



Procedimiento de análisis mediante ingeniería inversa en productos de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) para caracterización de materiales compuestos

Alejandro Álvarez Uribe

Informe de práctica Para optar al título de Ingeniero de Materiales

Asesor

Juan Felipe Montoya Arango, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería de Materiales
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita	Álvarez Uribe [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] A Álvarez Uribe, “Procedimiento de análisis mediante ingeniería inversa en productos de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) para caracterización de materiales compuestos”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.



Coordinador de prácticas: Diego Hernán Giraldo Vásquez

Asesor externo: Andrés Alonso Cano Rendón

Asesor interno: Juan Felipe Montoya Arango

Institución interna: Universidad de Antioquia

Institución Externa: Invesa.



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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

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.

RESUMEN

La determinación de las propiedades de un material en general se debe conocer para establecer sus aplicaciones. En procesos de ingeniería directa se considera el diseño de un producto partiendo de las materias primas, seguido de la síntesis de un material que dará lugar al producto aplicado a nivel industrial. No obstante, mediante la ingeniería inversa se determinó un procedimiento de evaluación para productos de material de PRFV partiendo del mismo, seguido de la evaluación del material compuesto y por último la evaluación de las materias primas utilizadas para su elaboración con sus correspondientes criterios de aceptación, este procedimiento es útil para la determinación de propiedades físicas, mecánicas, químicas y además una caracterización completa de los productos actualmente fabricados por Invesa

***Palabras clave:** Propiedades mecánicas, Propiedades físicas, Propiedades químicas, Caracterización, Material compuesto, Resina de poliéster, Fibra de Vidrio, PRFV, Filament Winding, Hand Lay up, Spray Up, Pultrusión.*

ABSTRACT

In general, the properties of a material must be known to establish its applications. In direct engineering process we consider the design of the product starting of the raw materials, next of the synthesis that makes a product apply in an industrial level. In the reverse engineering we found a process to evaluate composite materials and raw materials used in this kind of products with their correspondent acceptance requirements, this process is useful for determination of physics, mechanics and chemical properties and a characterization of the products fabricated by Invesa.

***Keywords:** Mechanical Properties, Physical Properties, Chemical Properties, Characterization, Composite Material, Polyester Resin, Glass Fiber, PRFV, Filament Winding, Hand Lay Up, Spray Up, Pultrusión.*

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
ABSTRACT	6
I. INTRODUCCIÓN	7
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
III. JUSTIFICACION	8
IV. OBJETIVOS	8
V. METODOLOGIA	10
VI. PROCEDIMIENTO	12
VII. RESULTADOS ESPERADOS	35
VIII. CONCLUSIONES	36
IX. REFERENCIAS	37

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Información procedimental para la evaluación de productos de PRFV	13
--	----

LISTA DE FIGURAS

Fig 1: Determinación de especificaciones para un poste. a) Espesor por ultrasonido.....	14
Fig 2: Ensayo de flexión para postes de referencia (8x510kgf). a) Montaje y b) Resultados.....	15
Fig 3: Ensayo de torque en pernos de apriete. a) Montaje y b) Resultados.....	16
Fig 4: Determinación de especificaciones para un tanque. a) Espesor.....	16
Fig 5: Ensayo de estanquidad para tanques. a) Montaje y b) Perímetro antes del llenado y c) Perímetro posterior al llenado.....	17
Fig 6: Especificaciones metrológicas para crucetas de PRFV. a) Longitud.....	18
Fig 7: Ensayo de flexión a crucetas bajo la norma ASTM D6109 [6]. a) Montaje.....	19
Fig 8: Ensayo de perno pasante bajo la norma NTC 6183 [7]. a) Montaje y b) Resultados.....	20
Fig 9: Determinación de la densidad del material compuesto. a) Volumen desplazado y b) Masa..	21
Fig 10: Ensayo de Intemperismo acelerado bajo la norma AAMA 615 [8]. a) Maquina para ensayo y b) Probetas ensayadas.....	22
Fig 11: Resistencia a la tracción para PRFV; a) Maquina universal.....	23
Fig 12: Resistencia a la deflexión térmica para PRFV; a) Maquina para ensayo de HDT, b) Probetas para ensayo.....	23
Fig 13. Ensayo de dureza Barcol en PRFV. a) Montaje y b) Resultados.....	24
Fig 14: Ensayo de propagación de la llama horizontal. a) Montaje, b) Esquema y c) Resultados...	25
Fig 15: Determinación composicional de matriz y refuerzo en el material PRFV, a) Probeta y b) Probeta calcinada.....	26
Fig 16: Determinación de ángulos de enrollado en procesos de Filament Winding. a) Cobertura y b) Hoop.....	27
Fig 17: Determinación de secciones importantes del laminado de PRFV, a) Espesor de Top Coat y b) Porosidad.....	28
Fig 18: Resistencia a la tracción para la resina de poliéster; a) Maquina universal b) Probetas para ensayo y c) Curva esfuerzo-deformación.....	29
Fig 19: Resistencia a la flexión para resina de poliéster; a) Maquina para ensayo de flexión y b) Probetas para ensayo y c) Resultados.....	30

Fig 20: Resistencia a la deflexión térmica para resina de poliéster; a) Maquina para ensayo de HDT b) probetas para ensayo.....	30
Fig 21: Dureza Barcol resina vinilester; a) Montaje y b) Resultados.....	31
Fig 22: Resistencia química resina de poliéster Iso npg; a) Montaje y b) Resultados.....	33
Fig 23: Caracterización fibra de vidrio; a) Mantas y b) Filamentos.....	33
Fig 24: Caracterización de la resina de poliéster; a) Viscosidad y b) Porcentaje de sólidos.....	34
Fig 25: Curva exotérmica resina de poliéster [Topcoat]; a) Montaje del experimento y b) Curva exotérmica.....	35
Fig 26: Caracterización de la resina de poliéster; a) Índice de acidez.....	36

I. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos actualmente hacen parte importante del desarrollo a nivel industrial, los cuales son desplegados en múltiples industrias, particularmente la compañía Fibratore, la cual hace unos años es parte de la compañía Invesa. Allí se han implementado algunos de los procesos de fabricación de materiales compuestos de PRFV como las técnicas de *Filament Winding* [1], *Hand Lay up* [1], *Pultrusión* [1] y *Spray up* [2]. Para el diseño de productos de PRFV es importante conocer su composición y configuración, con el fin de profundizar en su estructura y propiedades utilizando los conocimientos de ingeniería de materiales. La actual oscilación de precios en el mercado permite ahondar en la evaluación de parámetros como las materias primas, métodos de producción y propiedades en general para los cuales se implementará el proceso de ingeniería inversa para productos de PRFV.

En este proyecto se plantea utilizar la estrategia de ingeniería inversa del producto terminado, para establecer un procedimiento de análisis que va desde la evaluación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas hasta la caracterización composicional y estructural del producto terminado, material compuesto y materias primas para su implementación a nivel industrial.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los materiales compuestos aplicados actualmente a la industria por la compañía requieren en el área de calidad un seguimiento adecuado de sus propiedades, una manera de llevar a cabo el análisis es mediante ensayos destructivos y no destructivos que permitan conocer parámetros de interés dentro de los mismos, para determinar posibles causas de falla en los productos fabricados y en consecuencia llevar un control de los procesos de fabricación que permita aumentar la uniformidad en las propiedades de aplicación de los anterior mencionados productos.

III. JUSTIFICACIÓN.

La elección investigativa el trabajo se justifica bajo el conocimiento de propiedades de interés de los productos fabricados, el material utilizado y las materias primas empleadas para su fabricación, su aplicación se considera importante para la correcta evaluación de materiales compuestos y obtención de valores de propiedades importantes en pruebas de trabajo y diseño para producto, material y materias primas.

III. OBJETIVOS

A Objetivo general:

Documentar el procedimiento de evaluación de un material compuesto actualmente aplicado a la industria mediante la metodología de ingeniería inversa, para la determinación de propiedades útiles en el diseño de productos de Poliéster reforzado con fibra de vidrio PRFV.

B Objetivos específicos:

- Establecer el procedimiento de análisis de materiales compuestos de PRFV partiendo de un producto terminado.
- Determinar procedimientos para la caracterización estructural y composicional del material compuesto junto con la evaluación de propiedades de interés.

- Documentar procedimiento para la evaluación de materias primas utilizadas en la fabricación de materiales compuestos de PRFV.

IV. MARCO TEORICO

Los materiales compuestos de PRFV aplicados en la industria son productos actualmente importantes y con alta demanda, es por esto por lo que se deben evaluar propiedades específicas para el producto, el material terminado y las materias primas, con la intención de obtener información acerca de la estructura y la relación que guarda con las propiedades finales de cada componente. Para llevar a cabo dicho procedimiento se debe planear una metodología ordenada que permita conocer parámetros importantes de los materiales de PRFV, mediante ensayos que simulan condiciones de vida útil del producto y además condiciones extremas a las cuales pueden estar también sometidos.

Actualmente la fabricación de los materiales de PRFV se realiza mediante técnicas como Filament Winding, técnica que consiste en la fabricación de una estructura compuesta por enrollado de una fibra de refuerzo continua en un núcleo rotatorio bajo tensión [1]; otra de las técnicas es Hand Lay Up que consiste en un proceso de construcción de un material por varias capas de compuesto reforzado [1], también la técnica de Spray Up donde se da la aspersion de resina catalizada junto con fibras de vidrio, siendo impregnadas sobre una superficie con geometría deseada [2] y Pultrusión la cual consiste en un proceso continuo de tracción de fibras impregnadas con resina a través de un dado, donde la materia adquiere calor para la producción de secciones de plástico reforzado con fibra de vidrio [2]. Mediante estas técnicas se fabrican productos de matriz polimérica de poliéster reforzado con fibras de vidrio de diferentes configuraciones según las especificaciones de la empresa para dichos productos [2]. Las recomendaciones para un producto terminado de calidad indican que se deben realizar una variedad de ensayos para la medición de propiedades físicas, mecánicas y químicas según estándares nacionales e internacionales, además de ensayos de caracterización del producto, material compuesto y de las materias primas [3]. Las propiedades físicas se miden al material y permiten analizar el desempeño cuando es sometido a diversas situaciones que generan un impacto en el producto. De igual manera las propiedades mecánicas del material nos informan resultados de la respuesta mecánica del material ante el sometimiento a cargas externas que pueden presentarse en la vida útil del producto. También en el

caso de las propiedades químicas, se realizan mediante una serie de ensayos normalizados para la determinación de la durabilidad del material ante la exposición de este a ambientes químicos y/o térmicos agresivos que se simulan a escala de laboratorio para evaluar la respuesta del material.

De igual manera, las materias primas utilizadas en la fabricación de materiales compuestos de PRFV se deben evaluar cuidadosamente, con el fin de determinar parámetros importantes empleados en el procesamiento mediante las técnicas de *Filament Winding [1]* *Hand Lay Up [1]* y *Spray Up [2]* con la intención de que el proceso sea eficaz en cuanto a la obtención de mejores propiedades finales y la reducción de costos en los procesos.

La determinación de la dirección del refuerzo también es un parámetro que debe ser medido ya que guarda relación con las propiedades mecánicas a diferentes tipos de esfuerzos, para esto se realiza la caracterización del laminado como resultado del procesamiento y se analiza la composición de materias primas del producto terminado para encontrar la relación de cada uno de estos con las propiedades finales del material compuesto.

V. METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos planteados se propone una metodología de análisis llamada ingeniería inversa, la cual consiste en devolverse en el proceso de fabricación de un producto terminado para evaluar propiedades de interés de los materiales compuestos. En primera instancia se documenta el procedimiento que inicia con metrología de características del producto terminado, seguidamente se desarrolla el procedimiento de medición de propiedades físicas y mecánicas, mientras que las posteriores evaluaciones serán de carácter químico, composicional y estructural. Cuando se procede finalmente al análisis de las materias primas por separado, se caracterizan según parámetros de interés que posiblemente se deban ajustar de tal manera que el procesamiento del material compuesto se haga de manera eficaz para optimizar la producción en serie y reducir costos de proceso.

A. Caracterización del producto: Se propone la implementación de una serie de procedimientos llevados a cabo para la evaluación de los productos fabricados a partir de PRFV para la verificación de estándares de calidad sugeridos por la normativa interna de la empresa, estos se deben cumplir según los requerimientos del cliente y/o del proveedor. Los procedimientos incluyen medición de parámetros de importancia mediante implementación metrológica y realización de ensayos correspondientes para la obtención de dichas características.

B. Caracterización al material: Se realiza para definir configuraciones importantes de los materiales compuestos, que guardan relación con las propiedades en general del material y por ende, del producto terminado, estas pueden ser de carácter composicional para la determinación cuantitativa de las proporciones en volumen de los componentes del material compuesto (Matriz y refuerzo), además el carácter estructural de los laminados en el material compuesto para el análisis cualitativo y cuantitativo del refuerzo implementado mediante las mencionadas técnicas de fabricación. También la metodología plantea la caracterización del material mediante la realización de ensayos mecánicos, físicos y químicos para obtener información relacionada directamente con el material compuesto PRFV independiente a su aplicación.

C. Caracterización de materias primas: Se establece el procedimiento para la medición de propiedades de interés que presentan las materias primas, las cuales en conjunto dan lugar al PRFV. Para el caso de las resinas de poliéster se deben evaluar propiedades de interés mediante ensayos simples, entre estas propiedades se encuentran los tiempos y temperaturas de gel y de pico exotérmico en el proceso de catálisis de la resina, de igual manera determinaciones de viscosidad y porcentaje de sólidos de la resina a condiciones controladas para la caracterización de la matriz del material compuesto. Para el caso de las fibras de vidrio se realizan simples análisis como la determinación del Tex, el cual es una unidad de masa en fibras, para los filamentos, este parámetro es medido en unidades de masa por unidad de longitud, también para las fibras configuradas en velos, se mide el gramaje expresado en unidades de masa por unidad de área para su caracterización. Ambos parámetros guardan relación con las propiedades del producto final.

La información procedimental para la evaluación de los productos mediante la implementación de ingeniería inversa se resume en la **Tabla 1:**

Tabla 1: Información procedimental para la evaluación de productos de PRFV.

Tipo de material	Ejemplos			Propiedades			Caracterización	
Producto	Tanques	Postes	Crucetas	Mecánicas	Físicas	Químicas	Metrológica	Física
Material Compuesto	PRFV						Composicional	Estructural
Materias primas	Resina Poliéster	Fibra de vidrio					Química	Física

VI. PROCEDIMIENTO.

La metodología implementada para la evaluación de productos, material compuesto y materias primas utilizadas en la industria actualmente requiere un orden secuencial que obedezca al método de ingeniería inversa, partiendo desde un producto terminado y finalizando en las materias primas que dan lugar a dicho producto. Los ensayos y caracterizaciones pueden sufrir ciertas modificaciones según sea el producto que se evalúe, con la intención de obtener la información más relevante desde la ingeniería de materiales y que garantice la correcta evaluación de productos fabricados actualmente por la compañía.

A. Evaluación del producto terminado: Actualmente la compañía de Fibratore perteneciente a Invesa fabrica diversos tipos de productos de PRFV tales como; tanques de almacenamiento de líquidos, postes para electricidad, perfiles. Es importante determinar el producto que se desea evaluar para proceder con los ensayos de manera ordenada y obtener información relevante ante posibles situaciones adversas durante la vida útil sobre los productos que se mencionan anteriormente. Estos parámetros y propiedades medidas a los productos se realizan en el área de calidad, donde se realiza un muestreo en los lotes de fabricación de los productos y se realizan diversas evaluaciones, las cuales deben mostrar un comportamiento adecuado para obtener una aceptación del lote con criterios establecidos por el área encargada.

Postes: En primera instancia estos productos deben cumplir con las especificaciones metrológicas diseñadas por el área encargada de dicho proceso, esto se refiere a pesos, longitudes, diámetros, geometría, acabados y espesores. Un ejemplo de esto se evidencia en la *Fig 1*, en la cual podemos determinar espesor y dimensiones para un poste.



Fig 1: Determinación de especificaciones para un poste. a) Espesor por ultrasonido.

Seguidamente, una evaluación que se recomienda realizar a los postes de PRFV es una prueba de resistencia a la flexión estática el cual consiste en aplicar esfuerzos de flexión al poste para evaluar el comportamiento de este y su resistencia, el ensayo se realiza bajo la norma **ASTM D4923-01** [4] donde se especifican las dimensiones longitudinales de empotramiento y cargas aplicadas para los ensayos a trabajo (**No incluye rotura**) y los ensayos a diseño (**Incluye rotura**). Actualmente la empresa cuenta con productos diseñados para soportar cargas hasta de 1350Kgf en su diseño y teniendo en cuenta que este valor representa un factor de seguridad de 2.5 se determina que su carga de trabajo es de 540Kgf la cual debe ser la carga recomendada de operación durante su vida útil. En la *Fig 2*, se evidencia el montaje de flexión estática para postes de 8 metros de longitud (seccionado) con una carga de diseño de 510kgf.

- De este ensayo obtenemos parámetros como el módulo de flexión de un poste, la resistencia a la flexión y la deformación experimental para las diferentes cargas aplicadas durante el ensayo.
- Durante el muestreo se recomienda evaluar el 2% del lote realizado y el criterio de aceptación se propone según los resultados obtenidos en la muestra evaluada, si no se tiene certeza para la aprobación o rechazo del lote, se recomienda evaluar un poste más para reforzar la decisión a tomar.

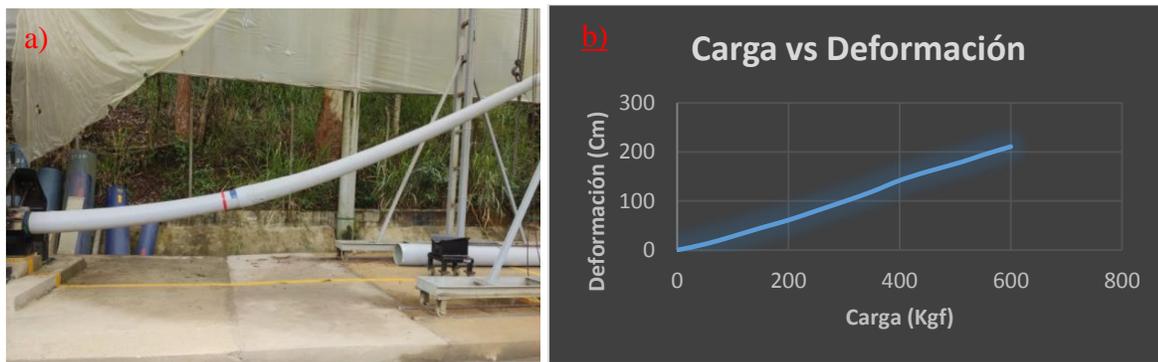


Fig 2: Ensayo de flexión para postes de referencia (8x510kgf). **a)** Montaje y **b)** Resultados

Otra de las pruebas de carácter mecánico que se realizan a postes de PRFV es el de torque en los pernos de apriete, consiste en evaluar la resistencia del material cuando se atraviesa un tornillo por dicha perforación y se aplica torque hasta la falla del material. Se considera como un ensayo importante debido a que simula las condiciones de trabajo del poste cuando se instalan sobre él accesorios como lámparas, reflectores, aislantes y/o cables para conducción de electricidad. En la **Fig 3**, se evidencia el montaje para la prueba realizada bajo la norma **ASCE 104 [5]** en un poste de (8m) x510kgf.

- De este ensayo podemos determinar el torque máximo que puede aplicarse en dicha sección y puede tenerse en cuenta en el momento de la instalación de los mencionados accesorios para garantizar una buena unión sin perder las características mecánicas del material.
- Se recomienda realizar la prueba tomando un 5% del lote como muestra, en el cual se debe garantizar una buena resistencia del material cuando el torque aplicado tiene una magnitud de 75N.m y debe haber buena respuesta de todas las muestras evaluadas para aprobar dicho lote.



b) Resultado	Criterio	Cumple	
		Si	No
90 N*m	> 75N*m	x	

Fig 3: Ensayo de torque en pernos de apriete. a) Montaje y b) Resultados.

Tanques: En primera instancia estos tipos de productos deben cumplir con las especificaciones metrológicas diseñadas por el área encargada de dicho proceso, esto se refiere a pesos, longitudes, diámetros, geometría, acabados y espesores. Como se evidencia en la *Fig 4*, la medición de espesores se realiza mediante ultrasonido.



Fig 4: Determinación de especificaciones para un tanque. a) Espesor.

Una interesante determinación para los tanques de PRFV es la verificación de la elongación del material cuando es sometido a esfuerzos que pueden estar asociados a la vida útil del mismo, esto se refiere a las presiones positivas por almacenamiento de fluidos o presiones negativas por

extracción de fluidos desde el interior. Se considera importante determinar la deformación del material mediante un ensayo de estanquidad [3], bajo condiciones reportadas por la compañía, la cual consiste en evaluar el cambio dimensional cuando el tanque está sometido a presiones internas ocasionadas por un fluido almacenado. En el ensayo actual y como se evidencia en la **Fig 5**, podemos determinar un perímetro inicial de [11m + 53,2 cm] y un perímetro final de [11m + 54,1 cm] lo cual corresponde a una deformación total menor al 2%.

- De este ensayo podemos determinar la relación entre la presión que genera el fluido con la deformación del material compuesto en PRFV, podemos determinar si la deformación varía con el tiempo y si hay recuperación elástica cuando se retira el fluido de su interior.
- El parámetro de aceptación para este ensayo se sugiere que la deformación no debe superar el 2% del perímetro medido inicialmente, para garantizar un adecuado comportamiento mecánico y el desempeño del material dentro de la zona elástica.

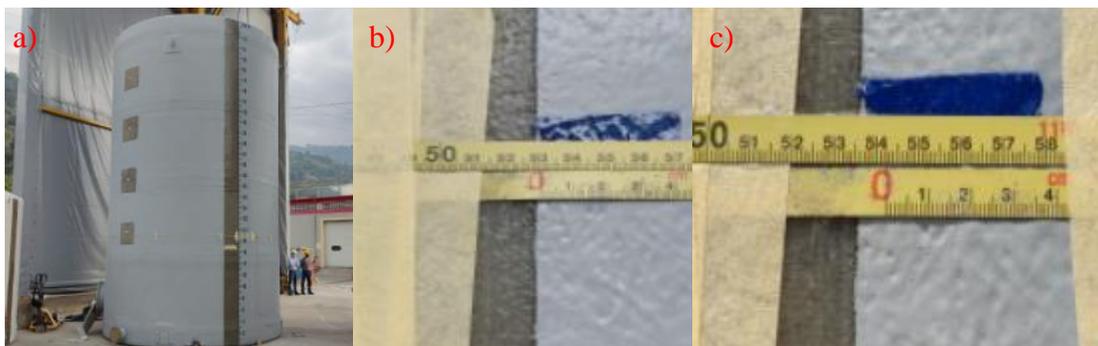


Fig 5: Ensayo de estanquidad para tanques. **a)** Montaje y **b)** Perímetro antes del llenado y **c)** Perímetro posterior al llenado.

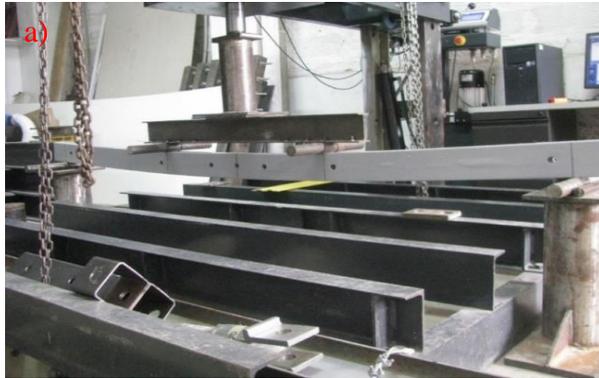
Crucetas: En primera instancia estos tipos de productos deben cumplir con las especificaciones metrológicas diseñadas por el área encargada de dicho proceso, esto se refiere a pesos, longitudes, diámetros, geometría, acabados y espesores. Como se puede apreciar en la **Fig 6**, en la cual se realiza la medición de las crucetas pultruidas en PRFV.



Fig 6: Especificaciones metrológicas para crucetas de PRFV. a) Longitud.

Un primer ensayo mecánico sugiere la implementación de ensayos de flexión para crucetas en dos apoyos bajo la norma **ASTM D6109** [6] para evaluar el comportamiento mecánico ante este tipo de esfuerzos a los que posiblemente estará sometido el material durante su vida útil donde se espera momentos flectores de alta magnitud. El montaje y los resultados para este ensayo normalizado se pueden evidenciar en la **Fig 7, a) y b)** respectivamente.

- La realización del ensayo se justifica para la determinación de resistencia a la flexión, momentos flectores aplicados en cada una de las caras para la cruceta, determinación de las deformaciones y esfuerzos de rotura para el material.
- El parámetro de aceptación para esta propiedad sugiere el seguimiento a cabalidad según el instructivo de fabricación de este, el cual especifica que la resistencia cuando la carga se aplica sobre la sección de mayor área debe superar los 1500 kg y en la sección con área menor debe superar los 1000 kg obteniendo una deformación bajo flexión menor al 2% de su longitud.



b)

Resultado	Criterio	Cumple	
		Si	No
1650 kg	> 1500 kg	x	

Fig 7: Ensayo de flexión a crucetas bajo la norma **ASTM D6109** [6]. **a)** Montaje y **b)** Resultados.

Un siguiente ensayo mecánico para crucetas de PRFV es el de perno pasante, el cual simula muy bien las condiciones mecánicas durante la vida útil del producto el cual suele estar anclado a un poste. El ensayo se realiza bajo la norma **NTC 6183** [7] para obtener valores importantes tales como deformación y carga de rotura, en productos de alto desempeño ya que soportan las líneas eléctricas generalmente utilizadas sobre postes de PRFV. El montaje y los resultados para este ensayo normalizado se pueden evidenciar en la **Fig 8, a)** y **b)** respectivamente.

- El ensayo se justifica debido a que simula las condiciones de vida útil del producto en el área de las telecomunicaciones, dando un resultado valioso en el comportamiento mecánico del material, se obtienen parámetros importantes que justifican el diseño de este.
- El parámetro de aceptación para dicho ensayo sugiere superar una carga de 1500 kgf cuando la tracción se realiza sobre la cara A (Menor espesor), esto garantiza el buen desempeño del producto en contacto con líneas eléctricas.



b)

Resultado	Criterio	Cumple	
		Si	No
1800 kgf	> 1500 kgf	x	

Fig 8: Ensayo de perno pasante bajo la norma NTC 6183 [7]. a) Montaje y b) Resultados.

B Evaluación del material PRFV:

Una propiedad importante dentro de los materiales compuestos es la densidad, la cual brinda información útil y suele estar condicionada por el cliente de productos de PRFV, debido a esto se debe evaluar cuidadosamente bajo el principio de Arquímedes, el cual consiste básicamente en obtener medidas del peso de una probeta estandarizada y tomar medición de volumen mediante desplazamiento de un fluido por inmersión de la misma, así se obtienen ambos parámetros que dan lugar a la densidad del material utilizando la **Ecuación 1**. Para obtener mayor precisión en los resultados se propone la medición de 10 muestras y la obtención del resultado final mediante la formulación del promedio en las densidades. La medición del volumen desplazado y de la cantidad de masa del material de PRFV se puede evidenciar en la **Fig 9**.

$$\rho = \frac{W_p}{V_d} \quad \text{Ecuación 1: Determinación de la densidad del material de PRFV.}$$

W_p : Peso de la probeta V_d : Volumen desplazado de agua a 20°C



Fig 9: Determinación de la densidad del material compuesto. a) Volumen desplazado y b) Masa.

Durante las pruebas de resistencia química, se tienen ciertos impedimentos que lo hacen un proceso demorado, por esto se recomienda utilizar máquinas de Intemperismo acelerado que permitan conocer el comportamiento químico de un material ante una exposición prolongada a condiciones de intemperie. Durante la exposición, las probetas de PRFV experimentan condiciones atmosféricas variables que simulan la posible vida útil de un producto, el ensayo se realiza bajo la norma **AAMA 615 [8]**. El montaje y las probetas utilizadas durante el ensayo se presentan gráficamente en la **Fig 10**.

- La justificación del ensayo consiste en verificar la retención de propiedades físicas, químicas y mecánicas del material luego de una simulación de 6 meses en Intemperismo acelerado, se recomienda realizar dichos ensayos una vez finalizado el ensayo en condiciones controladas.
- Los criterios de aceptación sugieren demostrar retención de al menos un 90% en las propiedades del material en comparación a muestras no sometidas ante Intemperismo basados en las normas correspondientes de cada ensayo.

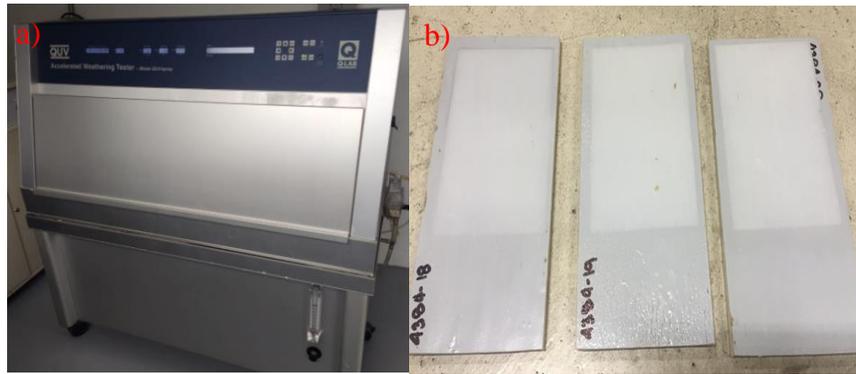


Fig 10: Ensayo de Intemperismo acelerado bajo la norma AAMA 615 [8]. **a)** Máquina para ensayo y **b)** Probetas ensayadas.

En los ensayos de carácter mecánico para el material de PRFV se considera fundamental la obtención de propiedades mecánicas mediante ensayos de tracción bajo la norma **ASTM D3039** [9], de allí se extraen parámetros importantes como resistencia última a la tracción, esfuerzo de fluencia y elongación del material compuesto a la rotura. En la **Fig 11**, podemos evidenciar **a)** la máquina para ensayos de tracción, **b)** las probetas bajo norma ASTM D3039 [9] y **c)** Los resultados para pruebas en PRFV.

- Durante este ensayo se recomienda realizar un análisis estadístico que permita conocer la distribución de las propiedades, se recomienda además variar la orientación del esfuerzo para determinar la isotropía de las propiedades mecánicas en PRFV.
- Los criterios de aceptación utilizados para garantizar el buen desempeño del material compuesto a tracción están establecidos por estándares internacionales específicos para el laminado y proporción de fibra y matriz en el material utilizado en el ensayo, se recomienda seguirlos a cabalidad.



Fig 11: Resistencia a la tracción para PRFV; a) Máquina universal

Con la intención de evaluar la influencia de factores térmicos sobre las propiedades mecánicas del material compuesto, se propone realizar ensayos de deflexión térmica bajo la norma **ASTM D648 [9]** para obtener valores de temperatura que tengan influencia importante en el comportamiento mecánico del material. Una representación gráfica de este ensayo puede evidenciarse en la **Fig 12**, donde evidenciamos el equipo de análisis **a)** y los resultados para el material de PRFV **b)**.

- Se propone realizar este ensayo bajo diversas condiciones de velocidad de calentamiento, carga aplicada y tiempo de curado para la matriz de poliéster, con la intención de evaluar los parámetros que más influyen en el comportamiento termo mecánico del material compuesto.
- El criterio de aceptación para este ensayo sobre el PRFV es el cumplimiento con las especificaciones de las hojas de seguridad diseñadas por los proveedores de la resina en cuestión.

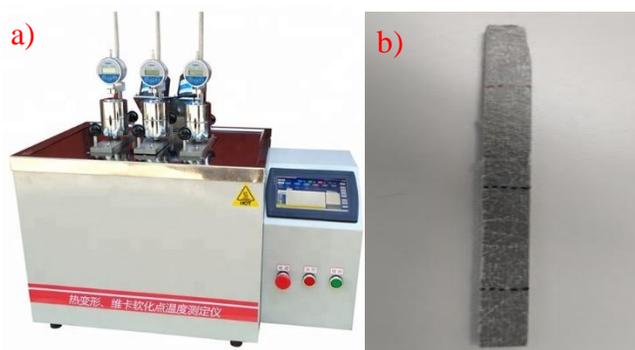


Fig 12: Resistencia a la deflexión térmica para PRFV; a) Máquina para ensayo de HDT, b) Probetas para ensayo.

Continuando con los ensayos de tipo mecánico se considera importante obtener valores de dureza para la resina de poliéster, la cual es una propiedad que en este caso da evidencia del curado de la resina durante el proceso de catálisis en conjunto con la fibra de vidrio en proporciones específicas, se realiza con ayuda del durómetro Barcol bajo la norma **ASTM D 2583 [11]**. En la **Fig 13**, podemos evidenciar el montaje del análisis por dureza Barcol **a)** y los resultados para una probeta extraída de un poste de PRFV **b)**.

- El ensayo debe realizarse de manera estadística obteniendo la moda como parámetro clave en las mediciones de dureza para la resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio, se propone que es el parámetro que dará el valor con más certeza para el análisis en diferentes secciones de la probeta circular, también se propone variar las condiciones de catálisis de la resina y el contenido de fibra en el material compuesto para evaluar los cambios en las propiedades mecánicas de dureza.
- El criterio de aceptación para el PRFV en tiempos prolongados de curado es proporcionado por la reglamentación interna de dicha materia prima, se deben garantizar los valores del rango establecidos medidos en escala Barcol.



Fig 13. Ensayo de dureza Barcol en PRFV. **a)** Montaje y **b)** Resultados.

En los productos actualmente fabricados por la compañía se considera importante obtener también información del comportamiento ante la llama, debido a esto se recomienda evaluar ensayos de propagación de llama horizontal para la determinación de la capacidad del material para propagar o para auto extinguir la llama y evitar un posible accidente, el ensayo se realiza bajo la norma **ASTM D635 [12]** el montaje, la esquematización y los resultados con su respectivo criterio de aceptación en el área de calidad se representan en la **Fig 14, a), b) y c)**, respectivamente.

- Para la realización de este ensayo se recomienda evaluar probetas en múltiples ocasiones mientras se varían las condiciones del experimento tales como geometría, espesor, humedad relativa y temperatura, para garantizar un comportamiento adecuado en dichas condiciones experimentales y reales.
- El criterio de aceptación para este ensayo sugiere que la llama no debe propagarse más de 25 cm en un minuto de exposición ante una llama controlada.

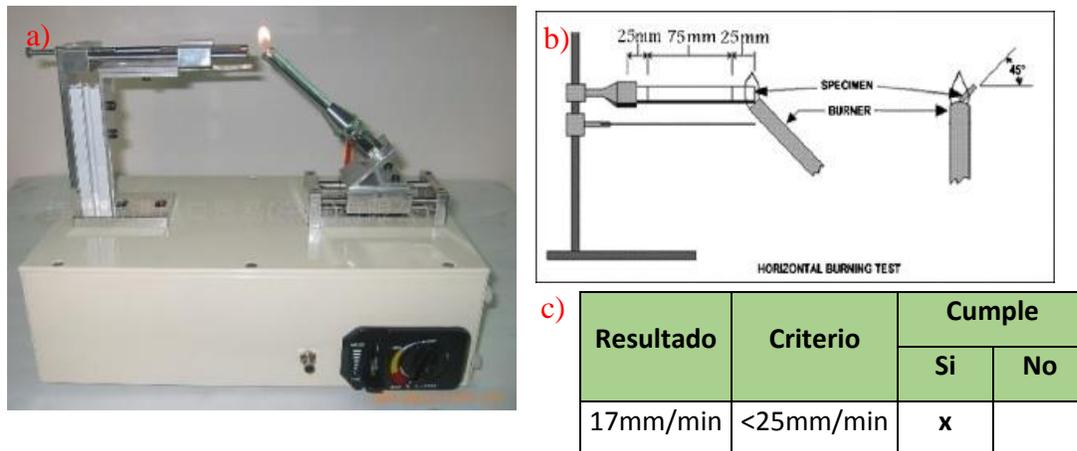


Fig 14: Ensayo de propagación de la llama horizontal. **a)** Montaje, **b)** Esquema y **c)** Resultados

C Caracterización del material PRFV:

En los productos fabricados por la compañía se desea evaluar la composición del material de PRFV para obtener información teórica de las propiedades de este. El procedimiento consiste en obtener probetas para diversos ensayos, los cuales proveen información útil de propiedades en general de los laminados de poliéster reforzados con fibra de vidrio; en primera instancia se debe realizar una caracterización composicional del material compuesto, el cual se realiza mediante un ensayo bajo la norma **ASTM D 5682** el cual consiste en la evaporación de la resina de las probetas dispuestas sobre crisoles apropiados en una mufla a 600°C durante 6 horas divididos en dos ciclos para garantizar la obtención neta de las fibras y la eliminación de la resina de poliéster, seguidamente se realizan mediciones de los pesos y se utiliza la **Ecuación 2**, para la determinación de la composición fibra/refuerzo así:

$$\%Fibra = \frac{W_f - C}{W_i - C} * 100\% \quad \text{Ecuación 2: Determinación del porcentaje de fibra en el material PRFV.}$$

C : Peso Crisol W_i : Peso inicial W_f : Peso final

Los resultados en los pesos de la probeta en estados anterior y posterior a la calcinación se determinan mediante una balanza analítica como se evidencia en la **Fig 15, a)** antes de calcinar el material y **b)** después de calcinar el material.



Fig 15: Determinación composicional de matriz y refuerzo en el material PRFV, **a)** Probeta y **b)** Probeta calcinada.

Otro de los parámetros importantes de los materiales compuestos de fibra de vidrio, es la orientación del refuerzo y se considera importante realizar ensayos que permitan obtener los ángulos de enrollado en procesos de Filament Winding el cual es utilizado en la manufactura de postes actualmente por la compañía. Para la determinación se extraen probetas rectangulares y se procede a la calcinación de la resina en la mufla de manera similar al ensayo de la determinación composicional de matriz y refuerzo, en este caso específico se recurre al posicionamiento adecuado de las fibras sobre una superficie y se deben reportar los ángulos respecto a una horizontal de cada una de las capas que componen el laminado de la probeta, en estos procesos se determinan capas correspondientes a coberturas y Hoop, las cuales cumplen diferentes funciones en el laminado y se diferencian por el valor del ángulo obtenido. Estos resultados guardan relación con las propiedades mecánicas del material y la información puede ser útil para escoger los ángulos más apropiados en ciertas aplicaciones. El procedimiento para la determinación de los ángulos de enrollado de la fibra

en el material compuesto se especifica en la **Fig 16**, donde determinamos ángulos de coberturas **a)** y ángulos de Hoop **b)**.

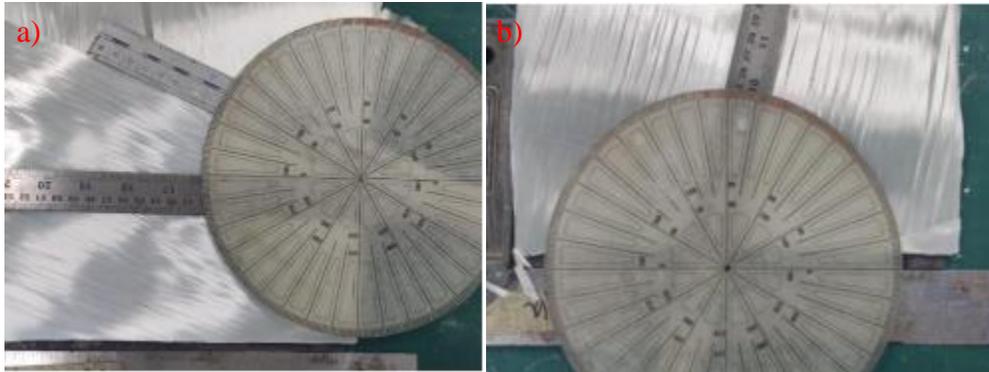


Fig 16: Determinación de ángulos de enrollado en procesos de Filament Winding. **a)** Cobertura y **b)** Hoop.

Seguidamente, una determinación importante en los materiales de PRFV es la determinación de porosidad en el laminado, la cual da evidencia de espacios que no aportan propiedades al material y pueden volver al material susceptible al ataque químico y también pueden actuar como concentradores de esfuerzos, debido a esto se propone la obtención de probetas cuadradas y debidamente pulidas en la sección del espesor, esto con la intención de obtener micrografías ópticas de dichas secciones y evaluar puntos de interés como porosidades para el reporte de la relación de áreas de poros respecto al total de área en la sección. Durante este ensayo también se pueden determinar espesores de Top Coat, la cual corresponde a la capa del acabado del producto, además brinda propiedades físicas y químicas importantes para el desempeño del producto en su aplicación. El procedimiento para la obtención de imágenes superficiales del PRFV se evidencia en la **Fig 17**, donde hay evidencia de espesor de Topcoat **a)** y porosidad en el laminado **b)**.

- El criterio de aceptación para la porosidad en laminados no debe superar el 0.1% de área de los poros respecto a la sección tomada, debido a que esto genera importantes impactos al material durante su vida útil, ya sea de carácter mecánico y/o químico.

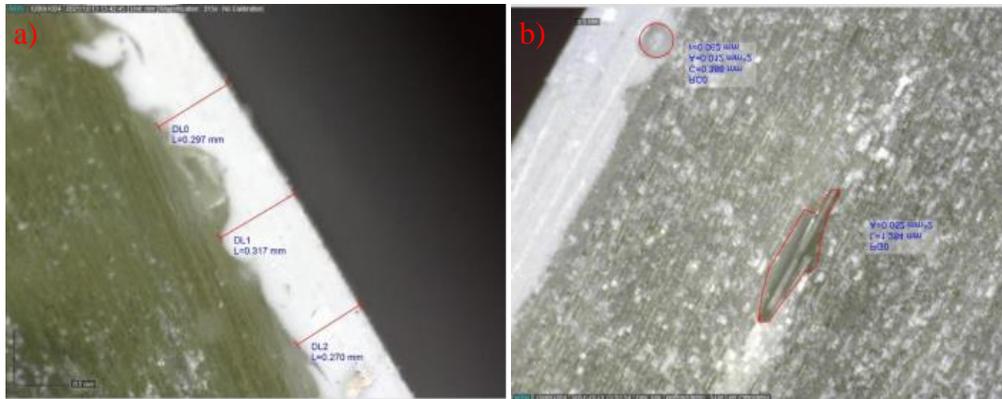


Fig 17: Determinación de secciones importantes del laminado de PRFV, a) Espesor de Top Coat y b) Porosidad.

D Evaluación de las materias primas: Las materias primas que constituyen los productos fabricados por la compañía son básicamente la resina de poliéster y la fibra de vidrio, para ambas materias primas es importante obtener información de propiedades que deben estar parametrizadas dentro de rangos establecidos para favorecer la fabricación y el procesamiento del material para dar lugar a un producto terminado aplicado actualmente en la industria.

En primera instancia la resina de poliéster debe ser evaluada de tal manera que permita la obtención de propiedades mecánicas mediante ensayos de tracción bajo la norma **ASTM D638** [13], de allí se extraen parámetros importantes como resistencia última a la tracción, esfuerzo de fluencia y elongación de la resina en el punto de rotura. La **Fig 18**, representa procesos relacionados con ensayos de tracción, donde se evidencia el equipo para el ensayo **a)** la probeta normalizada **b)** y la curva esfuerzo deformación **c)**.

- El ensayo se recomienda realizarlo de manera estadística variando condiciones de catálisis en la resina para determinar si hay diferencias considerables en las propiedades mecánicas como consecuencias de la reacción exotérmica en el curado de la resina de poliéster.
- El criterio de aceptación para este ensayo es la obtención de propiedades que deben estar entre los rangos reportados por las fichas técnicas de las resinas de poliéster, estas propiedades son; módulo elástico, esfuerzo último de rotura y deformación a rotura del material.

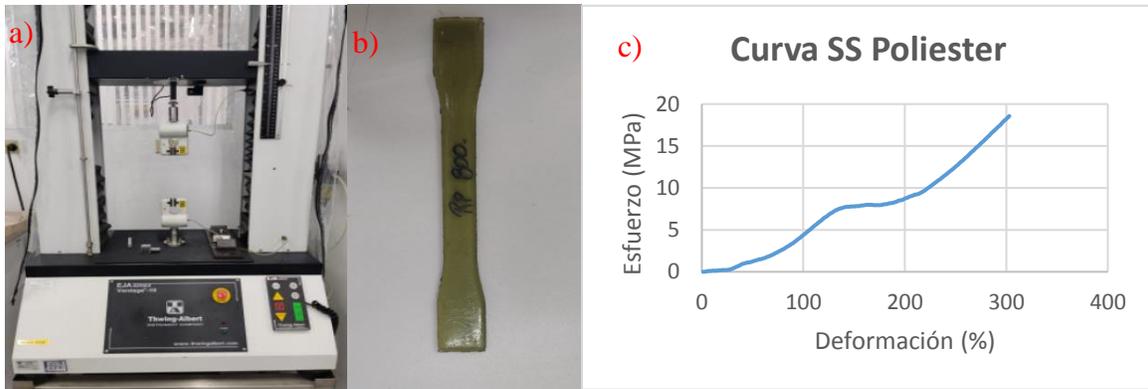


Fig 18: Resistencia a la tracción para la resina de poliéster; **a)** Máquina universal **b)** Probetas para ensayo y **c)** Curva esfuerzo-deformación.

La resina de poliéster también se recomienda evaluar mediante ensayos de flexión para obtener propiedades de interés en las posibles situaciones de vida útil de los productos fabricados a partir de esta, estas propiedades son momentos flectores, resistencia a la flexión y deformación de rotura bajo flexión, el ensayo se realiza bajo la norma **NTC 6275** [14]. La **Fig 19**, representa el ensayo de flexión a resina de poliéster donde se evidencia la máquina universal para el ensayo y la probeta **a)** y los resultados **b)**.

- Se propone realizar bajo método estadístico para verificar la posible desviación de los resultados en los ensayos mecánicos, y además verificar el impacto que posee las condiciones de catálisis de las resinas de poliéster sobre las propiedades mecánicas a flexión de estas.
- El criterio de aceptación para este ensayo sobre las resinas de poliéster es el cumplimiento con las especificaciones de las hojas de seguridad diseñadas por los proveedores de la resina en cuestión.

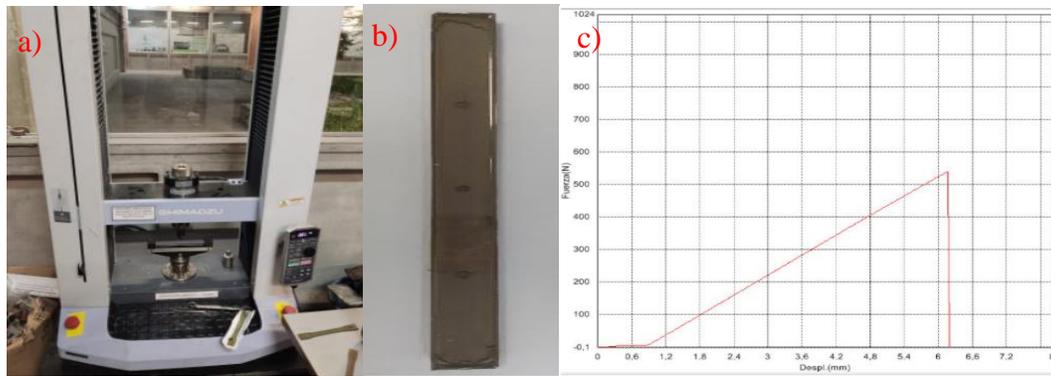


Fig 19: Resistencia a la flexión para resina de poliéster; **a)** Máquina para ensayo de flexión y **b)** Probetas para ensayo y **c)** Resultados.

Con la intención de involucrar factores térmicos sobre las propiedades mecánicas de la resina, se propone evaluar dicha materia prima bajo ensayos de deflexión térmica bajo la norma **ASTM D648 [9]** para obtener valores de temperatura importantes en el comportamiento mecánico del material. En la **Fig 20**, se puede evidenciar la máquina para ensayos de HDT junto con las probetas del ensayo **a)** y los resultados de un ensayo de HDT para la resina de poliéster.

- Se propone realizar este ensayo bajo diversas condiciones de velocidad de calentamiento, carga aplicada y tiempo de curado para la resina de poliéster, con la intención de evaluar los parámetros que más influyen en el comportamiento y determinar aplicaciones críticas para la materia prima en cuestión.
- El criterio de aceptación para este ensayo sobre las resinas de poliéster es el cumplimiento con las especificaciones de las hojas de seguridad diseñadas por los proveedores de la resina en cuestión.



Fig 20: Resistencia a la deflexión térmica para resina de poliéster; **a)** Máquina para ensayo de HDT **b)** probetas para ensayo.

Continuando con los ensayos de tipo mecánico se considera importante obtener valores de dureza para la resina de poliéster, la cual es una propiedad que en este caso da evidencia del curado de la resina durante el proceso de catálisis, se realiza con ayuda del durómetro Barcol bajo la norma **ASTM D 2583 [10]**. En la **Fig 21**, se puede evidenciar el montaje para la medición de dureza Barcol **a)** y el resultado para la resina de poliéster **b)**.

- El ensayo debe realizarse de manera estadística obteniendo la moda como parámetro clave en las mediciones de dureza para la resina de poliéster, se propone que es el parámetro que dará el valor con más certeza para el análisis en diferentes secciones de la probeta circular, también se propone variar las condiciones de catálisis de la resina para evaluar los cambios en las propiedades mecánicas de dureza.
- El criterio de aceptación para las resinas de poliéster en tiempos prolongados de curado es proporcionado por la reglamentación interna de dicha materia prima, se deben garantizar los valores del rango establecidos medidos en escala Barcol.



Fig 21: Dureza Barcol resina vinilester; **a)** Montaje y **b)** Resultados.

La resistencia química de las resinas de poliéster se evalúa mediante una secuencia de pruebas sencillas ante el sometimiento de probetas estandarizadas en diversos medios agresivos como ácidos y bases de alta concentración, también solventes y soluciones salinas en los cuales se evalúa el comportamiento químico en periodos de 3,6 y 12 meses de la siguiente manera:

- **Cambio de color en la probeta de poliéster expuesta:** Los valores utilizados son (0, 3, 5) para expresar la diferencia colorimétrica respecto a una muestra patrón donde el valor de 5 corresponde a un cambio severo de color y tonalidad.
- **Agujamiento:** Los valores utilizados son (0, 3, 5) para evidenciar la presencia de cavidades ocasionadas por el ataque químico, siendo 5 la presencia más severa de agujeros en la superficie de la probeta expuesta.
- **Reblandamiento:** Los valores utilizados son (0, 3, 5) para evidenciar el desprendimiento de material en contacto con una superficie metálica ocasionado por el ataque químico durante la exposición, el valor más alto (5) expresa un alto desprendimiento mediante el contacto.
- **Sedimento:** Los valores utilizados son (0, 3, 5) para evidenciar la sedimentación del poliéster en la solución de exposición, donde el valor máximo (5) expresa una alta concentración de precipitado o de suspensión.
- **Dureza Barcol:** Se realiza con ayuda del durómetro Barcol bajo la norma **ASTM D 2583 [10]** por ambas caras de la probeta para evidenciar posibles pérdidas de la dureza ocasionadas por la exposición prolongada en los medios químicos agresivos durante el ensayo.

Los ensayos relacionados con la resistencia química serán entonces una medición para la pérdida de las propiedades que posee en este caso la resina como consecuencia de un medio químico agresivo para la resina de poliéster, en primera instancia se debe garantizar que la pérdida de propiedades sea lo menor posible con el paso del tiempo, esto será una evidencia del buen comportamiento químico de la resina ante ciertos agentes a los que podría estar sometido el producto durante su vida útil. La **Fig 22**, representa el montaje para resistencia química **a)** y los parámetros medidos en la guía de resistencia química junto a los resultados **b)**.



REFERENCIA	Iso NPG
FLUIDO	HCl (25%)
DUREZA barcol	39
DUREZA barcol	40
Espesor (mm)	6.9
REBLANDAMIENTO	0
CAMBIO DE COLOR	5
AGUJERAMIENTO	0
SEDIMENTO	3
TOTAL	8
PROMEDIO	2

Fig 22: Resistencia química resina de poliéster Iso npg; a) Montaje y b) Resultados.

E Caracterización de las materias primas:

Fibra de vidrio: Para la fibra de vidrio se realizan diversas caracterizaciones según sea la configuración de los hilos que componen la materia prima, entre ella tenemos la configuración de tela Mat, los filamentos tipo Roving, los velos de vidrio; cada uno de estos se debe caracterizar de diferentes maneras, pero con mediciones similares.

Para el caso de la configuración Mat y los velos de vidrio se realiza la medición del gramaje, la cual consiste en obtener el área y el peso de la fibra mediante mediciones metrológicas simples, la unidad en la que se reporta esta medición es en unidad de masa sobre unidad de área (g/m^2), en el caso de los filamentos tipo Roving se caracteriza mediante la medición de masas y longitudes de los filamentos para reportar la medición en unidades de masa sobre unidad de longitud (g/km), en ambos casos el resultado numérico de la medición acompaña el nombre de la configuración de la fibra. En la **Fig 23**, se puede evidenciar la caracterización para las fibras de vidrio; para telas **a)** y para filamentos **b)**.

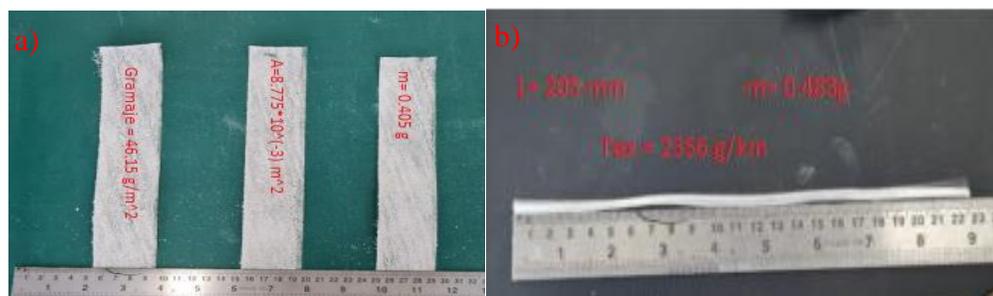


Fig 23: Caracterización fibra de vidrio; a) Mantas y b) Filamentos.

Resina de poliéster: Para la resina de poliéster, la cual es actúa como la matriz en materiales compuestos de PRFV se realizan caracterizaciones simples de tipo composicional y reológico en donde ambas están relacionadas, para su evaluación se realiza medición de viscosidad Brookfield bajo la norma **UNE-EN ISO 2555 [15]** también la determinación de la tixotropía la cual consiste en la relación entre las viscosidades a diferentes velocidades de rotación de la llave del viscosímetro Brookfield, en la caracterización composicional de los productos RP se evalúa el contenido de resina presente en el sistema mediante la evaporación de solventes como se evidencia en la **Fig 24**, así se obtiene un parámetro llamado contenido de sólidos que hace referencia al contenido neto de resina sin presencia de Estireno como solvente, se calcula mediante la **Ecuación 3**:

$$\%solidos = \frac{W_{f-T}}{W_{i-T}} * 100\%,$$

Ecuación 3: Determinación del porcentaje de sólidos en la resina

T : Tara W_i : Peso inicial W_f : Peso final



Fig 24: Caracterización de la resina de poliéster; **a)** Viscosidad y **b)** Porcentaje de sólidos.

De igual manera para la resina de poliéster se deben evaluar propiedades tales como, reactividad de la resina posterior al catalizado mediante la obtención de tiempos de gel bajo la norma **ISO 2535 [16]**, el cual consiste en catalizar la resina mediante sistemas (DMA/BPO) o (Cobalto/MEKPO) en proporciones adecuadas y realizar seguimiento térmico durante el proceso exotérmico para obtención de temperaturas contra tiempo, durante este proceso se obtienen tiempos y temperaturas de gel de la resina y picos exotérmicos los cuales dan evidencia de la reactividad y curado de la

resina. El montaje para realización de curvas exotérmicas en la resina se puede evidenciar en la **Fig 25 a)** y de igual manera los resultados obtenidos se evidencian en la **Fig 25 b)**.

- Se propone manejar unos parámetros para catálisis y condiciones ambientales normalizadas para cada referencia de resina que se va a evaluar, con la intención de tener control sobre variables que influyen sobre los resultados, y garantizar la veracidad de los resultados obtenidos.
- Los criterios de aceptación para esta prueba están reglamentados por la empresa Invesa y se consideran acordes a los criterios del investigador, estos varían según la referencia e incluyen temperaturas y tiempos de gel, además tiempo y temperatura de pico exotérmico.

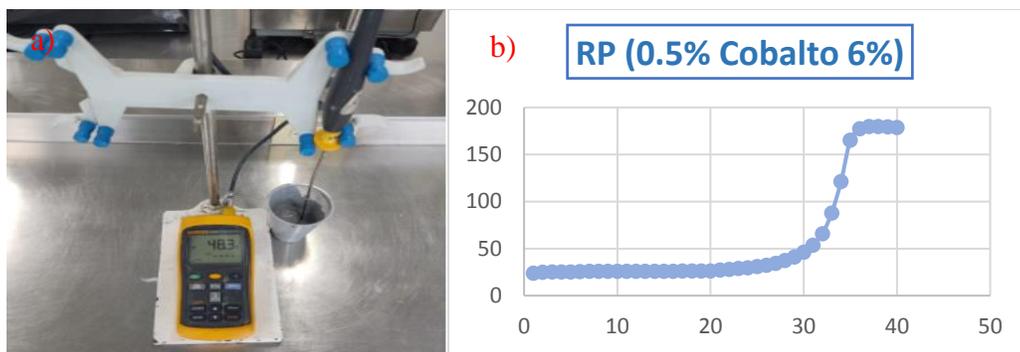


Fig 25: Curva exotérmica resina de poliéster [Topcoat]; **a)** Montaje del experimento y **b)** Curva exotérmica.

Un siguiente parámetro para caracterizar la resina de poliéster es el índice de acidez, es una medición que da constancia que todos los grupos funcionales reaccionaron y fueron incorporados a la resina, es por esto por lo que es importante evaluarla, el procedimiento consiste en una simple titulación y se debe verificar un rango de valores para este parámetro como evidencia de una reacción de poli esterificación completa. La **Fig 26 a)**, evidencia el procedimiento empleado para la determinación del índice de acidez en una resina de poliéster.

La **Ecuación 4**, indica los parámetros experimentales que deben medirse para calcular el índice de acidez, en nuestro caso para una resina de poliéster:

$$\text{Índice de Acidez} \left(\frac{\text{mg KOH}}{\text{g Resina}} \right) = \frac{V_t * \mu * [N]}{W_m * \% \text{Sólidos}}$$

Ecuación 4. Determinación índice de acidez

Vt: Volumen KOH en la titulación *[N]: Normalidad KOH* *Wm: Peso de la muestra*

- Los criterios de aceptación para esta prueba están reglamentados por la empresa Invesa y se consideran acordes a los criterios del investigador, estos varían según la referencia de resina que se evalúe.



Fig 26: Caracterización de la resina de poliéster; **a)** Índice de acidez

VII. RESULTADOS ESPERADOS

Se espera que posterior a la aplicación de la metodología experimental diseñada anteriormente se tenga la suficiente información de las materias primas y el material compuesto de PRFV en los aspectos físicos, químicos y mecánicos para tener en cuenta parámetros importantes a la hora de rediseñar un producto o al momento de fabricar un producto nuevo, con la obtención de dichos conocimientos experimentales también se pueden optimizar los parámetros implicados en las técnicas de procesamiento empleadas y finalmente garantizar un adecuado muestreo con sus respectivos ensayos y criterios de aceptación que sean representativos para los lotes producidos continuamente en la industria.

VIII. CONCLUSIONES.

- Se concluyó que la aplicación de ingeniería inversa sobre productos de PRFV actualmente fabricados por la compañía, es una buena alternativa para la determinación de propiedades en general, y genera una idea de los parámetros de procesamiento del material compuesto.
- Se apreció que la caracterización de las materias primas utilizadas en materiales compuestos es un proceso fundamental para la determinación de parámetros de implementación en los diferentes procesos para síntesis de materiales y en consecuencia los productos.
- El empleo de la metodología de análisis de materiales compuestos permite obtener información relevante de propiedades de interés que es útil para diseño de nuevos productos o para el rediseño de productos ya implementados a nivel industrial.

IX. REFERENCIAS:

- [1] Tomsic, Joan L. (2000). Dictionary of Materials and Testing (2nd Edition) - film. SAE International. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00862GZ2/dictionary-materials/film>
- [2] Asociación de fabricantes de materiales compuestos. “Certificado técnico materiales compuestos”. Módulo de estudio 5.8. CFA 2001.
- [3] Cano A. Puerta M. ‘Especificaciones de postes en poliéster reforzado con fibra de vidrio PRFV’. M-13 versión 12. 08/12/2020. Fibratore. Invesa retrieved from www.fibratore.com
- [4] ASTM D4923 ‘Standard Specification for Reinforced Thermosetting Plastic Poles’ of ASTM INTERNATIONAL. Book of standars volumen: 08.02. DOI: 10.1520/D4923-92. Retrieved from “astm.org”.
- [5] ASCE 104. ‘Recommended Practice for Fiber-Reinforced Polymer Products for Overhead Utility Line Structures’. Of American Society of Civil Engineers. 2019. ISBN(s):9780784415443. Retrieved from “www.asce.org”.
- [6] ASTM D6109-19 ‘Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastic Lumber and Related Products’ of ASTM INTERNATIONAL. Book of standars volumen: 08.03. DOI: 10.1520/D6109-19. Retrieved from “astm.org”.
- [7] NTC 6183. ‘Fiberglass Reinforced Plastic crossarms for electric energy and telecommunications overhead lines’. Norma Técnica Colombiana. Bogotá DC. 2016. I.C.S: 29.240.99. Retrieved from “www.icontec.org”.
- [8] AAMA 615. ‘Voluntary specification, performance requirements and test procedures for superior performing organic coatings on plastic profiles’. American Architectural Manufacturers Association. USA. 2013. Retrieved from “www.aama-ntl.org”.
- [9] ASTM D648 “Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position”. Of ASTM INTERNATIONAL. Book of standars volumen: 08.01. DOI: 10.1520/D0648-18. Retrieved from “astm.org”

-
- [10] ASTM D3039 ‘Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials’. Of ASTM INTERNATIONAL. Book of standars volumen: 15.03. DOI: 10.1520/D3039_D3039M-00. Retrieved from “astm.org”.
- [11] ASTM D2583. ‘Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor’. Of ASTM INTERNATIONAL. Book of standars volumen: 08.01. DOI: 10.1520/D2583-13A. Retrieved from “astm.org”.
- [12] ASTM D635. ‘Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position’. Of ASTM INTERNATIONAL. Book of standars volumen: 08.01. DOI: 10.1520/D0635-18. Retrieved from “astm.org”.
- [13] ASTM D638. ‘Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics’. Of ASTM INTERNATIONAL. Book of standars volumen: 08.01. DOI: 10.1520/D0638-14. Retrieved from “astm.org”.
- [14] NTC 6275. ‘Support posts for electrical distribution, lighting and telecommunications networks, manufactured in composite materials reinforced with glass fiber. Norma Técnica Colombiana. Bogotá DC. 2018. I.C.S: 93.080.40. Retrieved from “www.icontec.org”.
- [15] UNE-EN ISO 2555:2018. ‘Plastics - Resins in the liquid state or as emulsions or dispersions - Determination of apparent viscosity using a single cylinder type rotational viscometer method’. Una Norma Española. Madrid, España. 2018. Retrieved from “www.une.org”.
- [16] ISO 2535. ‘Plastics-Unsaturated polyester resins- Measurement of gel time at ambient temperature’. Una Norma Española. Madrid, España. 2001. Retrieved from “www.une.org”.