



Evaluación del efecto del tiempo de gel y de curado de la resina poliéster en el desempeño mecánico de recubrimientos PRFV para su aplicación en el tanque de almacenamiento y el tanque de control de caudal del acueducto comunitario San José en el municipio de Envigado

Mónica Cristina Flórez Granada

Informe de semestre de industria con el fin de optar al título de Ingeniera de Materiales

Asesor Externo

Reison Arley Jaramillo Carvajal, Director de Mantenimiento, Secretaría de Obras Públicas,
Alcaldía de Envigado

Asesora interna

Maryory Astrid Gómez Botero, Profesora-Investigadora, Centro de Investigación, Innovación y
Desarrollo de Materiales – CIDEMAT- Universidad de Antioquia

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Materiales,

Ingeniería de Materiales

Medellín - Colombia

2023

| Cita | Flórez Granada [1] |
|-------------------|--|
| Referencia | [1] M. Flórez Granada, “Evaluación del efecto del tiempo de gel y de curado de la resina poliéster en el desempeño mecánico de recubrimientos PRFV para su aplicación en el tanque de almacenamiento y el tanque de control de caudal del acueducto comunitario San José en el municipio de Envigado”, Práctica académica, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, 2023. |



Centro de documentación UdeA

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

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

Dedico mi trabajo final principalmente a Dios, por darme la fuerza necesaria para culminar esta meta. Luego le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia, especialmente a mi madre y a mi pareja que me apoyaron incondicionalmente y me motivaron en los momentos difíciles, me enseñaron a ser la persona que soy, mis principios, mis valores, mi perseverancia y mi gallardía, gracias por enseñarme a afrontar las dificultades sin perder nunca la cabeza ni morir en el intento, la bendición a diario a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien, primera profesional en la familia.

A mi benefactora BEGG, una mujer carismática, con un corazón generoso, que siempre estuvo ahí sin esperar nada a cambio, porque sin su ayuda económica, nada de esto hubiera sido posible.

Y en general a todos los que me acompañaron en este bonito proceso.

Agradecimientos

Es la mejor manera de terminar... Mi informe final.

Iniciar con los agradecimientos para todas y cada una de las personas que me acompañaron y acogieron de la mejor manera mi formación académica y personal. En primer lugar, le agradezco a mi madre que siempre me ha brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ella que con su cariño me ha impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades. Por otro lado, a mi docente asesora Maryory Gómez, le agradezco muy profundamente por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos, los llevaré grabados para siempre en la memoria en mi futuro profesional. A mi Alma Mater, que me ha exigido tanto, pero al mismo tiempo me ha permitido luchar por mi anhelado título. Además de todo, porque sin tener presupuesto, dispuso los laboratorios y ensayos a mi disposición. Y, por último, agradecer a la Alcaldía de Envigado que me abrió sus puertas para tan bonito y esforzado trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| ABSTRACT | 11 |
| I. INTRODUCCIÓN | 12 |
| II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 13 |
| A. Objetivo general | 14 |
| B. Objetivos específicos | 14 |
| IV. MARCO TEÓRICO | 15 |
| 4.1 Generalidades de las materias primas para la fabricación de laminados de PRFV: | 15 |
| 4.2 Materias Primas | 15 |
| 4.2.1 Resinas de poliéster insaturado | 15 |
| 4.2.2 Catalizadores y acelerantes para resinas de poliéster | 16 |
| 4.2.3 Fibras de vidrio | 16 |
| 4.2.4. Elección del tipo de fibra de vidrio | 17 |
| 4.3 Algunas formas de elaboración de polímeros reforzados con fibra. | 17 |
| 4.3.1 Método de contacto directo | 17 |
| 4.3.2 Inyección | 18 |
| 4.3.3 Prensado en caliente | 19 |
| 4.4 Generalidades de los recubrimientos PRFV | 19 |
| 4.5 Pruebas de impacto (Izod) | 22 |
| 4.6 Pruebas de ignición | 23 |
| 4.7 Pruebas de tracción | 23 |
| 4.8 Pruebas de adhesión | 24 |
| V. METODOLOGIA | 25 |
| 5.1 Elección de los materiales para ejecutar el proyecto | 25 |
| 5.2 Medición del tiempo de gelificación de las resinas. | 26 |

| | |
|---|----|
| 5.3 Preparación de las probetas requeridas para realizar los ensayos propuestos en el proyecto. | 27 |
| 5.3.1 Obtención de las probetas para las pruebas de tracción | 28 |
| 5.3.2 Ensayos de tracción | 29 |
| 5.4 Ensayos de impacto Izod | 30 |
| 5.5 Ensayos por ignición | 31 |
| VI. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 33 |
| 6.1 Resultados de la prueba de tiempo de gelificación | 33 |
| 6.2 Resultados y análisis de las pruebas de impacto Izod | 34 |
| 6.3 Resultados de ensayos por ignición | 37 |
| 6.4 Resultados prueba de tracción | 39 |
| 6.5 Resultados prueba de adherencia | 45 |
| VII. CONCLUSIONES | 48 |
| REFERENCIAS | 51 |
| ANEXOS | 54 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Resistencia a la tracción de los diferentes tipos de fibra de vidrio [12]..... | 17 |
| Tabla 2. Dosificaciones del catalizador y las resinas utilizadas en la elaboración de las probetas. | 28 |
| Tabla 3. Tabla de resultados de las pruebas Izod para resina amarilla. | 35 |
| Tabla 4. Tabla de resultados de las pruebas izod para resina roja. | 35 |
| Tabla 5. Resultados de las pruebas de ignición..... | 38 |
| Tabla 6. Dimensiones de las probetas de resina amarilla para pruebas de tracción en milímetros. | 39 |
| Tabla 7. Dimensiones de las probetas de resina roja para pruebas de tracción en milímetros. | 39 |
| Tabla 8. Propiedades mecánicas de las resinas extraídas de las pruebas de tracción | 44 |
| Tabla 9. Resultados de la prueba de adhesión..... | 46 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1. Paredes del tanque de almacenamiento con desprendimiento del impermeabilizante. | 13 |
| Fig. 2. Resistencia a la tensión del poliéster reforzado con vidrio en función del contenido de fibras y dirección de las fibras en la matriz [14]. | 20 |
| Fig. 3. Métodos para determinar la resistencia al impacto en materiales poliméricos o compuestos. a) método Charpy, b) método Izod [21]. | 23 |
| Fig. 4. Esquema de la prueba de tiempo de gelificación realizada. | 26 |
| Fig. 5. Muestra representativa de las probetas fabricadas para las pruebas de tracción. | 29 |
| Fig. 8. Esquema de la elaboración de la prueba de adherencia. | 32 |
| Fig. 9. Gráfico Tiempo de gelificación vs porcentaje de peróxido en las resinas estudiadas. | 33 |
| Fig. 10. Gráfico temperatura vs tiempo..... | 33 |
| Fig. 12. Resultados de las pruebas Izod para las dos resinas utilizadas. | 37 |
| Fig. 13. Gráficos deformación vs esfuerzo. a) resina amarilla b) resina roja..... | 40 |
| Fig. 14. Gráfica deformación vs tensión para la resina amarilla..... | 41 |
| Fig. 15. Gráfica deformación vs tensión para la resina roja..... | 43 |
| Fig. 16. Esquema de la distribución de los dollys en los ensayos de adherencia..... | 45 |

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

| | |
|------|--|
| AWWA | American Water Works Association |
| CFRP | Plástico reforzado con fibra de carbono |
| DSC | Calorimetría diferencial de barrido |
| EPM | Empresas Públicas de Medellín |
| g | Gramo |
| GRP | Plástico reforzado con fibra de vidrio |
| J | Joule |
| mm | Milímetro |
| MPa | Megapascal |
| MEK | Metil-Etil-Cetona |
| PMC | Materiales compuestos de matriz polimérica |
| PRFA | Polímero/plástico reforzado con fibra de vidrio, aramida |
| PRFV | Polímeros reforzados con fibra de vidrio |
| UdeA | Universidad de Antioquia |

RESUMEN

En este informe de práctica académica se estudiaron las condiciones óptimas para la fabricación manual de recubrimientos de polímeros reforzados con fibra de vidrio (PRFV) con el objetivo de evaluar su uso potencial en tanques de concreto vaciado en el acueducto comunitario San José en Envigado. Se utilizaron dos tipos de resinas diferentes, una resina tereftálica pre-acelerada (amarilla) y otra resina tereftálica no modificada (roja) junto con fibra de vidrio E tipo MAT para fabricar el material compuesto. Se determinó el tiempo de curado variando el contenido de catalizador, obteniendo diferentes tiempos de curado con el fin de determinar la resina más adecuada mediante normas como UNE-EN ISO 180:2020, ASTM D3039/D3039M-17, ASTM D2584, ASTM D2563-08 y AWWA D120-19, midiendo parámetros como la influencia del contenido de peróxido en el tiempo de gel. Se fabricaron probetas de cada resina reforzada con fibra de vidrio y se realizaron ensayos de impacto, ignición y tracción.

Se determinó que la resina roja fue la más apropiada para realizar los recubrimientos debido a que presentó mejores resultados en los ensayos de impacto, ignición, adhesión y tracción, cumpliendo con las normas establecidas. Además, se encontró que un tiempo de curado de 12 horas fue el óptimo para obtener los mejores resultados en los recubrimientos PRFV. Los recubrimientos obtenidos son adecuados para su uso en tanques de concreto vaciado en el acueducto comunitario San José del municipio de Envigado, Antioquia.

Palabras claves —Materiales compuestos, resina de poliéster, fibra de vidrio, recubrimientos tanques de acueducto.

ABSTRACT

In this academic practice report, the optimal conditions for the manual manufacture of glass-fiber reinforced plastic (GFRP) coatings were studied in order to evaluate their potential use in concrete tanks poured in the San José community aqueduct in Envigado. Two different types of resins, a pre-accelerated terephthalic resin (yellow) and an unmodified terephthalic resin (red) were used together with E-type MAT fiberglass to make the composite material. The curing time will end by varying the catalyst content, obtaining different curing times to determine the most suitable resin by standards such as UNE-EN ISO 180:2020, ASTM D3039/D3039M-17, ASTM D2584, ASTM D2563-08 and AWWA D120-19, measuring parameters such as the influence of peroxide content on gel time. Specimens of each fiberglass-reinforced resin were manufactured and impact, ignition and tensile tests were carried out.

It was determined that the red resin was the most appropriate to make the coatings because it presented better results in the impact, ignition, adhesion, and tension test, complying with the established standards. In addition, it was found that a curing time of 12 hours was the optimum to obtain the best results in the GFRP coatings. The coatings obtained are suitable for use in concrete tanks cast in the San José community aqueduct in Envigado, Antioquia.

Keywords —Composite materials, polyester resin, fiberglass, water tank coatings.

I. INTRODUCCIÓN

El acueducto comunitario de San José está ubicado en el sector La Palmera, zona 6 del municipio de Envigado, al sur del Valle de Aburrá en el departamento de Antioquia. Esta infraestructura fue creada en 1900 por la administración municipal y a lo largo de estos 122 años ha sido objeto de diferentes reparaciones y mejoras: una de las más importantes fue la elaboración de los tanques en concreto vaciado llevado a cabo en 1970. Con este acueducto veredal de uso complementario se surten actualmente 210 viviendas del sector, atendiendo aproximadamente a 1500 personas¹.

Debido a su largo tiempo de servicio y a las obsoletas tecnologías empleadas en su construcción, hoy se hace necesario el mejoramiento del tanque de almacenamiento estático de agua, el cual cuenta con una capacidad de 34.900 litros y el tanque de control del caudal con capacidad de 10.200 litros, los cuales operan a presión atmosférica y temperatura ambiental. Para este mejoramiento se planea emplear recubrimientos de polímeros reforzados con fibra de vidrio (PRFV) en la parte interna del tanque, conforme a la norma AWWA D120-19 [1], debido a que estos recubrimientos permiten impermeabilizar el tanque, disminuir considerablemente la formación de colonias de microorganismos patógenos y además son de fácil mantenimiento.

Estos materiales constituyen la mejor opción para realizar los recubrimientos de los tanques gracias a que entre sus principales propiedades, se tiene la elevada resistencia a la corrosión, la alta resistencia a tracción, su bajo peso y su bajo precio de procesamiento, si se comparan con otros materiales como los metálicos o los cerámicos [2]. Sin embargo, el carácter frágil que presentan al colapsar podría ser un impedimento. Esto ha conllevado a que la mayoría de los códigos y reglamentos sobre elementos de hormigón reforzados con PRFV recomienden diseños hiperreforzados [3]; es decir, presentan una cantidad de refuerzo superior a la cantidad balanceada, lo cual implica un cambio de mentalidad en cuanto a la filosofía que hoy existe para el diseño de elementos de hormigón armado con acero.

¹ Es complementario ya que se usa como agua de riego y para desarrollar actividades cotidianas ya que con este no se pueden preparar alimentos. En este caso se hace uso del acueducto de las Empresas Públicas de Medellín (EPM).

Actualmente, los polímeros reforzados con fibra de vidrio (PRFV), basalto (GFRP), carbono (CFRP), aramida (PRFA) o sus distintas combinaciones se producen en varios países y se utilizan cada vez más en el campo de la ingeniería, su estudio y tipología [4].

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El acueducto comunitario San José, como antes se mencionó, cuenta con dos tanques: uno que se utiliza como almacenamiento el cual tiene una capacidad de 34.900 litros y otro empleado como control de flujo con capacidad de 10.200 litros, ambos construidos en 1970 en concreto vaciado. Estos dos tanques actualmente presentan agrietamientos y problemas de humedad y filtración ya que han perdido gran parte del recubrimiento impermeabilizante debido a su prolongado uso (figura 1).



Fig. 1. Paredes del tanque de almacenamiento con desprendimiento del impermeabilizante.

Para reestablecer el estado de los tanques es necesario determinar el efecto del contenido de peróxido en el tiempo de curado sin comprometer las propiedades mecánicas finales de las resinas utilizadas. Esto con el fin de seleccionar la resina que muestre el mejor desempeño y ajustar los parámetros para su aplicación; también se evaluarán las propiedades físicas y mecánicas del recubrimiento con el fin de estimar su desempeño durante su vida en servicio. Estas pruebas,

cálculos y mediciones se realizarán en probetas para analizar su comportamiento. De esta forma se podrá seleccionar el sistema a aplicar que será escalado a los tanques para realizar el seguimiento de desempeño del recubrimiento implementado.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar el efecto de la cantidad de peróxido como acelerante en los tiempos de gel y curado de dos resinas de poliéster, así como en el desempeño físico y mecánico de recubrimientos PRFV obtenidos, para su aplicación en el tanque de almacenamiento y el tanque de control de caudal del acueducto comunitario San José.

B. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de los tiempos de gel y de curado en la adhesión de los recubrimientos PRFV en probetas de concreto para escalarlo a los tanques.
- Evaluar las propiedades mecánicas de las resinas reforzadas con fibra de vidrio obtenidas para identificar el material más adecuado para su posible uso en la fabricación de tanques.
- Analizar las posibles mejoras en el material compuesto final a partir de la búsqueda bibliográfica y los ensayos de laboratorio para ofrecerle al contratista la mejor opción de material.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1 Generalidades de las materias primas para la fabricación de laminados de PRFV:

En el mercado de los polímeros existen dos grandes clasificaciones: los polímeros termoplásticos y los polímeros termoestables. Los polímeros termoplásticos presentan excelentes propiedades químicas, pero tienen propiedades mecánicas que no pueden competir con los materiales termoestables cuando se exponen a altas temperaturas [5]. Las resinas de poliéster insaturado hacen parte de los polímeros termoestables, y se muestran como un líquido viscoso que cuando se le adiciona alguna solución química indicada se puede transformar en un material sólido, advirtiendo que este proceso no es reversible [6].

4.2 Materias Primas

Las materias primas utilizadas para la fabricación de las probetas ensayadas, cuyo proceso de manufactura es el contacto directo y proyección, fueron las fibras E tipo MAT y resinas de poliéster.

4.2.1 Resinas de poliéster insaturado

Entre las resinas de poliéster se puede encontrar como las más comunes: las ortoftálticas y las isoftálticas, también conocidas como pre-aceleradas y no pre-aceleradas (vírgenes) [6]. A continuación, se pasará a definir cada una de ellas:

- **Ortoftálticas.** De uso general en ambientes no agresivos.
- **Isoftálticas:** Buen desempeño mecánico, resistente al agua y a agentes químicos. Con neopentilglicol (ISO-NPG): alta resistencia química y al ambiente.

El proceso de cambio de estado líquido a sólido se llama curado o endurecimiento y se debe a una reacción exotérmica, es decir, que libera calor. Este cambio de estado no ocurre de inmediato y se le agregan promotores de solidificación (acelerador y catalizador); es una reacción que se da en el tiempo y se va generando gradualmente desde un estado líquido a un estado gelatinoso (conocido como tiempo de gel) y finalmente en estado sólido. El octoato de cobalto es el acelerante o

acelerador más comúnmente utilizado en las resinas de poliéster, mientras que el MEK es el catalizador más utilizado en este tipo de resinas [7].

Es necesario tener en cuenta que existen diversos factores que intervienen en el proceso de curado, de los cuales los principales son:

- El tipo de resina que se quiera emplear.
- La temperatura del lugar de trabajo.
- La cantidad de catalizador, acelerador.
- La humedad relativa en el lugar donde se quiera emplear.
- Espesor del laminado, cuyo aumento disminuye el tiempo de gelificación, y por ende llega a su estado sólido más rápido [7].

4.2.2 Catalizadores y acelerantes para resinas de poliéster

Para crear una pieza laminada con resina de poliéster, es necesario que la mezcla endurezca o solidifique mediante un proceso de gelificación. Esto se logra añadiendo un catalizador o un agente acelerante. Los catalizadores comúnmente utilizados son los peróxidos orgánicos, entre los cuales el MEK es uno de los más populares [8].

4.2.3 Fibras de vidrio

Por su parte las fibras de vidrio son fibras minerales fabricadas a partir de la mezcla de sílice, cal, alúmina y magnesita. A estas materias primas se le agregan diversos óxidos y se trituran finamente hasta obtener una mezcla uniforme que luego es llevada a un horno que supera los 1500 °C, una vez fundida esta mezcla es extruida y le son aplicados unos aditivos especiales según el tipo de fibra deseado, de esta forma se pueden obtener cinco tipos diferentes de fibras de vidrio [9][11] que se pueden clasificar en las siguientes tipologías:

- **Tipo E.** Se caracteriza por sus propiedades dieléctricas, sus excelentes propiedades mecánicas y su bajo costo. Su uso supera el 90% del total del mercado de la fibra de vidrio.
- **Tipo R.** Tienen las mejores propiedades mecánicas, lo cual las hace especiales en sectores específicos industriales (aviación, industria militar y aplicaciones avanzadas), pero su uso es limitado por su elevado costo.
- **Tipo D.** La principal característica de este tipo es su poder dieléctrico, es utilizado en la fabricación de antenas y radares, además presenta bajas propiedades mecánicas.

- **Tipo AR.** Estas poseen un alto contenido de óxido de circonio y buena resistencia a los álcalis.
- **Tipo C.** Presentan gran resistencia a diferentes agentes químicos.

4.2.4. Elección del tipo de fibra de vidrio

A continuación, en la tabla 1 se presentan los distintos tipos de fibras de vidrio:

- **Fibras tipo MAT.** Este material es ampliamente utilizado para laminados de PRFV debido a su facilidad de moldeo, bajo costo y uso común en aplicaciones de revestimiento sobre cemento [1].
- **Fibras tipo Woven Roving.** Este tipo de fibra genera laminados más resistentes a la tracción, ya que tiene tejidos más finos, el problema reside en que puede presentar zonas de debilidad y disminución de propiedades mecánicas por problemas de desprendimientos [10].
- **Fibras tipo Roving.** Se utilizan para reforzar capas de tejidos de vidrio y confiere resistencia y dureza.
- **Fibras de vidrio pre-impregnadas.** El tejido y los MAT se fabrican también impregnados con una mezcla de resina-catalizador que puede ser activado por medio de calor, a estos materiales se les llama: pre-preg [11].

Tabla 1. Resistencia a la tracción de los diferentes tipos de fibra de vidrio [12].

| Tipo de fibra | Resistencia a la tracción (MPa) |
|---------------|--|
| E | 3400 |
| R | 4400 |
| D | 2500 |
| AR | 3000 |
| C | 3100 |

4.3 Algunas formas de elaboración de polímeros reforzados con fibra.

Las formas de elaboración de polímeros reforzados con fibra más empleadas en la industria son los que se presentan a continuación:

4.3.1 Método de contacto directo

La fabricación de piezas suaves se logra a través de un proceso que implica el uso de herramientas simples como brochas o rodillos para moldear manualmente. El proceso implica aplicar la resina

directamente sobre las capas de fibra y es importante que el molde esté limpio y seco. Además, se debe aplicar un desmoldante en la superficie del molde para asegurar que la pieza se desmolde correctamente.

Estos desmoldantes son principalmente ceras o barnices a base de alcoholes polivinílicos; luego de la aplicación del desmoldante se debe dejar secar, además que éste puede ayudar a evitar poros en el resultado final; posteriormente se dispersa una capa de fibra y se aplica la resina con los espesores que se requieran. Esta resina debe estar mezclada con el acelerante o catalizador en 2% en peso de cantidad de resina, aplicación que se realiza con pincel o brocha y se dispersa con un rodillo para evitar porosidades.

Ventajas

- Ganancias en proporción de fibra de vidrio.
- Procedimiento más ágil.
- Posibilidad de automatización del paso del rodillo.

Desventajas

- Espesor del laminado y en ocasiones la homogeneidad depende del operario que realice la labor.
- Posible formación de microburbujas.
- Degradación de las herramientas utilizadas.
- Temperaturas adecuadas en la resina para evitar problemas de manejo (25 °C).

4.3.2 Inyección

Consiste en el llenado de un molde en el que ya se encuentra la fibra de vidrio de refuerzo, la cual debe ser cortada para adecuarla al molde. Se prepara el molde, se ubican las fibras en él, se vierte la resina, se cierra el molde y se aplica vacío hasta la gelificación. El cerrado del molde es un paso importante ya que éste puede producir pérdidas de resina por los bordes.

La presión que se maneje depende de factores como el tiempo de llenado, tamaño del molde, tipo de refuerzo empleado, tiempo de gelificación, viscosidad de la resina y distancia recorrida dentro del molde.

4.3.3 Prensado en caliente

Este proceso requiere moldes de acero que soporten temperaturas hasta de 150 °C y prensas hidráulicas; es importante mantener una temperatura uniforme en todo el molde o que ésta no tenga variaciones muy grandes. La superficie del molde debe estar pulida.

4.4 Generalidades de los recubrimientos PRFV

Los recubrimientos PRFV son una categoría de materiales conocida como materiales compuestos de matriz polimérica o *PMC* por su sigla en inglés. Un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes de manera que presenten la mejor combinación posible [13]. Esto quiere decir que se pueden potenciar las propiedades de cada fase para alcanzar el mejor desempeño estructural posible.

Las propiedades mecánicas y físicas de los PMC dependen del tipo, forma y orientación del material de refuerzo, longitud de las fibras y fracción (porcentaje) del volumen del material de refuerzo. Las fibras cortas son menos efectivas que las largas y sus propiedades son fuertemente afectadas por la temperatura y el tiempo bajo carga. Las fibras largas transmiten mejor la carga a través de la matriz, por lo que suelen usarse en aplicaciones críticas, en especial a temperaturas elevadas. A su vez, las propiedades físicas de los plásticos reforzados y su resistencia a la fatiga, termofluencia y desgaste dependen en gran medida del tipo y la cantidad de refuerzo [14].

Por lo general, se obtienen las mejores propiedades mecánicas de rigidez y resistencia de los PMC cuando las fibras se alinean en la dirección de la fuerza de tensión (figura 2), lo que quiere decir que el material es altamente anisotrópico y que las propiedades del material varían según la dirección en la que sean medidas. Por otro lado, las propiedades transversales de tal estructura reforzada unidireccionalmente son mucho más bajas que las propiedades longitudinales [15].

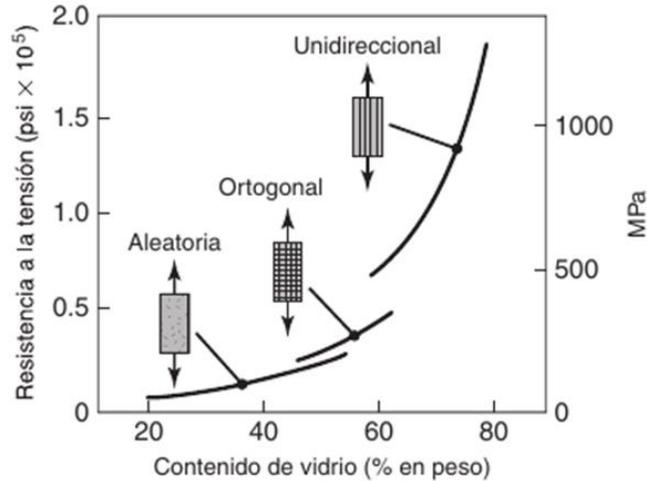


Fig. 2. Resistencia a la tensión del poliéster reforzado con vidrio en función del contenido de fibras y dirección de las fibras en la matriz [14].

El moldeo manual, como su nombre lo indica, es un método en el cual se aplican manualmente capas sucesivas de resina y refuerzo en un molde abierto para construir la estructura compuesta. El procedimiento básico consiste en cinco pasos [5]:

- 1) Se limpia el molde y se trata con un agente antiadherente.
- 2) Se aplica un recubrimiento delgado de gel (resina, posiblemente pigmentada con color) que se convertirá en la superficie externa de la pieza.
- 3) Después que el recubrimiento de gel ha fraguado parcialmente, se aplican capas sucesivas de fibra y resina en la fibra en forma de estera o tela; a cada capa se le pasa un rodillo para impregnar completamente la fibra con la resina y remover las burbujas de aire.
- 4) Se realiza el curado del componente.
- 5) Se retira del molde la pieza completamente endurecida.

Para este caso en específico el punto 1 y el 5 no aplican, ya que la pieza va a quedar dentro de la estructura del tanque actuando como un recubrimiento interno.

La gelificación es el proceso en el que el peso molecular alcanza su máximo durante la reacción de curado, generalmente se considera infinito. Esto significa que todos los monómeros están unidos a la red mediante un enlace químico. Aunque ocurre a nivel microscópico, tiene efectos macroscópicos ya que ocurre en un punto específico de la polimerización y en un grado específico de conversión [16].

La gelificación microscópica es difícil de medir ya que las propiedades medibles serían la solubilidad y el peso molecular. Sin embargo, la consecuencia de exceder el punto de gel microscópico es la gelificación macroscópica, la cual es mucho más fácil de medir. El punto de gel macroscópico es una propiedad mecánica y se puede identificar mediante técnicas comunes de análisis térmico, incluidas las pruebas in situ. Más allá de la gelificación, no hay aumento en el peso molecular, solo un aumento en la densidad de entrecruzamiento y una disminución en la longitud del segmento de cadena libre [16].

La gelificación no afecta significativamente la conversión química o la reacción de curado, por lo que no aparece en las mediciones de DSC. Sin embargo, tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas del polímero. De otro lado, la gelificación afecta la rigidez (módulo de Young), la adhesión y la procesabilidad general de los compuestos, por ello es importante desde el punto de vista del procesamiento industrial [16].

Por último, las técnicas de caracterización y desempeño que se emplearán en este proyecto corresponden a la normativa vigente para este tipo de materiales y servirán de base para la construcción de la ficha técnica de este recubrimiento:

- UNE-EN ISO 180:2020: Esta se realizará con el fin de analizar la tenacidad de las dos resinas diferentes a manejar [17].
- ASTM D3039/D3039M-17 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials” Pruebas mecánicas a los dos tipos diferentes de resinas [18].
- ASTM D2584-18 “Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins”. Prueba de DSC para determinar el porcentaje de pérdida por ignición [19].

Otros ensayos posibles:

- ASTM D2563-08 “Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts”.

Dichas normas están contempladas en la norma general empleada que se plantea desde la introducción “AWWA D120-19 thermosetting fiberglass-reinforced plastic tanks (Depósitos de

plástico reforzado con fibra de vidrio termoestable), para un control de estos tipos de uso de materiales, además son las normas que se aplican generalmente en los controles de calidad de EPM [20].

4.5 Pruebas de impacto (Izod)

Los compuestos de matriz polimérica son vulnerables al daño interno producido por un impacto. En varios casos no hay falla visible en la superficie, pero el daño interno puede ser grave, esto reduce la resistencia residual y la vida útil del arreglo compuesto.

El ensayo de impacto consiste en dejar caer un péndulo pesado, el cual a su paso golpea una probeta ubicada en unos soportes en la base de la máquina. Se debe dejar caer el péndulo desde un ángulo $\alpha = \pm 90^\circ$, para que la velocidad del péndulo, en el momento del golpe y en el punto de la nariz de golpeo, sea de 4.11 m/s. De esta manera se garantiza que cumpla con los requerimientos de la norma que especifica que la velocidad del péndulo en el momento del impacto debe estar entre 3 m/s y 6 m/s. Luego de golpear la probeta, el péndulo sigue su trayectoria alcanzando cierta altura que depende de la cantidad de energía absorbida por la probeta durante el impacto.

Las probetas que fallan en forma frágil se rompen en dos mitades, en cambio aquellas con mayor ductilidad (baja fragilidad) se doblan sin romperse. El ensayo Izod permite calcular cuánta energía logra disipar una probeta al ser golpeada por un pesado péndulo en caída libre. El ensayo entrega valores en Joules, además permite evaluar la diferencia entre probetas antes y después del ensayo.

La resistencia al impacto de los plásticos generalmente se mide mediante una prueba de péndulo con un martillo, cuyo borde de impacto golpea la muestra a partir del movimiento del péndulo. La fuerza de impacto se puede calcular como la energía requerida para causar la fractura. Las muestras de plástico generalmente se prueban con una muesca estándar en el centro para mejorar la repetitividad de los modos de daño o falla, pero también se puede usar una muestra completa sin muesca. Esta muestra se puede usar como un control de calidad rápido y fácil para determinar si un material cumple con las características de impacto específicas o para comparar la resistencia general al impacto de un material, como se muestra en la figura 3.

Existen varios métodos para determinar la resistencia al impacto, siendo los más comunes los martillos de impacto de péndulo para pruebas transversales (axiales) como Izod (ASTM D256, ISO 180) y Charpy (ASTM D6110, ISO 179).

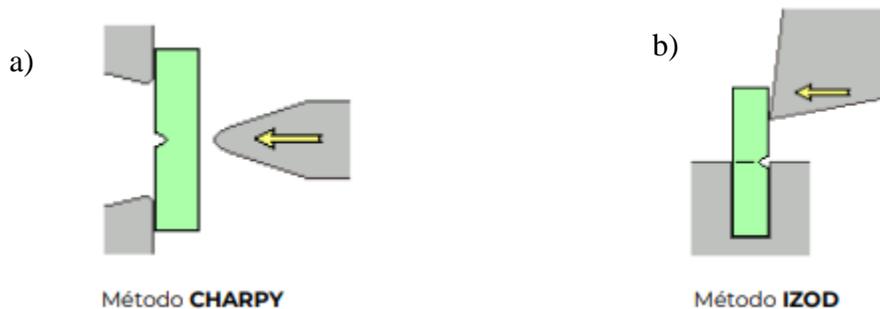


Fig. 3. Métodos para determinar la resistencia al impacto en materiales poliméricos o compuestos. a) método Charpy, b) método Izod [21].

4.6 Pruebas de ignición

Con el fin de realizar este ensayo se sigue la norma ASTM D2584-18 la cual determina que este método de prueba cubre la determinación de la pérdida por ignición de resinas reforzadas curadas. La pérdida por ignición representa el proceso de calcular el cambio en el peso de una muestra después de haber sido calentada a una temperatura alta haciendo que parte de su contenido se queme o se vaporice. El cambio de peso de la muestra se controla durante el calentamiento.

4.7 Pruebas de tracción

La prueba ASTM D3039 se cumple aplicando una fuerza de tracción a un prototipo mientras se miden paralelamente diversas propiedades del prototipo bajo tensión. Esto se realiza con una máquina de prueba universal (también conocida como máquina de prueba de tracción). La norma ASTM D3039 considera la medida de las siguientes propiedades de tracción:

- **Resistencia a la tracción.** La norma ASTM D3039 define la resistencia a la tracción como la carga máxima por unidad de área medida durante la prueba de tracción uniaxial de una probeta de material compuesto. La resistencia a la tracción se expresa en unidades de fuerza por unidad de área, como libras por pulgada cuadrada (psi) o megapascales (MPa). La prueba de tracción uniaxial se realiza aplicando una fuerza axial al material hasta que se produce la fractura. La resistencia a la tracción es una medida de la capacidad del material

para soportar cargas de tracción y se utiliza comúnmente en la ingeniería de materiales para evaluar la calidad y la idoneidad de los materiales para su uso en diversas aplicaciones.

- **Esfuerzo de tracción máximo.** La carga máxima soportada por una muestra durante una prueba de tracción dividida por el área original de la sección transversal de la muestra. Se expresa en unidades de fuerza por área, como libras por pulgada cuadrada (psi) o megapascales (MPa). Esta medida se utiliza comúnmente para caracterizar la resistencia mecánica de los materiales a la tracción y es una propiedad importante en la selección de materiales para aplicaciones de ingeniería [22].
- **Módulo de tracción.** También conocido como módulo de elasticidad en tracción, Se puede determinar a partir de un diagrama de tensión- deformación y se expresa en unidades de fuerza por unidad de área, como el Pascal (Pa) o el de libra por pulgada cuadrada (psi). El módulo de tracción es una característica importante de los materiales que se utilizan en aplicaciones estructurales como puentes, edificios y estructuras aeroespaciales, ya que indica su capacidad para soportar cargas y tensiones [22].
- **Relación de Poisson.** La relación del cambio en la deformación transversal a la deformación longitudinal entre dos puntos de deformación longitudinal (normalmente la misma que se usa para determinar el módulo, es decir, 0.1 a 0.3%) [23].

4.8 Pruebas de adhesión

Las pruebas de adherencia en recubrimientos de resina de poliéster se realizan para evaluar la capacidad del recubrimiento para adherirse de manera sólida y duradera al sustrato sobre el cual se aplica. Una forma común de realizar estas pruebas es mediante el uso de cinta adhesiva, donde se pega una cinta sobre el recubrimiento y luego se tira de ella con fuerza para verificar si el recubrimiento se desprende del sustrato. También se pueden utilizar otros métodos como la prueba de impacto, la prueba de raspado y la prueba de rayado. Es importante mencionar que estas pruebas de adherencia no son una garantía de que el recubrimiento no se desprenderá en el futuro.

En este trabajo de práctica se empleó el método estándar para medir la fuerza de adherencia por arranque de recubrimientos sobre concreto utilizando probadores portátiles de adherencia por arranque, conocido como el "método de tracción de adherencia" o el "método de tracción de punto", siguiendo la norma ASTM D7234-21. Este método consiste en aplicar una carga de tracción gradualmente aumentada sobre una pequeña área de la superficie del recubrimiento, mediante el uso de un probador portátil, hasta que el recubrimiento se despega del concreto. La fuerza de adherencia se calcula a partir de la carga máxima requerida para causar el despegue del recubrimiento.

V. METODOLOGIA

El procedimiento que se ejecutó a lo largo del proyecto se constituye de las siguientes etapas:

5.1 Elección de los materiales para ejecutar el proyecto

Teniendo en cuenta las ventajas que brinda el uso de recubrimientos de polímeros reforzados con fibra de vidrio (PRFV), se seleccionaron dos resinas de poliéster:

- i) Una resina de poliéster no saturada, tereftálica modificada, tixotrópica, de reactividad media baja viscosidad. Esta resina promueve por lo tanto la gelificación y el curado pueden realizarse a temperatura ambiente con la adición de Peróxido de Metil Etil Cetona al 50%.
- ii) Otra resina poliésterica, tereftálica, pre-acelerada, tixotrópica, diseñada para procesos de moldeo en general, laminación y recubrimientos de rápida impregnación en procesos de moldeo por contacto, que minimiza y optimiza los costos del proceso de laminación en sus diferentes versiones, además permite una rápida humectación de las fibras de vidrio y un rápido desmolde. Esta resina es apropiada para laminado manual y moldeo por aspersión (spray up) y está recomendada para la producción de todo tipo de productos reforzados con fibras de vidrio.

La primera de estas se denominará a lo largo de este documento como resina de poliéster tereftálico RESIGLAS®, la otra se denominará como resina preacelerada (resina preacelerada, en los anexos se adjunta su ficha técnica) siguiendo el mismo criterio de la anterior, además las fichas técnicas de estas resinas se adjuntan como anexos de este informe. Con respecto a las fibras de vidrio utilizadas fueron resinas de vidrio E tipo mat con una referencia P20 la cual es compatible con poliéster insaturado, éster de vinilo, epoxi y resinas fenólicas P20. Estas fibras de vidrio están diseñadas principalmente para su uso en el proceso de colocación manual y también adecuado para su uso en bobinado de filamento, moldeo por compresión y procesos continuos de laminación. Sus aplicaciones de uso final incluyen barcos, partes automotrices, tuberías resistentes a la corrosión química, tanques, torres de refrigeración y componentes de construcción. Estos materiales se determinaron ya que cumplen las exigencias de costo beneficio buscado por la Alcaldía de Envigado.

5.2 Medición del tiempo de gelificación de las resinas.

La prueba consistió en tomar una adaptación de la prueba ASTM D2471-99. Se utilizó 100 g de resina de poliéster en un recipiente y se agregó el catalizador empezando por 1% en peso lo cual indica la bibliografía [24] necesario para iniciar el proceso de curado y se midió el tiempo necesario para que la resina alcanzara el estado de gelificación. El tiempo de gelificación se determinó mediante la medición de la penetración de una varilla en el material. La varilla se insertó en el material y se midió la profundidad a la que se había alcanzado a insertar, siendo ésta aproximadamente la mitad de la mezcla viscosa en el recipiente. Una vez que la varilla ha alcanzado una profundidad específica, para esta prueba se realizaron 4 muestras tomando 100 gramos de cada resina y variando en cada una el porcentaje de peróxido empleado para la gelificación, utilizando el 1, 2, 4 y 8% de cantidad de peróxido en la mezcla con la resina, se considera que la resina ha alcanzado el estado de gelificación como se ilustra en la figura 4.



Fig. 4. Esquema de la prueba de tiempo de gelificación realizada.

Es importante tener en cuenta que el tiempo de gelificación puede variar dependiendo de varios factores como la composición química de la resina, la concentración del catalizador, la temperatura (23.4 °C) y la humedad (42%). Esta prueba se realiza para optimizar las condiciones de curado y garantizar que la resina se cure correctamente para su uso específico.

Los parámetros más importantes que se pretendieron evaluar en este proyecto fueron el tiempo de gel y el tiempo de curado el cual se puede realizar de las siguientes maneras. Una forma común de medir el tiempo de curado es mediante una prueba de secado a mano [25], donde se aplica la resina a una superficie y se marca el tiempo en el que se seca completamente. Otra forma común es medir la temperatura con un termómetro, ya que el tiempo de curado también puede variar dependiendo de la temperatura ambiente [25], siendo la primera la empleada en este trabajo (aproximadamente 12 horas), ya que conocer estos dos permite saber el tiempo en el que se puede realizar el proceso de laminación manual en los tanques y en qué momento el material puede entrar en servicio, esta prueba se llevó a cabo siguiendo parámetros según la norma ASTM D2471-99 (Método de prueba estándar para tiempo de gelificación y temperatura exotérmica máxima de resinas termoendurecibles reactivas).

5.3 Preparación de las probetas requeridas para realizar los ensayos propuestos en el proyecto.

Para elaborar las probetas necesarias en los diferentes ensayos propuestos se procedió de la siguiente manera:

Se partió de dos resinas poliéster diferentes (roja y amarilla) con el fin de evaluar las mejores prestaciones mecánicas que puedan brindar. El catalizador MEK peróxido fue seleccionado mediante revisión de la literatura y estudio previo de las fichas técnicas de las resinas, las cuales se agregan como anexos, este fue empleado en una dosificación que corresponde al 2% del peso de la resina como se muestra en la tabla 2. Esta proporción de catalizador da una ventana de trabajo de 15 minutos aproximadamente según lo registrado en la literatura para obtener las mejores propiedades mecánicas, debido a que en este tiempo la resina comienza su proceso de gelificación.

Tabla 2. Dosificaciones del catalizador y las resinas utilizadas en la elaboración de las probetas.

| Tipo de resina | Peso de la resina [g] | Peso del catalizador [g] |
|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Resina Roja | 191 | 3.82 |
| Resina Amarilla | 147 | 2.94 |

Para la fabricación de las probetas se agitó por 4 minutos la resina y el catalizador y luego se vació sobre el molde con la fibra de vidrio tipo MAT (fibras cortas aleatorias), recubriendo bien las fibras y eliminando las burbujas. Cabe mencionar que la resina amarilla había sido utilizada en ocasiones pasadas por la comunidad de la vereda para evitar filtraciones de agua.

Este último proceso se debe realizar en una sola etapa, ya que si se esparcen las resinas por partes es muy posible que la plancha se curve o se forme una interfaz entre las dos resinas que puede provocar una falla en el material.

5.3.1 Obtención de las probetas para las pruebas de tracción

Una vez se realizaron las planchas de material se procedió con el corte para formar unas probetas de 250 mm de largo, 25 mm de ancho y un espesor de 2.5 mm aproximadamente, para su posterior prueba de tracción, la cual se realizó por triplicado teniendo como base la norma ASTM D3039 para la realización de la prueba a posterior a pesar de que la norma recomienda el uso de 5 probetas, por motivos de escases de material se realizaron 3. También se obtuvieron las probetas para las pruebas de impacto con dimensiones de 10 x 80 x 4 mm según la Norma ISO 180. Finalmente se obtuvieron las probetas para el ensayo de ignición con dimensiones de 25 x 25 x 3 mm siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D2584-18, para determinar la cantidad de fibras empleadas; las probetas de referencia obtenidas se muestran en la figura 5.

Estas probetas fueron cortadas manualmente para cada prueba con un motor tool empleando un disco de carburo de silicio, por lo que las dimensiones no son precisas, sino aproximadas.



Fig. 5. Muestra de las probetas fabricadas para las pruebas de tracción.

5.3.2 Ensayos de tracción

En este ensayo se utilizaron probetas de dimensiones ya mencionadas las cuales se llevaron a una máquina universal de doble columna de marca Shimadzu AGSX 50KN con capacidad de carga de 5 toneladas, una precisión de carga de 0.1 Newton y una precisión de desplazamiento de 0.0001 milímetros, ubicada en el laboratorio de Procesamiento de Materiales Poliméricos. Las pruebas fueron llevadas con base a la norma ASTM D3039, ya que las probetas tenían unas dimensiones aproximadas de $250 \times 25 \times 2.5 \text{ mm}$ estas mediciones se sacan por medio de promedios que se tomaban con medidas de la probeta en diferentes zonas ya que para la resina preacelerada las probetas no tenían una uniformidad en su espesor. De las probetas de la resina amarilla se consideró realizar la prueba a pesar de la no homogeneidad del espesor para evaluarlas y tomar el riesgo que la prueba no fuera aceptada por si fallaba en zona no valida, debido a como ya se mencionó la escasez de la cantidad de resina en el momento de realizar la prueba a causa de que esta se realizó por segunda vez, debido a que la primera los resultados no fueron válidos. En la sección de análisis y resultados se representa en imágenes el proceso de la prueba (figura 6).



Fig. 6. Imágenes de la ejecución de la prueba de tracción realizada.

5.4 Ensayos de impacto Izod

Se obtuvieron probetas de resina de poliéster con fibra de vidrio de acuerdo con la norma ASTM D256, que establece que las dimensiones de la probeta deben ser 63,5 mm x 12,7 mm x 3,2 mm para luego llevarlas a una máquina de ensayo de impacto Izod. Previamente se utilizó un calibrador para tomar las medidas, luego de esto se verifica que la máquina de ensayo de impacto Izod esté calibrada y que cumpla con los requisitos de la norma ASTM D256, se limpian las probetas con un paño limpio y seco para eliminar cualquier contaminante que pueda afectar los resultados de la prueba, se procede a colocar la probeta en la máquina de ensayo de impacto Izod y asegurarla en su lugar con cinta adhesiva. Luego se eleva el martillo hasta la altura adecuada de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM D256 y soltarlo para que impacte la probeta, y se registra la energía absorbida por la probeta durante el impacto. Se debe repetir el proceso con las demás probetas para obtener una medida promedio de la energía absorbida.

Es importante seguir las recomendaciones de la norma ASTM D256 para asegurar la precisión y la reproducibilidad de los resultados. Además, es importante tomar medidas de seguridad adecuadas,

como usar guantes y gafas de seguridad, para evitar lesiones personales durante la realización de la prueba. Este ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Química de Polímeros de la Universidad de Antioquia. Los resultados de este ensayo se muestran en la sección de resultados y análisis.

5.5 Ensayos por ignición

Las probetas elaboradas para estas pruebas fueron medidas y pesadas previamente al ensayo. Seguidamente, fueron puestas en un refractario cerámico, que funcionara como crisol, y llevadas a un horno a 560 °C durante una hora, la cual se comenzó a contar en el momento en que el horno llegó a dicha temperatura. Posteriormente, los residuos de las probetas se dejaron enfriar y se procedió a pesarlos tal como se muestra en la figura 7. Este ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Compuestos de la Universidad de Antioquia.



Fig. 7. Proceso de la prueba de ignición: a) Medida de probetas. b) Puesta en el horno de calcinación. c) Muestras calcinadas. d) Residuos de fibra en cada probeta.

5.6 Ensayos de adherencia

Para realizar estos ensayos se montaron probetas sobre un bloque de cemento curado con las composiciones de catalizador que mejor se mostraron en el tiempo de gelificación las cuales corresponden al 2 y al 4%, posteriormente del curado de las probetas, se llevaron a corte de la geometría de los dollys utilizados para realizar la prueba del pull-off, para luego realizar su respectiva unión con una resina de metacrilato de la marca Loctite, la cual es recomendada en la norma. Finalmente se acoplaron los dollys en el equipo de pull-off para generar el desprendimiento de este por la presión que se registre en el display del dispositivo del ensamble. Esta prueba se muestra en la figura 8.

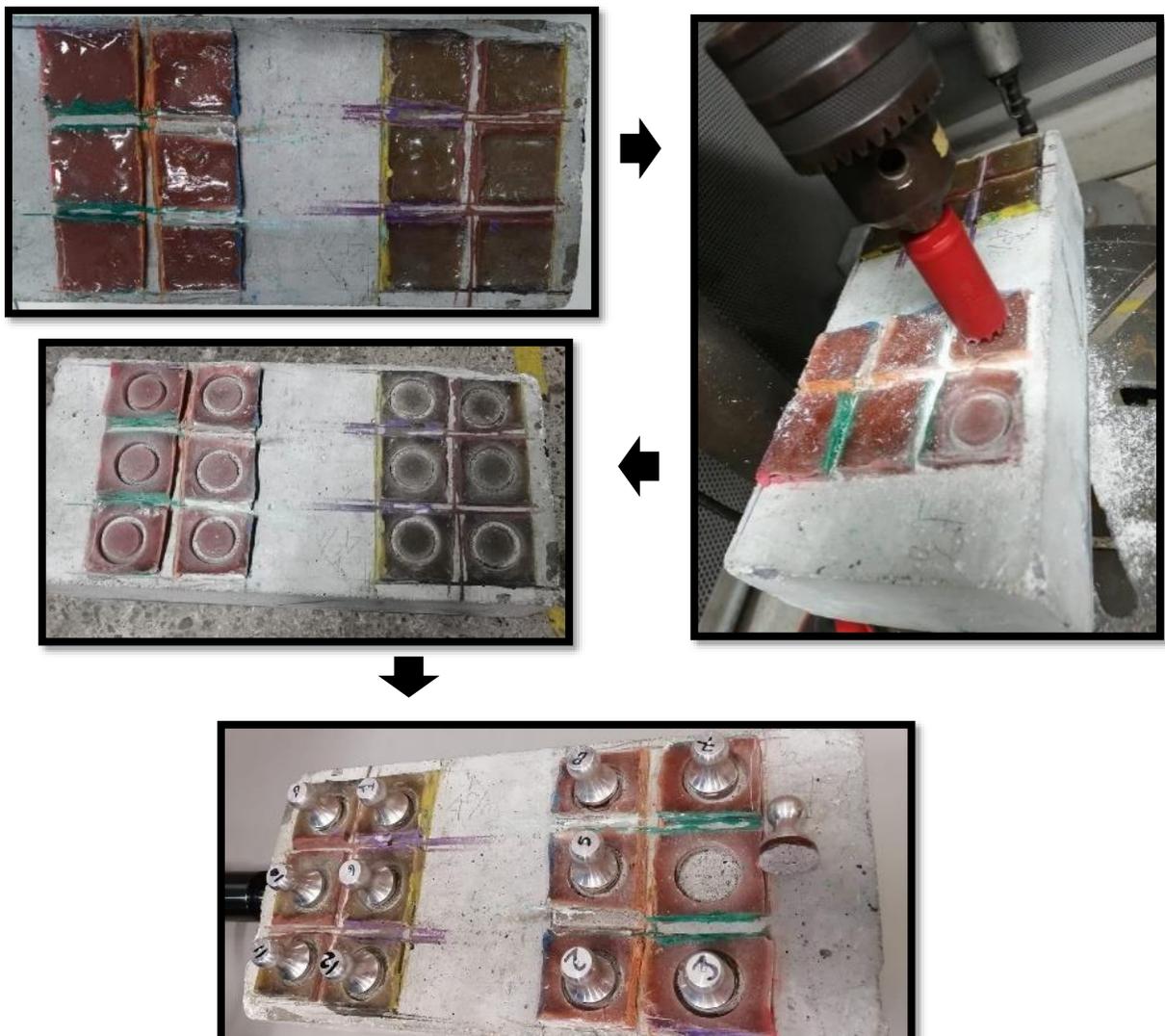


Fig. 6. Esquema de la elaboración de la prueba de adherencia.

VI. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de las diferentes pruebas realizadas se presentan a continuación:

6.1 Resultados de la prueba de tiempo de gelificación

Los resultados de las pruebas de gelificación consistieron en los tiempos de gelificación mostrados en la figura 9 e incrementos en la temperatura de cada una de estas mostradas en la figura 10.

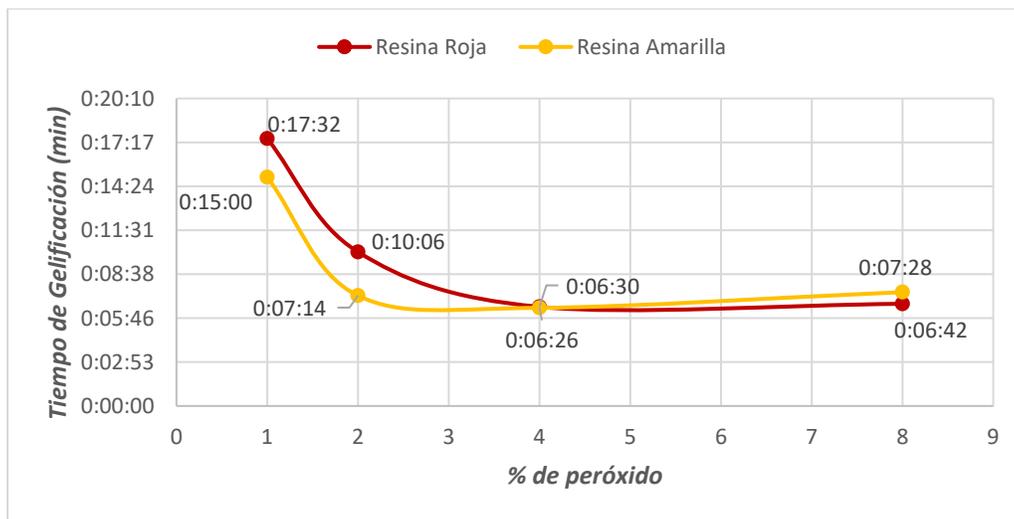


Fig. 7. Gráfico Tiempo de gelificación vs porcentaje de peróxido en las resinas estudiadas.

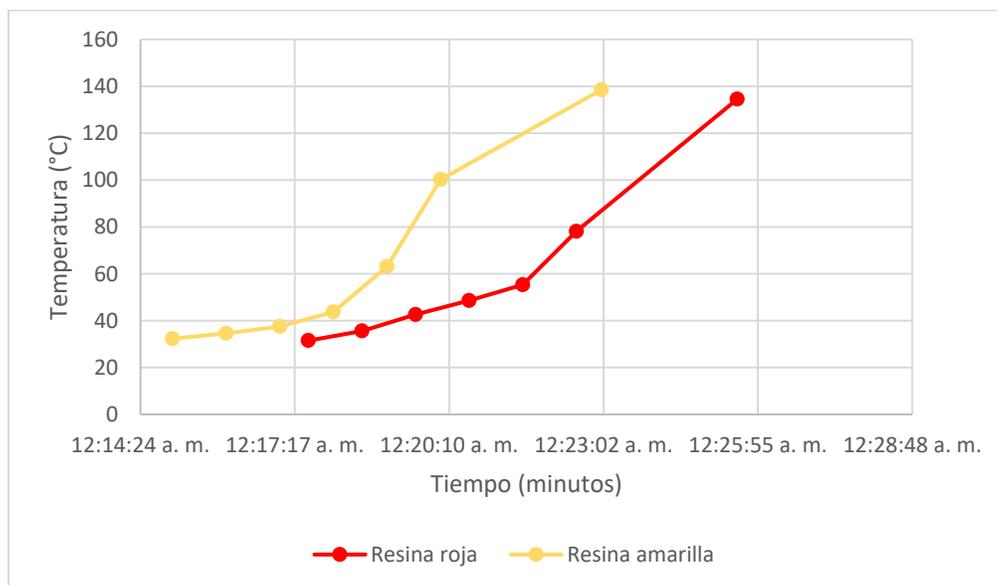


Fig. 8. Gráfico temperatura vs tiempo

Los resultados de esta prueba pueden ser explicados ya que una resina de poliéster preacelerada (resina amarilla) tiene un tiempo de gel menor que una resina de poliéster tereftálico (resina roja) debido a que contiene un agente de aceleración, conocido como Octoato de Cobalto que reacciona con el catalizador (Peróxido) en la resina para acelerar el proceso de curado. Sin este agente de aceleración, el proceso de curado de la resina de poliéster tereftálico puede ser más lento. Esto también se puede evidenciar en la figura 10 ya que la resina amarilla alcanza las mismas temperaturas que la resina roja en tiempos más cortos, lo que indica que la liberación de energía es favorecida por el acelerador. Sin embargo, esto también puede afectar a la reticulación de la resina, ya que la reticulación se refiere al proceso de formación de enlaces cruzados entre las moléculas de la resina, lo que resulta en una estructura más resistente y estable. Si el proceso de curado es demasiado rápido, puede dar lugar a una reticulación incompleta, lo que puede afectar negativamente a las propiedades mecánicas y químicas de la resina. Por lo tanto, es importante encontrar un equilibrio adecuado entre el tiempo de gel y la reticulación en el diseño de resinas. Además, el tiempo de gel se refiere al tiempo en el que la resina ha solidificado lo suficiente como para no dejar marcas al ser tocada y el tiempo de curado es el tiempo necesario para que la resina alcance su resistencia final el cual se midió por un ensayo visual.

6.2 Resultados y análisis de las pruebas de impacto Izod

Cumpliendo los parámetros de la norma ISO 180 se probó la capacidad de las probetas para absorber energía durante la deformación plástica. Es importante mencionar que esta prueba se realizó sin entalla para determinar la resistencia al impacto, calculando las pérdidas por fricción que se presentaron en las probetas, las cuales se fabricaron con los mismos lineamientos que se expusieron en la metodología en el ítem 5.4, esta prueba se realizó por triplicado. Durante estas pruebas se generó fractura completa en las probetas, proporcionando la energía que soportan las resinas a la fractura por impacto. Los resultados de esta prueba se presentan en las figuras 11 y 12 y las tablas 3 y 4, que corresponden a la resina amarilla y roja, respectivamente.

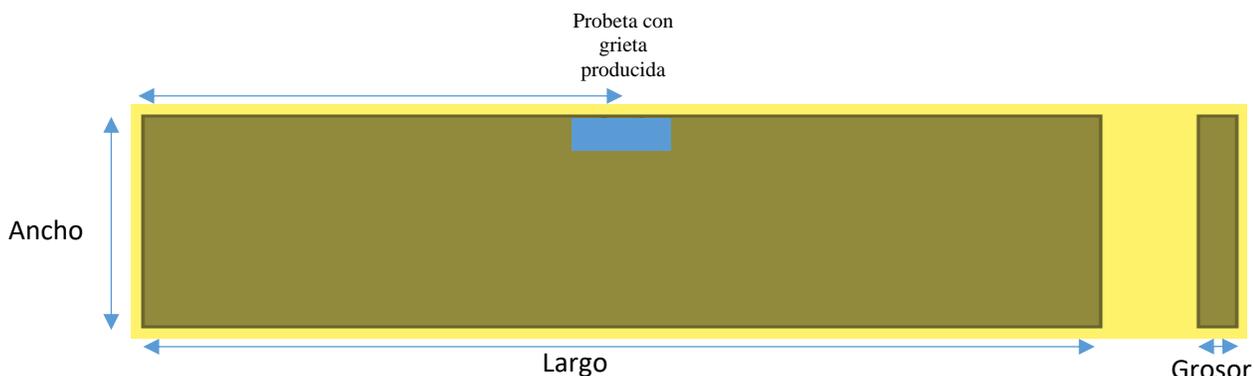


Fig. 11. Diagrama de dimensiones prueba Izod de la resina amarilla.

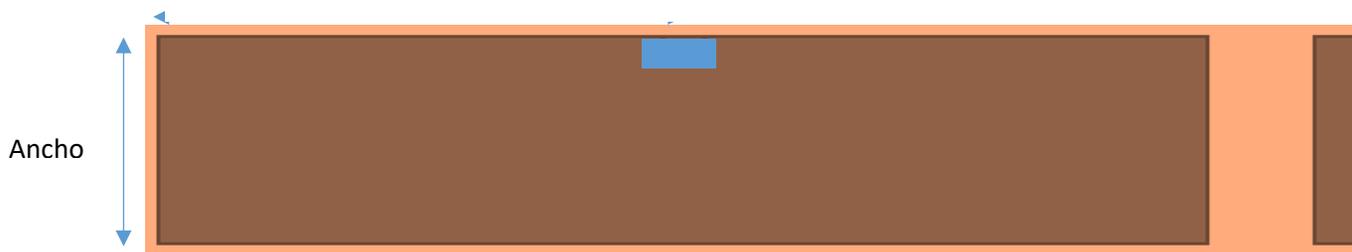


Fig. 12. Diagrama de dimensiones prueba Izod de la resina roja.

Tabla 3. Tabla de resultados de las pruebas Izod para resina amarilla.

| Probeta | Ancho [mm] | Largo [mm] | Grosor [mm] | Energía [J] | ¿Fractura Completa? |
|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|
| 1 | 9.10 | 79.00 | 3.79 | 0.05 | SI |
| 2 | 10.90 | 79.50 | 3.84 | 0.55 | SI |
| 3 | 10.40 | 81.70 | 3.80 | 0.15 | SI |
| <i>Promedio</i> | 10.13 | 80.07 | 3.81 | 0.25 | - |

Tabla 4. Tabla de resultados de las pruebas Izod para resina roja.

| Probeta | Ancho [mm] | Largo [mm] | Grosor [mm] | Energía [J] | ¿Fractura Completa? |
|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|
| 1 | 8.95 | 78.93 | 3.56 | 1.20 | SI |
| 2 | 11.70 | 79.88 | 3.65 | 0.50 | SI |
| 3 | 10.42 | 81.90 | 3.79 | 0.85 | SI |
| <i>Promedio</i> | 10.36 | 80.24 | 3.67 | 0.85 | - |

Como se puede observar en los resultados de la prueba de impacto, la resina roja absorbe más energía, ya que la capacidad de una resina para absorber energía de impacto depende de varios factores como su estructura molecular, su densidad, su resistencia química y térmica, entre otros. En general, las resinas de poliéster tereftálico (roja) tienen una mayor resistencia al impacto que las resinas de poliéster preaceleradas (amarilla) debido a su estructura molecular [26].

El poliéster tereftálico es un termoplástico cristalino que tiene una alta densidad y una estructura molecular ordenada. Esta estructura molecular proporciona una alta resistencia mecánica y térmica, lo que la hace útil en aplicaciones que requieren una alta resistencia al impacto. Además, el poliéster tereftálico tiene una alta resistencia química y es resistente a la degradación por la exposición a la luz ultravioleta (UV), lo que lo hace útil en aplicaciones al aire libre.

Por otro lado, las resinas de poliéster preaceleradas son resinas que han sido formuladas con un acelerador químico para reducir su tiempo de curado. Estas resinas tienen una estructura molecular menos ordenada y una densidad más baja que las resinas de poliéster tereftálico, lo que resulta en una menor resistencia al impacto. Sin embargo, es importante tener en cuenta que otros factores pueden afectar la resistencia al impacto de una resina, como la temperatura, la carga y las condiciones de prueba. Por otro lado, las resinas de poliéster preaceleradas son resinas termoestables que se han formulado con un acelerador químico para reducir el tiempo de curado. Debido a su formulación, la estructura molecular de estas resinas es menos densa y regular, lo que resulta en una menor resistencia al impacto y a la deformación.

En conclusión, la capacidad de una resina para absorber energía de impacto depende de su estructura molecular, su densidad y su resistencia mecánica y térmica. La resina de poliéster tereftálico es una resina termoestable que se compone de una cadena de unidades repetitivas de ésteres de ácido tereftálico y glicoles. La estructura molecular del poliéster tereftálico es más densa y regular que la de las resinas de poliéster preaceleradas, lo que significa que tiene una mayor resistencia al impacto y a la deformación. No obstante, es importante tener en cuenta que cada material tiene sus propias características y propiedades únicas[27]. Esto indica que esta resina se comporta mucho mejor respecto a la disipación de energía por impacto, la cual se postula como candidata de material a utilizar en los recubrimientos que se propondrán para los tanques afectados resumiendo los resultados de la prueba (figura 12).

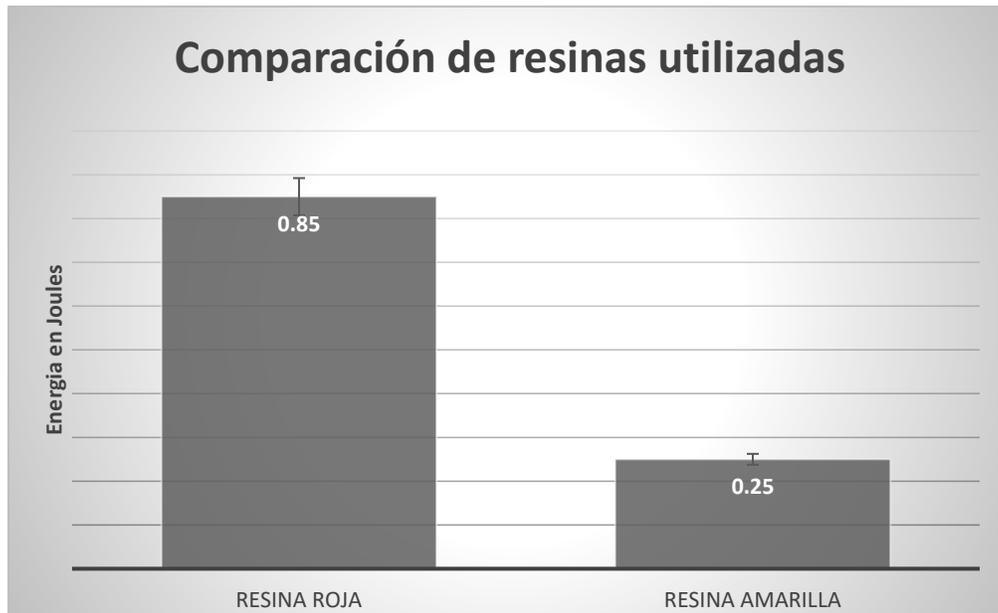


Fig. 9. Resultados de las pruebas Izod para las dos resinas utilizadas.

6.3 Resultados de ensayos por ignición

Estos cálculos se efectuaron de acuerdo con la norma ASTM D2584-18 y ASTM 2734-09. El objetivo de este ensayo es lograr calcular las fracciones volumétricas de cada probeta, mediante el método de incineración de resina (matriz). Las probetas fueron introducidas en una mufla, a una temperatura de 560 °C por un lapso de 1 hora, con el fin de eliminar la matriz del material compuesto, una vez desintegrada la matriz, se obtuvo el peso de la fibra de vidrio w_f , el peso de la matriz fue obtenido mediante la ecuación 1.

$$\omega_r = \omega_{prob} - \omega_f \quad (1)$$

Siendo ω_r el peso de la resina, ω_{prob} el peso de la probeta y ω_f el peso de la fibra. Una vez obtenido el peso de los constituyentes y conociendo las densidades de cada uno, se obtiene el volumen de la matriz V_m , y de fibra de vidrio V_f . La fracción volumétrica de la matriz V_r y la fracción volumétrica de la fibra de vidrio V_f , son obtenidos dividiendo el volumen del constituyente entre el volumen de la probeta V_{prob} , así mismo la fracción volumétrica de porosidad se obtiene mediante la ec. 2. En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en esta prueba. La densidad aparente de estas probetas se realizó mediante el ensayo de Arquímedes.

$$V_{porosidad} = -V_r - V_f \quad (2)$$

Tabla 5. Resultados de las pruebas de ignición.

| | Resina Roja | | | Resina Amarilla | | |
|--|-------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
| largo (mm) | 25.00 | 24.00 | 23.00 | 25.00 | 24.00 | 25.00 |
| ancho(mm) | 25.00 | 25.00 | 24.00 | 25.00 | 26.00 | 26.00 |
| espesor (mm) | 3.00 | 2.70 | 2.60 | 3.00 | 2.80 | 3.10 |
| Volumen probeta (mm³) | 1,875.00 | 1,620.00 | 1,435.20 | 1,875.00 | 1,747.20 | 2,015.00 |
| peso muestra sola (g) | 2.72 | 2.48 | 2.70 | 2.52 | 2.95 | 2.99 |
| peso muestra + refractario (g) | 48.35 | 42.91 | 46.58 | 41.07 | 39.16 | 42.33 |
| peso después de ensayo (g) | 46.99 | 41.73 | 45.40 | 39.44 | 37.88 | 40.04 |
| Peso resina (g) | 1.36 | 1.19 | 1.19 | 1.63 | 1.28 | 2.29 |
| peso fibra (g) | 1.36 | 1.30 | 1.51 | 0.89 | 1.67 | 0.70 |
| Volumen de la resina (mm³) | 1,046.85 | 911.54 | 912.85 | 1,256.61 | 982.15 | 1,758.62 |
| Volumen de las fibras(mm³) | 454.10 | 432.20 | 502.80 | 295.30 | 558.17 | 234.73 |
| fracción volumétrica resina | 0.56 | 0.56 | 0.64 | 0.67 | 0.56 | 0.87 |

| | | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| fracción volumétrica fibra | 0.24 | 0.27 | 0.35 | 0.16 | 0.32 | 0.12 |
| Promedio fracción por resina | | 0.28 | | | 0.20 | |
| fracción volumétrica porosidad | 0.20 | 0.17 | 0.01 | 0.17 | 0.12 | 0.01 |

Como se puede apreciar en la tabla 5 la fracción volumétrica de fibra en la resina roja es 28%, mayor a la fracción volumétrica en la resina amarilla 20%. A pesar de que el contenido de fibras en capas es el mismo, esto se atribuye a que pudo haber capas de fibra utilizada con menos peso que otras; para mejorar esta prueba se recomienda pesar las fibras antes de adicionarlas y no sacarlas por medidas ya que algunos tejidos suelen tener más cantidad que otros. Esto podría responder también el resultado anterior de la energía de impacto ya que las fibras de vidrio actúan como material de refuerzo en el compuesto disipando la energía de impacto por todo el material.

6.4 Resultados prueba de tracción

Para esta prueba lo primero que se realizó es una medida de cada una de las probetas que se llevaron a falla, contando con 6 probetas en total, siendo 3 de ellas amarillas (resina preacelerada) y 3 rojas (resina tereftalica). Se evaluó una probeta adicional de resina amarilla buscando realizar un ensayo en una probeta con agrietamiento y estudiar su comportamiento. Esta resina ya había sido utilizada por la comunidad para evitar filtraciones. Las medidas obtenidas se muestran en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Dimensiones promedio de las probetas de resina amarilla para pruebas de tracción en milímetros.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| Largo | 251 | 250 | 252 |
| Ancho | 25.2 | 25.3 | 25.1 |
| Espesor | 2.4 | 2.5 | 2.4 |
| Área efectiva | 60.48 | 63.25 | 60.24 |

Tabla 7. Dimensiones promedio de las probetas de resina roja para pruebas de tracción en milímetros.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Largo | 250 | 249 | 252 |
| Ancho | 25.1 | 25.1 | 25 |
| Espesor | 2.5 | 2.6 | 2.5 |

| Área efectiva | 62.75 | 65.52 | 62.5 |
|---------------|-------|-------|------|
|---------------|-------|-------|------|

Luego de obtener los datos, se procedió a su análisis, de los cuales se obtiene la figura 13 correspondiente a la resina amarilla parte a) y roja parte b), en estas imágenes se observan los gráficos de deformación vs esfuerzo, que constituyen los datos suministrados en el momento de la prueba calculando el esfuerzo con la fuerza proporcionada y la deformación con el desplazamiento de la probeta usando sus dimensiones (ver anexos hojas de cálculo).

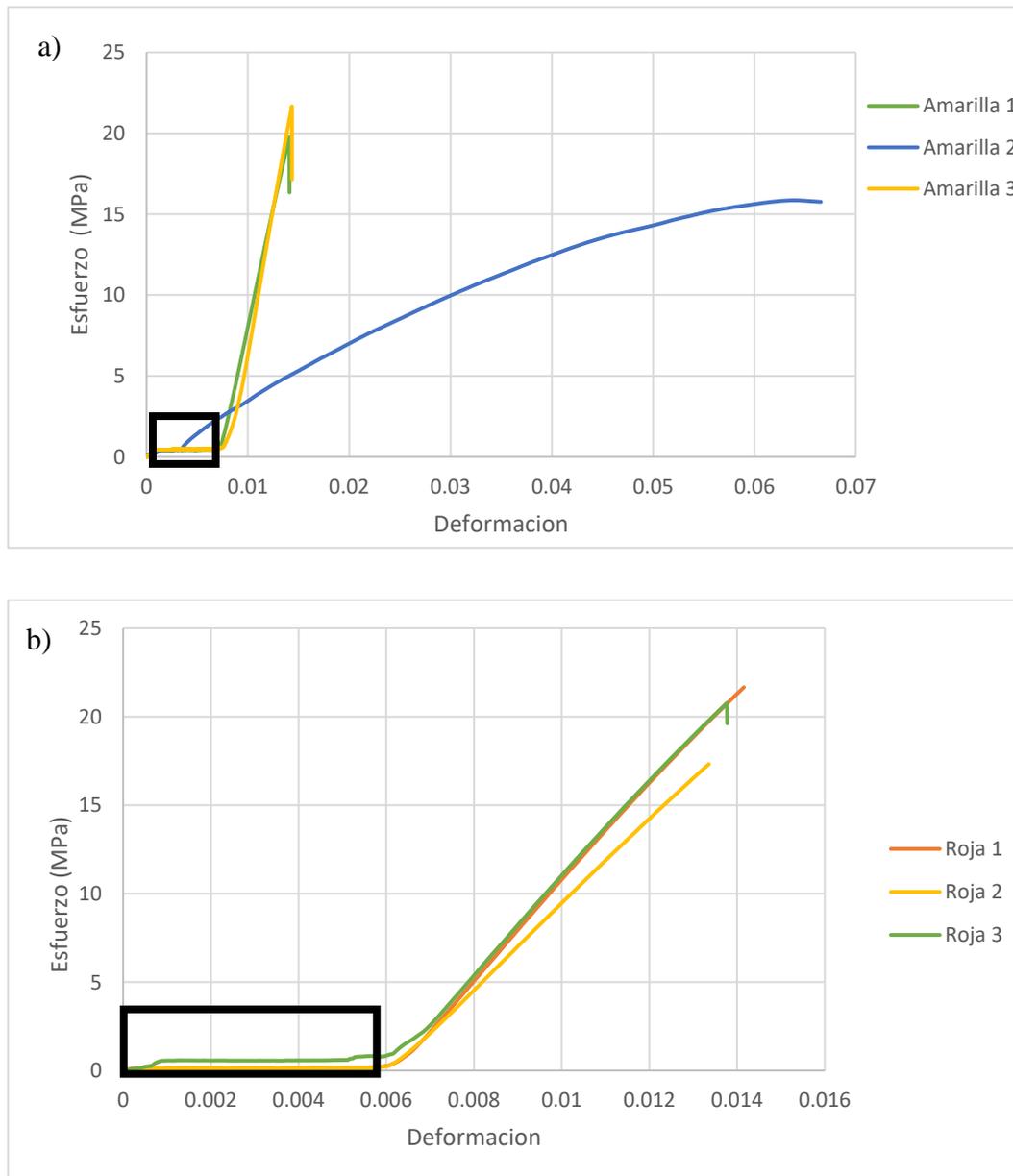


Fig. 10. Gráficos deformación vs esfuerzo. a) resina amarilla b) resina roja.

Es necesario realizar el ajuste de la figura 13 donde se da la acomodación de las mordazas, zona mostrada en el recuadro negro para conocer la verdadera deformación a la que estuvieron sometidas las probetas. Para realizar el ajuste se realizará una nueva gráfica donde se descartarán los primeros datos correspondientes a dicha zona y solo se tomarán los datos de la parte lineal de las respectivas curvas, en este caso se reajustó la curva a cero ya que este ajuste tiene importancia en el valor de la pendiente del ajuste lineal que es el dato que se requiere, estos datos responden a la deformación que está asociada o causada por la acomodación de las mordazas.

Con respecto a la evaluación de los módulos de Young de las diferentes probetas ensayadas se presentan en la figura 14 para la resina amarilla y en la figura 15 para la resina roja. Dicho módulo se calcula con la pendiente de la línea de deformación del material en la zona elástica, el cual corresponde al comportamiento lineal de la probeta ensayada. Cabe aclarar que la probeta 2 amarilla fue realizada en unas condiciones diferentes de velocidad en comparación a las demás probetas (4.45mm/min), mientras que los demás ensayos registrados se realizaron a una velocidad un poco superior (5 mm/min), razón por la cual sólo se tienen en cuenta las probetas ensayadas en las mismas condiciones de prueba.

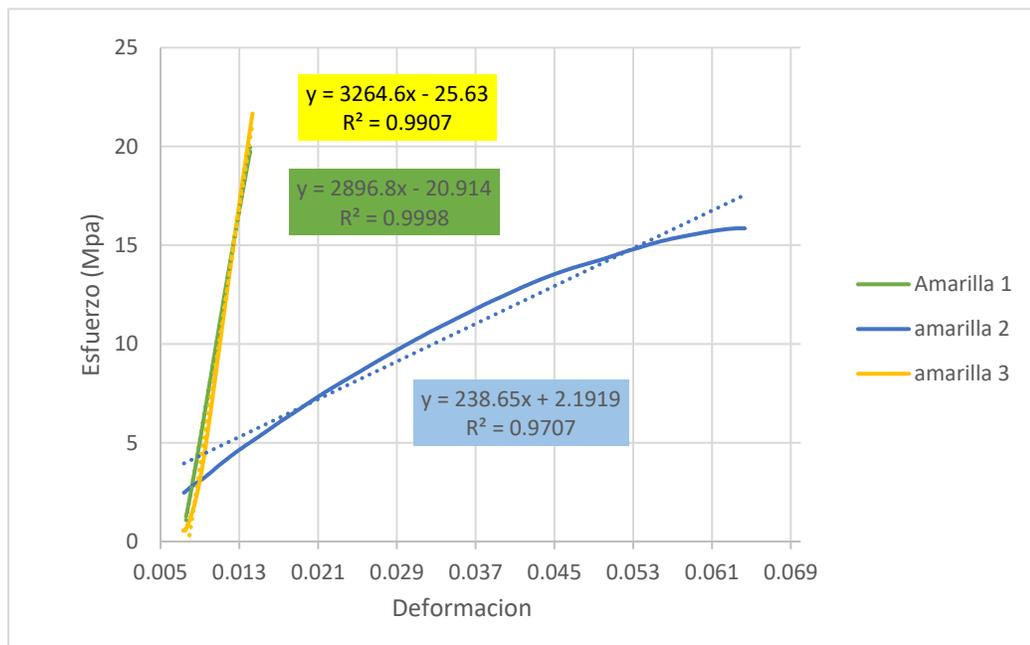


Fig. 11. Gráfica deformación vs tensión para la resina amarilla

A partir de la gráfica de la figura 15 se pueden hacer varias observaciones; la primera es que como estas probetas se fallaron en las mismas condiciones de ensayo, presentan un comportamiento bastante similar y generan módulos de Young cercanos los cuales oscilan entre 2.2 y 5 GPa, lo cual está acorde a lo reportado en la literatura para este tipo de material[28], [29]

En la tabla 8 se muestra un resumen con las propiedades mecánicas de estas resinas y de este se extraen medidas estadísticas importantes para tomar conclusiones de cuál de las resinas brinda mejores propiedades mecánicas. En la tabla se presentan los datos por triplicado, pero solo se analizan por duplicado ya que como antes se mencionó, en la resina amarilla se realizó uno de los ensayos con una velocidad de prueba más baja y esto permite que el material se comporte más plástico ya que esto afecta los resultados de la prueba de las siguientes maneras:

En las propiedades mecánicas la velocidad de la prueba de tracción puede afectar las medidas, como el módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción y la elongación en la fractura. En general, se ha observado que, a velocidades más altas, la resina de poliéster tiende a ser más rígida y frágil, lo que puede resultar en una menor elongación en la fractura [30]. Desde las propiedades mecánicas las resinas de poliéster pueden ser viscoelásticas y su comportamiento podría depender de la velocidad de aplicación de la carga. La velocidad de la prueba de tracción puede afectar la tasa de fluencia y relajación del material, lo que puede afectar las propiedades mecánicas medidas [30], [31]. En general, es importante seleccionar una velocidad de prueba adecuada que sea representativa de las condiciones a las que estará expuesta la resina de poliéster en la aplicación real, la cual correspondía a 5 mm/min según la norma ASTM D3039. Es por esto que los datos estadísticos se calculan con los dos valores válidos para la prueba.

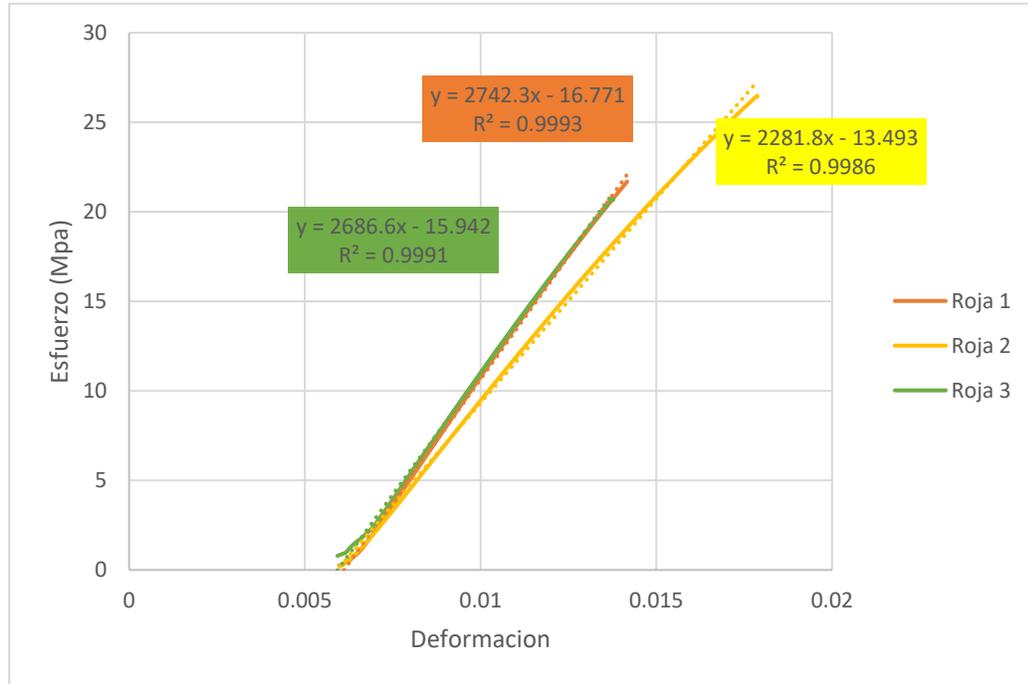


Fig. 12. Gráfica deformación vs tensión para la resina roja.

A partir del análisis de los resultados, se percibe que la resistencia a la tracción de la resina tereftálica es un poco mayor que la otra resina manejada en este trabajo, que es la resina preacelerada con valores de 20.69 y 21.3 respectivamente, esto debido a lo ya antes mencionado en la prueba de impacto desde su naturaleza química ya que esta prueba fue necesario realizar una repetición para que estos datos fueran valederos [26]. Por otro lado, apreciando la desviación estándar y el coeficiente de variación de este dato se observa que son datos mucho menos dispersos en la resina de poliéster tereftálico (roja) que en la resina preacelerada (amarilla) esto se asegura por los valores obtenidos, realizando la salvedad del número de datos tomados. Analizando la deformación unitaria se aprecia que ésta es más alta en la resina amarilla 0.014226 que en la resina roja, esto debido a que la primera tiene mayor flexibilidad y menor rigidez ya que tienen mayor cantidad de grupos insaturados lo que le puede permitir mayor deformación hasta alcanzar el punto de fractura[26] [27].

Por último, examinando los datos obtenidos de módulos de Young, se obtienen valores que aunque son acordes a la literatura, se esperaba que el módulo de la resina roja fuera más alto que el de la resina amarilla, pero esto no fue así ya que en la tabla se observa que los promedios de los módulos

para estas resinas fueron 3.08 GPa para la resina amarilla y 2.71 GPa para la resina roja. Este desfase de 0.38 GPa obedece al comportamiento de la resina amarilla número 3 que presentó un módulo bastante alto, esto puede obedecer a muchos factores, entre estos a que la orientación de las fibras en dicha resina estaba de manera más adecuada para otorgarle rigidez, ya que el contenido del refuerzo si estaba igual en todas las probetas falladas. Este valor tan alto genera una dispersión de los datos un tanto alta según los demás datos estadísticos obtenidos, lo que podría generar un posible argumento a este resultado.

Tabla 8. Propiedades mecánicas de las resinas extraídas de las pruebas de tracción

| Propiedades Mecánicas resina preacelerada | | | |
|---|---------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Propiedad | Resistencia a la tracción (MPa) | Deformación unitaria | Módulo Elástico (MPa) |
| 2 | 15.85 | 0.0643296 | 238.65 |
| 1 | 19.71 | 0.0141062 | 2896.81 |
| 3 | 21.67 | 0.0143451 | 3264.64 |
| Promedio | 20.69 | 0.014226 | 3080.70 |
| Desviación estándar (Dispersión) | 1.39 | 0.000169 | 260.070 |
| Coefficiente de variación | 6.7% | 1.2% | 8.4% |
| Propiedades Mecánicas resina tereftálica | | | |
| Propiedad | Resistencia a la tracción (MPa) | Deformación unitaria | Módulo Elástico (MPa) |
| 3 | 20.77 | 0.013766369 | 2686.61 |
| 1 | 21.69 | 0.0141696 | 2742.35 |
| 2 | 26.50 | 0.017871261 | 2281.83 |
| Promedio | 21.23 | 0.013968 | 2714.45 |
| Desviación estándar (Dispersión) | 0.65 | 0.000285 | 39.38 |
| Coefficiente de variación | 3.1% | 2.0% | 1.5% |

6.5 Resultados prueba de adherencia

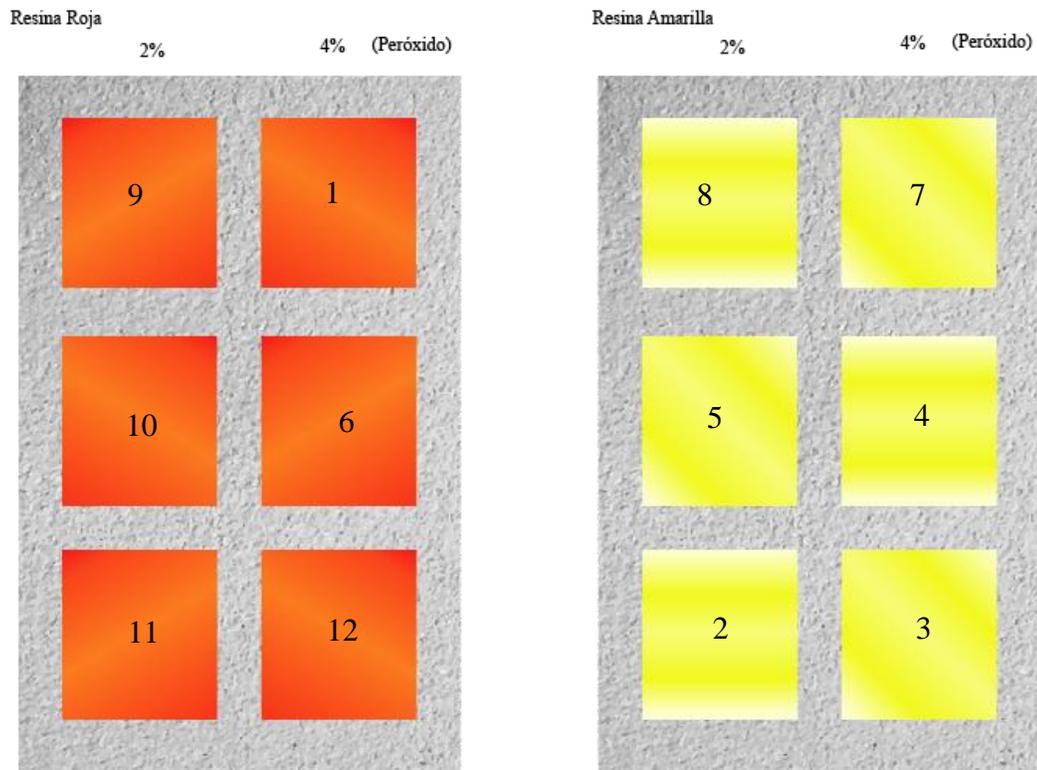


Fig. 13. Esquema de la distribución de los dollys en los ensayos de adherencia.

En la figura 16 se presenta la distribución de numeración de los dollys usados para realizar la prueba de adherencia y en la tabla 8 los resultados de la presión ejercida para cada Dolly, la fuerza calculada a partir del área del Dolly la cual es de 20 milímetros.

Tabla 9. Resultados de la prueba de adhesión

| | Resina amarilla | | | | Resina roja | | |
|------------|------------------|-----------------|----------------------|------------|------------------|---------------|----------------------|
| % Peróxido | Número del dolly | Presión (MPa) | Fuerza calculada (N) | % Peróxido | Número del dolly | Presión (MPa) | Fuerza calculada (N) |
| 2% | 9 | 0.97 | 19.40 | 2% | 8 | 1.44 | 47.71 |
| | 10 | 2.05 | 41.00 | | 5 | 0.71 | 23.52 |
| | 11 | 1.95 | 39.00 | | 2 | 1.19 | 39.43 |
| 4% | 1 | 1.73 | 57.32 | 4% | 7 | 1.50 | 49.70 |
| | 6 | 0.76 | 25.18 | | 4 | - | - |
| | 12 | 1.81 | 59.97 | | 3 | 2.17 | 71.90 |
| | | Promedio 2% | 33.13 | | | promedio 2% | 36.89 |
| | | promedio 4% | 47.49 | | | promedio 4% | 60.80 |
| | | desviación n 2% | 11.94 | | | desviación 2% | 12.29 |
| | | desviación n 4% | 19.37 | | | desviación 4% | 15.70 |
| | | | | | | | |

Desde los datos obtenidos se tiene que la mejor adherencia se obtuvo de la resina roja al 4%, aunque hay que resaltar que en el momento de la medición del Dolly enumerado con 4 no se estimó la presión ejercida por motivos de olvido de programación del dispositivo. A pesar de este percance, el Dolly falló desde el sustrato y se podría inferir que su presión era alta, ya que el Dolly falló con una cantidad considerable de sustrato similar al número 3. También es de resaltar que el Dolly marcado con amarillo número 10 de la resina amarilla, falló por la pega que se utilizó para la unión del recubrimiento con el Dolly, por eso este dato no es tomado en cuenta. La adición de un acelerador en la resina amarilla puede disminuir las propiedades mecánicas en el recubrimiento final [27], [33]. Los aceleradores son utilizados para aumentar la velocidad de curado de la resina,

pero pueden también afectar la estructura y las propiedades de la resina curada. Sin embargo, algunos aceleradores tienen menos efectos sobre las propiedades mecánicas que otros y pueden ser seleccionados para minimizar este efecto.

Finalmente se propone el uso de resina poliéster tereftálica (resina roja) debido a que brinda mejores propiedades mecánicas durante la evaluación. Además, la literatura ha demostrado que, al no acelerar el proceso, no es necesario sacrificar los valores de las propiedades mejoradas para compensar el tiempo de gelificación [34], [35]. Esta es una mejora con respecto a la resina de poliéster preacelerada utilizada anteriormente, que tenía un tiempo de fraguado funcional corto.

VII. CONCLUSIONES

Tras el análisis, se puede deducir que, en cada una de las pruebas realizadas, las probetas obtenidas a partir de la resina roja son potencialmente viables para ser utilizadas como material en los recubrimientos PRFV como un sistema de protección para los tanques en uso.

En general, la resina de poliéster tereftálica tiene una mayor resistencia a la tracción y un módulo de Young más alto que la resina preacelerada. Esto se debe a la estructura de cadena rígida y la alta temperatura de transición vítrea de las resinas de poliéster tereftálicas, lo que les confiere una mayor rigidez y resistencia mecánica, sin embargo, la resina preacelerada puede tener una mayor deformación unitaria antes de la fractura en comparación con la resina de poliéster tereftálica, debido a su mayor flexibilidad y menor rigidez. Esto se debe a la mayor cantidad de grupos insaturados en las resinas de poliéster preaceleradas, lo que les confiere una mayor flexibilidad. El porcentaje de refuerzo de fibra de vidrio puede afectar la resistencia a la tracción y la deformación unitaria de las resinas de poliéster. Es posible que se hayan observado diferencias en la resistencia a la tracción y la deformación unitaria de las dos resinas si se hubiera utilizado un porcentaje diferente de refuerzo de fibra de vidrio lo que se podría atribuir a los datos obtenidos en el módulo de Young.

Es importante tener en cuenta que los resultados específicos pueden variar dependiendo de los métodos de procesamiento, las condiciones de la prueba de tracción y otros factores. Por lo tanto, es necesario realizar pruebas adicionales para validar estos hallazgos y obtener una comprensión completa de las propiedades de las resinas de poliéster tereftálicas y preaceleradas con el mismo porcentaje de refuerzo de fibra de vidrio.

Finalmente, se determinó que el tiempo de curado óptimo para obtener los mejores resultados en los recubrimientos PRFV fue de 12 horas. Este tiempo es crucial ya que permite que las propiedades mecánicas de las probetas se desarrollen de manera adecuada, permitiendo una mejor resistencia a impacto y tracción.

Además, se puede concluir que el tiempo de curado también afecta la resistencia a la ignición de los recubrimientos PRFV. Un tiempo de curado adecuado ayuda a mejorar la resistencia del material a la propagación del fuego, lo que es esencial para su uso en tanques de concreto vaciado en el acueducto comunitario San José.

VIII. RECOMENDACIONES

Como estudios futuros se recomienda realizar un ensayo de crecimiento bacteriano sobre la superficie del material compuesto, esto con el fin de analizar el crecimiento de sustancias o microorganismos en los tanques, que se generen desde el recubrimiento aplicado.

Se aconseja una realización de pruebas en planta física para verificar otras variables como lo es adherencia con el concreto de los tanques en el tiempo.

Se recomienda repetir las pruebas de tracción para asegurarse de los resultados obtenidos en este informe de práctica ya que sus resultados podrían cambiar con unas probetas mucho más uniformes, aunque estos se dan como válidos.

REFERENCIAS

- [1] «AWWA Standard ® SM Thermosetting Fiberglass-Reinforced Plastic Tanks», 2019, doi: 10.12999/AWWA.D120.19.
- [2] «5 Ventajas del PRFV frente al acero - Defrasa», 18 de febrero de 2021. <https://prfv.defrasa.es/5-ventajas-del-prfv-frente-al-acero-en-barandillas-escaleras-y-tramex/> (accedido 15 de enero de 2023).
- [3] I. del C. Díaz Pérez, A. Vega Aguilar, I. del C. Díaz Pérez, y A. Vega Aguilar, «Diseño de tanques de hormigón armado con barras de polímero reforzado con fibras de vidrio», *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 42, n.º 2, pp. 3-13, ago. 2021.
- [4] J. J. Martínez González, H. R. Wainshtok Rivas, y L. F. Córdova López, «Diseño del muro del malecón habanero armado con polímeros reforzados con fibras de vidrio», *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 39, n.º 2, pp. 31-45, ago. 2018.
- [5] D. J. Varón, S. F. Bou, R. B. Gimeno, y D. G. Sanoguera, «Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos», *3c Tecnología: glosas de innovación aplicadas a la pyme*, vol. 1, n.º 2, p. 2, 2012.
- [6] J. D. Illera y E. Niño, «Incorporación de materias primas renovables y recicladas en resinas de poliéster insaturado», 2014, Accedido: 5 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/7328>
- [7] D. A. Simbaña Ushiña, «REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTECTOR DE CÁRTER PARA UN VEHÍCULO CHEVROLET SAIL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MATERIALES HÍBRIDOS REFORZADOS CON FIBRA DE CABUYA Y FIBRA DE VIDRIO, CON BASE DE RESINA POLIÉSTER, MEDIANTE ESTRATIFICACIÓN MANUAL, MOLDEO POR CONTACTO Y POR COMPRESIÓN», feb. 2018, Accedido: 19 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/2736>
- [8] O. Arboleda, «Aplicación del plástico reforzado con fibra de vidrio a partes de ingeniería», 2007, Accedido: 19 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11059/1119>
- [9] J. A. Schey y J. León Cárdenas, *Procesos de manufactura*. 2002.
- [10] S. Mejia y V. Ramírez Vieira, «Fibra de Vidrio Woven Roving», 2022.
- [11] «Preimpregnados (Prepregs)», *Castro Composites*. <https://www.castrocompositesshop.com/es/8-preimpregnados> (accedido 6 de octubre de 2022).
- [12] S. Mazumdar, *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. CrC press, 2001.
- [13] W. D. Callister, *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Volumen I*. Reverté, 2020.
- [14] E. J. Barbero, *Introduction to composite materials design*. CRC press, 2017.
- [15] S. KALPAKJIAN y S. SCHMID, «Manufactura, ingeniería y tecnología 5 Edición», *México DF: Pearson Education*, 2008.
- [16] A. Dotan, «Biobased thermosets», en *Handbook of thermoset plastics*, Elsevier, 2014, pp. 577-622.
- [17] «UNE-EN ISO 180:2020 Plásticos. Determinación de la resistencia...» <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0064437> (accedido 20 de septiembre de 2022).

- [18] «D3039/D3039M - 08 Standard Test Method for Tensile Properties ...» <https://tienda.aenor.com/norma-astm-d3039-d3039m-08-064098> (accedido 20 de septiembre de 2022).
- [19] «Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins». <https://www.astm.org/d2584-18.html> (accedido 20 de septiembre de 2022).
- [20] E. P. de M. (EPM), «Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de EPM». Empresas Públicas de Medellín Medellín, 2009.
- [21] S. L. Cardona, D. H. M. Grajales, y W. P. Castro, «Instrumentación de un péndulo tipo Izod, para evaluación de la resistencia al impacto de polímeros», 2016.
- [22] A. G. Gordo y N. M. Piris, *Ciencia de materiales para ingenieros*. Pearson Educación, 2012.
- [23] «La guía definitiva para pruebas de tracción de materiales compuestos». <https://www.blog.metalinspec.com.mx/post/la-guia-definitiva-para-pruebas-de-traccion-de-materiales-compuestos> (accedido 8 de octubre de 2022).
- [24] «> Comprar Peróxido de Mek - Endurecedor de Resina», *ePinturas – Esmaltes, Revestimientos y Pinturas Especiales*. https://epinturas.com/index.php?controller=product&bt_product_attribute=1278&gclid=CjwKCAiAzp6eBhByEiwA_gGq5CVfsUu345_de4JueSGy4Z0Y9VUljswpGms8VRUSkze043WJCAejXhoCp3EQAvD_BwE&product_rewrite= (accedido 25 de enero de 2023).
- [25] «Aplicación de resina de poliéster mediante laminado manual: exposición a estireno. (2012)». <https://www.insst.es/stp/basequim/009-aplicacion-de-resina-de-poliester-mediante-laminado-manual-exposicion-a-estireno-2012> (accedido 26 de enero de 2023).
- [26] J. J. Rodríguez Pretelt, «Análisis del sistema catalítico de la resina de poliéster insaturado para laminación», doctoralThesis, 2014. Accedido: 14 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/1980>
- [27] C. A. Quintero Portocarrero, «Manual práctico sobre poliéster (Plásticos) reforzado con fibra de vidrio (prfv)», <http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0043181.pdf>, 2007, Accedido: 31 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/2920>
- [28] R. Jones, «Mechanics of composites materials–2nd edition, Taylor & Francis Inc», *Philadelphia, PA*, 1999.
- [29] V. Arlington, «American Composites Manufactures Association», *E: info and acmanet. Org. New York affice suit*, vol. 429, pp. 1-24, 2007.
- [30] A. M. Gomis, *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. Universidad de Alicante, 2012.
- [31] D. C. Andrade Pérez y L. Ji. Rodríguez González, «Estudio de las propiedades mecánicas de un material compuesto de fibra de vidrio y resina polimérica modificada con poliestireno expandido», may 2020, Accedido: 31 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unicatolica.edu.co/handle/20.500.12237/1810>
- [32] C. C. Sánchez, S. A. Montserrat, y M. Pedraza, «Materiales de resinas compuestas y su polimerización Parte I», Medigraphic, 2009.
- [33] H. C. Fonseca Ballesteros, «Elaboración de un material compuesto por una matriz de resina poliéster y fibra natural de coco para su caracterización mecánica a tensión y flexión.», bachelorThesis, Fundación Universidad de América, 2022. Accedido: 21 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8974>
- [34] D. A. García Cárdenas y L. F. Morales Martín, «Caracterización de las propiedades mecánicas de tensión y flexión de un material elaborado de: residuo de cuero-resina de Poliuretano

(siguiendo la NTC595 y NTC3201)», Accedido: 26 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/15689>

- [35] «Evaluación de alternativas de descomposición química para el tratamiento de residuos del Tereftalato de Polietileno (PET)». <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/21387> (accedido 26 de enero de 2023).

ANEXOS

[1] Anexo 1. FT RESIGLAS NR

[2] Anexo 2. FT RESIGLAS

[3] Anexo 3. CSM P20 POWDER (Mat 450 – Mat 300 – Mat)

[4] Anexo 4. FT PEROXICOL – 80

[5] Anexo 5. Carta de recomendación Asesor Externo