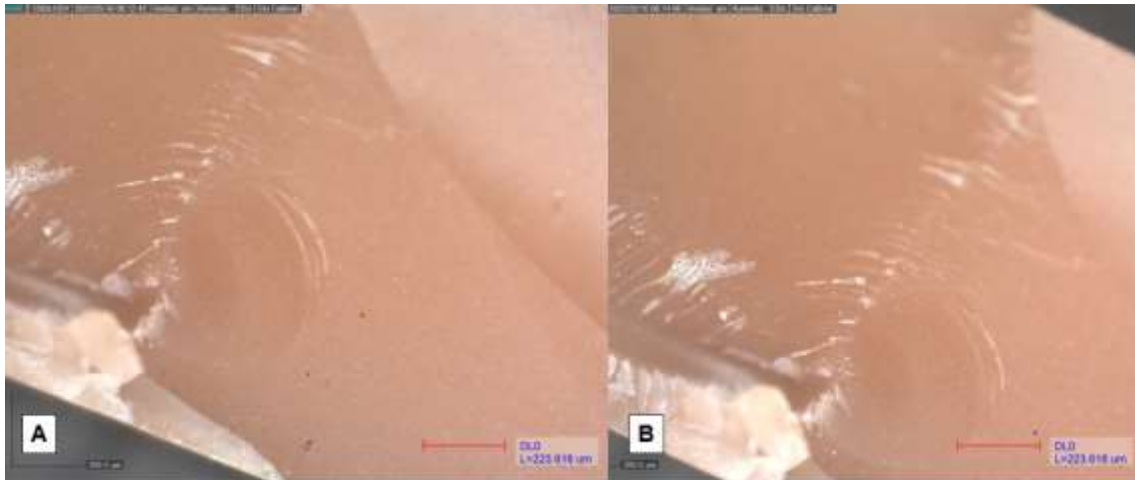
**Tabla 5.** Resultados de los ensayos de flexión en las diferentes probetas

Muestras	Esfuerzo máximo [MPas]	Deformación máxima [mm/mm]	Carga máxima [N]	Deflexión máxima [mm]
M1	27,61	0,10	531,38	9,63
M2	26,71	0,09	483,30	8,19
M3	19,74	0,07	369,20	7,10
M4	16,38	0,08	305,41	6,78

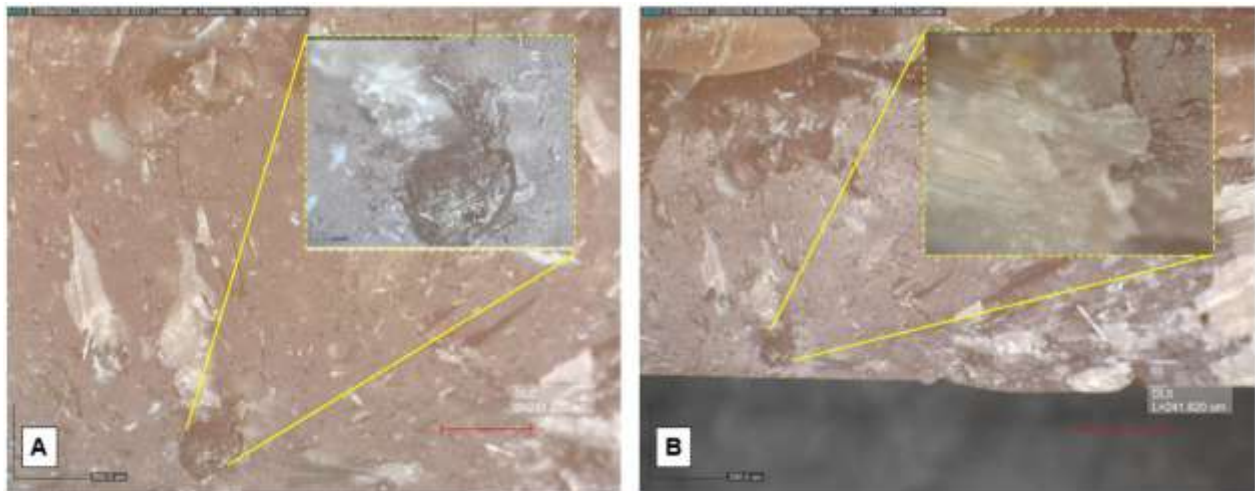
Para complementar los ensayos de flexión se tomaron varias micrografías de las diferentes probetas con el ánimo de explicar un poco más el comportamiento de los datos obtenidos en la Tabla 4 y la tendencia de las gráficas de la Figura 9.



**Figura 10.** Micrografía desde diferentes perspectivas de la probeta M1.

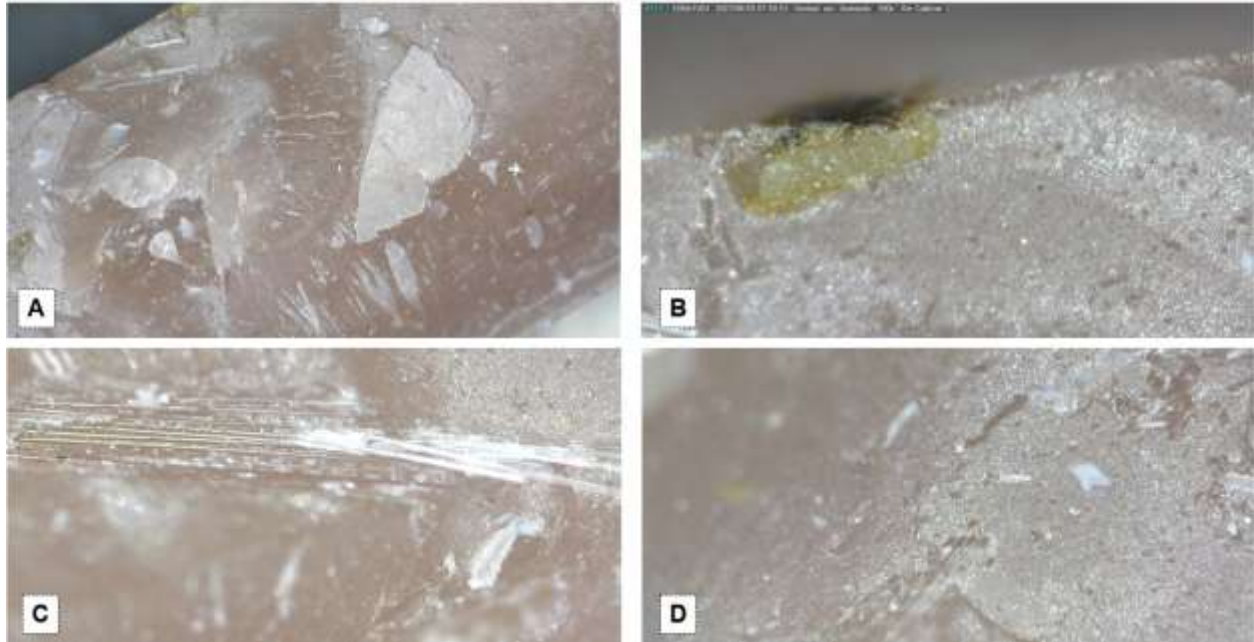


**Figura 11.** Micrografía de una de las caras donde se produjo el fallo de la probeta M2.



**Figura 12.** Zona donde se produjo la falla en la probeta M3. Figura 13A, zona de la burbuja de aire en el centro de falla. Figura 13B, Filamentos de una de las partículas del residuo de PRFV dentro de la burbuja de aire.





**Figura 13.** Figura 13A, zona de falla en la muestra. Figura 13B, impureza dentro de la zona de falla. Figura 13C, filamentos de fibra de vidrio vistos a mas aumentos en la zona de inicio de falla. Figura 13D, pequeñas zonas de tonalidad más oscura, correspondientes a burbujas de aire.

En la Figura 10 la muestra M1 presenta unas características únicas, muy similares a la de un cerámico, particularmente un vidrio. Las fracturas de un vidrio son de carácter frágil, la peculiaridad de las fracturas es que tienen una zona especular lisa cerca del origen de la falla con líneas o propagación de grietas que abarcan el resto de la superficie.

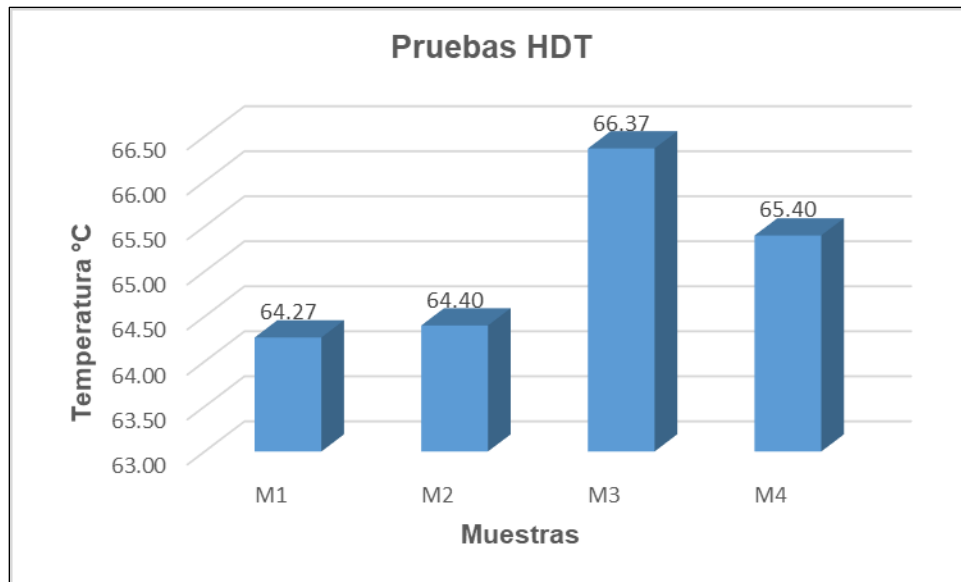
En el caso de la Figura 11, la fractura mostrada por las micrografías es de carácter frágil, pero con un comportamiento menos marcado que la muestra M1, es decir, que los refuerzos adicionales ayudan a disipar en cierta cantidad la energía de propagación de las grietas en el material.

La Figura 12 muestra un claro concentrador de esfuerzos y a partir de este se propagan las grietas, en este caso el causante fue una burbuja de aire generada por el residuo de PRFV. Haciendo un acercamiento a la parte afectada, se pueden apreciar pequeños filamentos que hacen parte de la fibra de vidrio adicionada.

Finalmente, la Figura 13, correspondiente a la muestra M4, muestra algunos concentradores de esfuerzos tales como: impurezas, burbujas de aire y pequeños fragmentos de residuos de PRFV, y mediante la combinación de todos estos factores hacen que el material falle en una zona específica.

### 6.6 Deflexión bajo carga (HDT)

Los ensayos de HDT son de suma importancia para evaluar la estabilidad del material de estudio, porque permiten comprender el comportamiento mecánico dependiente de la temperatura, ya que estas propiedades se ven influenciadas por este parámetro.



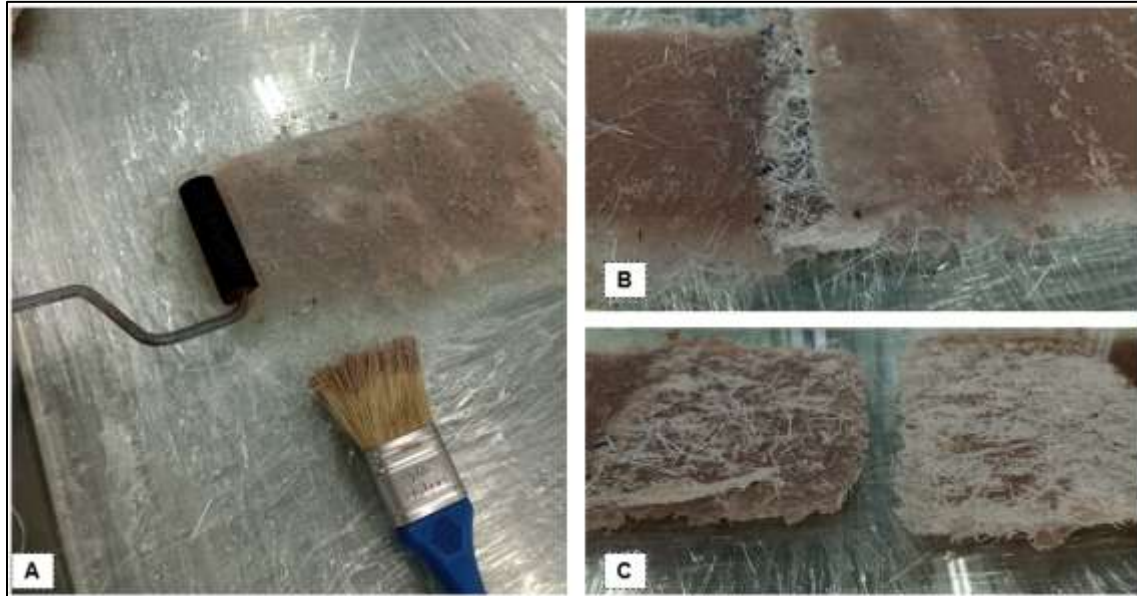
**Figura 14.** Comportamiento de las muestras M1, M2, M3 y M4 frente a una carga flexionante y la temperatura.

Las muestras que presentan mejor comportamiento frente a la prueba HDT son aquellas a las que se les adicionó el residuo de PRFV. En el caso de la muestra M3 hay una mejoría del 3,16% y en la muestra M4 se obtuvo una mejoría de 1,72%. Estos datos demuestran que cuando el material se somete a esfuerzo de flexión a altas temperaturas el residuo de PRFV en la resina es beneficioso. Cuando el material sufre un esfuerzo mecánico a una temperatura dada, la adhesión de los residuos de PRFV con la resina ayudan a disipar la energía suministrada dando como resultado un mejor desempeño mecánico como lo indican los datos de la Figura 14.

### 6.7 Ensayo de adherencia

Una forma de saber cuánto afecta la adición de residuo de PRFV a la resina de poliéster Invepol 901, es mediante una prueba cualitativa llamada ensayo de adherencia. El ensayo permitió verificar qué tanto se adhirió un laminado de dos telas tipo Mat respecto a otro laminado, con las mismas características, en un área de 10cm<sup>2</sup>. El resultado mostrado en la Figura 15 C permite inferir que la

adherencia es alta, pese a tener 10% de residuo de PRFV en la resina, puesto que cuando se hace el desgarre entre ambas telas, la falla ocurre en una sección de las telas provocando que una parte del laminado se desprenda (1 tela Mat). La prueba se considera exitosa ya que el desgarre no se efectuó en las caras o interfase donde se unieron ambos laminados.



**Figura 15.** Prueba de adherencia en resina de poliéster con 10% de residuo de PRFV. Figura 14A, laminado inicial correspondiente a 2 capas tipo Mat. Figura 14 B y C, desgarre obtenido en el área de adherencia entre un laminado y otro.

### 6.8 Viabilidad

Con el fin de conocer si las pruebas hechas a la resina con residuo de PRFV son factibles para algunas de las aplicaciones de la compañía Invesa S.A. se construyó una tabla con las pruebas hechas a la resina y de acuerdo con los resultados obtenidos se clasifican las que son válidas y las que no.

Dentro de las pruebas que no cumplieron los estándares esta el tiempo de gel, la viscosidad y el índice tixotrópico porque los resultados están por encima del umbral. En la prueba de flexión la única muestra que no estuvo dentro del estándar es la muestra M4.

**Tabla 6.** Viabilidad de incorporación de la resina con residuo de PRFV en Invesa S.A.

<b>Comparativa</b>			
	<b>Pruebas</b>	<b>Cumple</b>	<b>No cumple</b>
	Tiempo de gel		X
	Viscosidad		X
	Índice tixotrópico		X
	Adherencia (M3)	X	
Flexión	M2	X	
	M3	X	
	M4		X
	M4		X
Deflexión	M2	X	
	M3	X	
	M4	X	
	Dureza	X	
	Apariencia	X	

## VIII. CONCLUSIONES

- La adherencia no se ve afectada al adicionar residuos de PRFV a la resina de poliéster.
- Los residuos de PRFV afectan los tiempos de gel y la viscosidad a corto y largo plazo, lo que hace que se salga de los parámetros que maneja la empresa. Los tiempos de gel, al contrario de lo que se pensaba inicialmente, se hicieron más largos en el tiempo, a pesar de que el índice de acidez mostró una reducción en el periodo en que se evaluó la resina; la viscosidad aumentó por la incorporación propia del residuo y por la evaporación del estireno.
- Las propiedades mecánicas en las pruebas a flexión se vieron afectadas tanto con los refuerzos como con el residuo de PRFV. Se esperaba que con la adición de refuerzos las propiedades medidas tuviesen un rendimiento 20% menor que la muestra M1 que es la referencia, y que con el residuo de PRFV hubiese una disminución entre el 30% y 40% de lo calculado. Los resultados mostraron que para la muestra M2, que es la muestra que contiene sólo refuerzo, hubo un rendimiento 3,25% menor que M1, por lo que esta probeta entra en el rango de aceptación; lo mismo pasó con la probeta M3 con un rendimiento 28,5% menor al blanco. En cuanto a la muestra M4 (refuerzos + residuo de PRFV), no cumplió con el criterio esperado porque la disminución en el esfuerzo máximo fue mayor, aunque por poco, al 40%.
- El comportamiento de las muestras M3 y M4 frente a una carga, a una temperatura dada (entre los 64°C y los 66°C), logró un mejor desempeño ya que mostró una misma resistencia que las probetas M1 y M2 a más alta temperatura.
- La dureza por las adiciones de refuerzos o residuos de PRFV no se vieron afectadas. La apariencia sí se afectó ya que la tonalidad cambió y los residuos de PRFV fueron visibles en la superficie de las probetas estudiadas.
- De las muestras evaluadas con incorporación de residuo de PRFV la que mejor exhibió un buen comportamiento en las pruebas HDT y flexión fue la muestra M3.
- Los resultados de la Tabla 6 dan cuenta de que si bien no todos los parámetros cumplen con la normativa de calidad de la empresa Invesa S.A. la gran mayoría de pruebas hechas sí lo hacen, por lo que es posible decir que es viable incorporar residuos de PRFV en la resina de poliéster Invepol 901, pero para ello es necesario realizar más evaluaciones con los

residuos de PRFV variando el tamaño de partícula y la cantidad en la resina para obtener las propiedades y parámetros deseables.

### REFERENCIAS

- [1] A. Verma, S. Singh Chauhan, and S. Prakash Dwivedi, "Review paper on thermal expansion and tribological behavior of composite materials," *Materials Today: Proceedings*, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.11.073.
- [2] T. P. Naik, I. Singh, and A. K. Sharma, "Processing of polymer matrix composites using microwave energy: A review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 156, p. 106870, May 2022, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2022.106870.
- [3] K. Niendorf and B. Raeymaekers, "Using supervised machine learning methods to predict microfiber alignment and electrical conductivity of polymer matrix composite materials fabricated with ultrasound directed self-assembly and stereolithography," *Computational Materials Science*, vol. 206, p. 111233, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.COMMATSCI.2022.111233.
- [4] E. Vargas-Rojas, "Prescriptive comprehensive approach for the engineering of products made with composites centered on the manufacturing process and structured design methods: Review study performed on filament winding," *Composites Part B: Engineering*, vol. 243, p. 110093, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2022.110093.
- [5] Y. Wei and S. A. Hadigheh, "Cost benefit and life cycle analysis of CFRP and GFRP waste treatment methods," *Construction and Building Materials*, vol. 348, p. 128654, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128654.

- 
- [6] ICONTEC, “Certificación ISO 14001, Sistema de Gestión ambiental - Icontec.” [https://www.icontec.org/eval\\_conformidad/certificacion-iso-14001-sistema-de-gestion-ambiental/](https://www.icontec.org/eval_conformidad/certificacion-iso-14001-sistema-de-gestion-ambiental/) (accessed Feb. 05, 2023).
- [7] F. Mata, “Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles,” *Técnica Industrial*, vol. 254, pp. 43–47, 2004.
- [8] B. Janković, “The kinetic analysis of isothermal curing reaction of an unsaturated polyester resin: Estimation of the density distribution function of the apparent activation energy,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 162, no. 1, pp. 331–340, Aug. 2010, doi: 10.1016/J.CEJ.2010.05.010.
- [9] J. Daniel, T. Taborda, U. Tecnológica, D. E. Pereira, F. De Ingeniería, and M. Pereira, “Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio.” Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [10] B. S. Cardona Santiago, Peláez Daniel, “Influencia Del Tipo De Carga Sobre El Mecanizado De Materiales Compuestos De Poliéster Insaturado.,” *Revista Colombiana de Materiales*, pp. 42–47, 2013.
- [11] Y. Wei and S. A. Hadigheh, “Cost benefit and life cycle analysis of CFRP and GFRP waste treatment methods,” *Construction and Building Materials*, vol. 348, p. 128654, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128654.
- [12] H. Sun *et al.*, “Recycling of carbon fibers from carbon fiber reinforced polymer using electrochemical method,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 78, pp. 10–17, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2015.07.015.
- [13] ASTM International, “ASTM C702/C702M Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size,” *ASTM Standard Book*, vol. 04, no. Reapproved, pp. 700–703, 2018, doi: 10.1520/C0702.
- [14] ASTM INTERNATIONAL, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. D790,” *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 1–12, 2002, doi: 10.1520/D0790-17.2.
- [15] “Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position 1”, doi: 10.1520/D0648-18.

