



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA DE MECÁNICA**

**CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL DE RESINA EPOXI, REFORZADA CON  
EL 40% DE PET TRITURADO SOMETIDO A CARGAS DE FLEXIÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de: **INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR: JUAN ESTEBAN VÁSQUEZ MARÍN**

**TUTOR: SONIA ELIZABETH GUAÑO ARIAS**

Quito – Ecuador

2024

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUDITORIA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Juan Esteban Vásquez Marín con documento de identificación N.º 1751968759; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo: y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 19 de agosto del año 2024

Atentamente,



---

Juan Esteban Vásquez Marín  
1751968759

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Juan Esteban Vásquez Marín con documento de identificación N.º 1751968759, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor de la Propuesta Tecnológica: "Caracterización de un material de resina epoxi, reforzada con el 40% de PET triturado sometido a cargas de flexión", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de agosto del año 2024

Atentamente,



---

Juan Esteban Vásquez Marín  
1751968759

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Sonia Elizabeth Guaño Arias con documento de identificación N.º 1713704334, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL DE RESINA EPOXI, REFORZADA CON EL 40% DE PET TRITURADO SOMETIDO A CARGAS DE FLEXIÓN**, realizado Juan Esteban Vásquez Marín con documento de identificación N.º 1751968759, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de agosto del año 2024

Atentamente,



---

Fisc. Sonia Elizabeth Guaño Arias, Msc.  
1713704334

## **DEDICATORIA**

El presente artículo académico está dedicado a:

Mi mama Ediana que tanto me ayudo a corregir y editar el contenido y a mi padre Erik por siempre estar a servicio de todas mis necesidades.

*Juan Vásquez*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por acompañarme durante toda la carrera y por siempre estar listos para ayudarme y guiarme en cualquier inquietud.

A mi tutora, física Sonia Guaño por acompañarme durante este proyecto y siempre brindar su mejor servicio como directora de carrera.

*Juan Vásquez*

## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
INDICE DE TABLAS .....	IX
INDICE DE FIGURAS .....	X
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
OBJETIVO GENERAL .....	XVI
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XVI
CAPÍTULO I.....	1
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	1
1.1 CONCEPTOS Y DESARROLLO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS .....	1
1.2 COMPONENTES.....	2
1.3 TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS SEGÚN LA MATRIZ .....	3
1.3.1 <i>MATRIZ METÁLICA</i> .....	3
1.3.2 <i>MATRIZ CERÁMICA</i> .....	4
1.3.3 <i>MATRIZ POLIMÉRICA</i> .....	4
1.4 MATERIALES COMPUESTOS SEGÚN SU CONFIGURACIÓN .....	5
1.5 TIPOS DE REFUERZOS .....	7
1.5.1 <i>REFUERZOS CON FIBRAS</i> . .....	8
1.5.2 <i>REFUERZOS CON PARTÍCULAS</i> . .....	8
1.6 MICROGRAFÍAS.....	9
1.7 ENSAYO DE FLEXIÓN .....	10
1.8 ESTUDIOS PREVIOS.....	11
1.8.1 <i>RESULTADOS DE ESTUDIOS PREVIOS</i> .....	12
1.9 MÉTODO DE MANUFACTURA DE RESULTADOS PREVIOS.....	12
1.10 PROPIEDADES DEL PET.....	14

1.11	RESINA EPÓXICA .....	15
1.12	ZONAS DEL DIAGRAMA ESFUERZO – DEFORMACIÓN .....	18
1.13	EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS CON ENSAYOS DESTRUCTIVOS .....	18
1.14	NORMA DE ENSAYO ASTM D 7264/D 7262M - 07 .....	19
1.15	CÁLCULOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS .....	20
1.16	MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYO DE FLEXIÓN .....	22
CAPÍTULO II .....		24
MATERIALES Y METODOLOGÍA .....		24
2.1	DESCRIPCIÓN .....	24
2.2	PREPARACIÓN Y MOLIENDA DEL PET .....	24
2.3	DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL MOLDE .....	26
2.3.1	<i>ELABORACIÓN DE PROBETAS NORMADAS PARA ENSAYO DE FLEXIÓN</i> .....	26
2.3.2	<i>EXTRACCIÓN DE PROBETAS DEL MOLDE</i> .....	27
2.3.3	<i>OBTENCIÓN DE GEOMETRÍA FINAL</i> .....	28
2.3.4	<i>ENSAYO DE FLEXIÓN</i> .....	30
2.4	MICROGRAFÍA .....	31
CAPITULO III .....		32
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		32
3.1	EVALUACIÓN DE PROCESAMIENTO DE DATOS .....	32
3.2	OBSERVACIONES GENERALES .....	32
3.3	ANÁLISIS DEL GRÁFICO ESFUERZO - DEFORMACIÓN .....	34
3.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ESFUERZO MÁXIMO .....	36
3.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ELASTICIDAD .....	38
3.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DEFORMACIÓN MÁXIMA .....	40
3.7	ANÁLISIS DE MICROGRAFÍA .....	42
CONCLUSIONES .....		48
RECOMENDACIONES .....		50
BIBLIOGRAFÍA .....		51
ANEXOS .....		56

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tabla 1 Especificaciones Técnicas de las propiedades mecánicas PET [37].....	15
<b>Tabla 2.</b> Especificaciones de propiedades térmicas PET [38].....	15
<b>Tabla 3.</b> Propiedades características resina epóxica Quarz Cast-11 [42].....	17
<b>Tabla 4.</b> Propiedades características resina epóxica Q2 [43] .....	18
<b>Tabla 5.</b> Esfuerzo Máximo .....	37
<b>Tabla 6.</b> Elasticidad .....	39
<b>Tabla 7.</b> Deformación máxima .....	41

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mercado mundial de materiales compuestos [12].....	1
Figura 2 Distribución sectorial . [12] .....	2
Figura 3 Matriz y refuerzo del material compuesto [13].....	3
Figura 4 Clasificación de materiales compuestos [14].....	3
Figura 5 Configuraciones de los materiales compuestos [22].....	6
Figura 6 Funcionalidad proporcionada por cada configuración. [22] .....	7
Figura 7 Materiales compuestos y sus refuerzos- Partículas a la izquierda y Fibras a la derecha [24].....	8
Figura 8 El esfuerzo particulado debería ser duro mientras la matriz debe ser suave y continua. [26] .....	9
Figura 9 Prueba de Flexión aplicada en 3 puntos [26] .....	11
Figura 10 Geometría de la probeta requerida para la norma ASTM D 7264/D 7264M - 07 [41] .....	19
Figura 11 Máquina de flexión Testresources modelo 316-1096.....	23
Figura 12 Molino 15/21 M2.6 PM INSON utilizado para la molienda del PET. Fuente: El autor.....	25
Figura 13 Escamas de PET triturado donde se evidencia su gran superficie y presencia de rebabas las cuales no están presentes en el PET peletizado. Fuente:el autor.....	25
Figura 14 Ensamble del molde para conformado de las probetas – capas que lo constituyen. Fuente: El autor .....	26
Figura 15 Extracción de probetas. A la izquierda se encuentra la resina pura y a la derecha la resina-PET. Fuente: el autor .....	28
Figura 16 Extracción de probetas del molde mediante corte del molde con amoladora. Fuente:el autor.....	28
Figura 17 Obtención de geometría final de las probetas de resina Dura Quarz Cast-11 mediante el método de mecanizado en fresadora de la probeta. Fuente: el autor .....	29
Figura 18 Geometría final de las probetas con Dura Quarz Cast-11 .....	29
Figura 19 Geometría final de las probetas de Resina Epóxica Q2. Fuente: EL autor .....	30
Figura 20 Equipo Universal de ensayos de Flexión Testresources 316-1096 (izq.) y probeta con tres puntos de apoyo y rodillos de 10mm (der.) Fuente: autor .....	30

Figura 21. Probeta de resina pura Dura Quarz Cast-11 (izq.) la cual resulta ser muy flexible y resina Q2 (der.) la cual resulta ser quebradiza. ....	33
Figura 22. Probeta de resina pura Dura Quarz Cast-11 (abajo) la cual resulta ser rígida y quebradiza y resina Q2 (arriba) la cual no resulta quebradiza al momento de mecanizar. ....	33
Figura 23. Esfuerzo-Deformación de Resina-PET al 40% (Resina Q2) donde se observa una alta variación en la magnitud de la deformación máxima.....	34
Fig 24. Esfuerzo-Deformación de Resina-PET al 40% (Resina Q2) – Deformación hasta el 0.5% donde se observa mucha variación en la magnitud del esfuerzo máximo y la elasticidad .....	35
Figura 25. Curva Esfuerzo-Deformación de Resina Epoxi vs Resina-PET al 40% (Resina Q2) donde la resina epoxi pura demuestra alta consistencia, alta linealidad, esfuerzos máximos y deformaciones máximas mucho mayores a la Resina-PET.....	36
Figura 26. Grafica de intervalos de esfuerzo máximo. El promedio se representa con el punto y el intervalo es $\pm$ la desviación estándar. Si los intervalos no se sobreponen significa que la diferencia entre promedios es válida con un nivel de confianza del 95% .....	37
Figura 27 Grafica de caja del esfuerzo máximo de resina epoxi vs resina-PET. La grafica de caja presenta los cuartiles y como están dispersados los datos .....	38
Figura 28 Grafica de intervalos de elasticidad. El promedio se representa con el punto y el intervalo es $\pm$ la desviación estándar. Si los intervalos no se sobreponen significa que la diferencia entre promedios es válida con un nivel de confianza del 95% .....	39
Figura 29 Grafica de caja de elasticidad de resina epoxi vs resina-PET. La grafica de caja presenta los cuartiles y como están dispersados los datos .....	40
Figura 30 Gráfica de intervalos de deformación máxima de Resina Epoxi vs Resina PET. El promedio se representa con el punto y el intervalo es $\pm$ la desviación estándar. Si los intervalos no se sobreponen significa que la diferencia entre promedios es válida con un nivel de confianza del 95% .....	41
Figura 31. Grafica de caja de deformación máxima de resina epoxi vs resina-PET. La grafica de caja presenta los cuartiles y como están dispersados los datos .....	42
Figura 32. En A y B se observa la presencia de aire encapsulado en la micrografía de corte transversal de la probeta resina-PET lo que confirma la presencia de poros en la estructura interna del material.....	43

Figura 33. En A y B se observa que no existe separación en la interfaz de refuerzo-matriz en la micrografía de corte transversal de la probeta resina-PET.....	43
Figura 34. En la micrografía de corte transversal de la probeta resina-PET se observa, en A, que existe una aparente capa de homogeneidad entre el PET y la resina, mientras que en B, no se observa probablemente debido al color transparente de la escama de PET. ....	44
Figura 35 En A se observa la presencia de una rebaba en la escama de PET que aumenta la superficie entre el refuerzo matriz en la micrografía de corte transversal de la probeta resina-PET.....	45
Figura 36 Se observa, en A y B, las escamas de PET debajo de la superficie del material debido a que este es transparente en la micrografía de corte transversal de la probeta resina-PET.....	46
Figura 37 Se observa una concentración más alta de escamas de PET, una de las cuales se encuentra resaltada en A, por unidad de área cerca de la parte superior de la probeta, mientras que en B se observar aire encapsulado en forma de burbujas justo debajo de una.....	47

## RESUMEN

En la presente investigación se analiza el comportamiento mecánico de un material compuesto generado mediante una matriz polimérica de resina epóxica reforzada con escamas de tereftalato de polietileno (PET) recicladas, con una composición en volumen de 40% de PET triturado y 60% de resina epóxica. En la fabricación se realizaron probetas bajo la normativa ASTM D 7264/D 7264M - 07 para ensayos de flexión en compuestos con matriz polimérica, solidificadas a temperatura ambiente y mecanizadas mediante el uso de fresadora, amoladora y lijas. Las probetas fueron conformadas mediante mezcla manual. La valoración de resultados, de los ensayos de flexión, indicó que la resina epóxica pura y el material compuesto resina-PET presentan un esfuerzo máximo promedio de 46.3 MPa y 5.48 MPa, respectivamente y su elasticidad promedio es de 1912 MPa y 946 MPa, respectivamente. Finalmente, la resina epóxica y resina-PET alcanzan una deformación máxima promedio de 1.98% y 0.73%, respectivamente. Por lo que se puede aseverar que la técnica de reforzamiento utilizada en esta investigación no mejoro las propiedades mecánicas del material, presentando más bien una disminución significativa de las mismas. Mediante análisis micrográfico se encontró que las partículas de refuerzo no se ubican distribuidas de manera homogénea en la matriz, concentrándose principalmente en uno de los extremos de la sección transversal. Además, se pudo observar que la orientación de las escamas de refuerzo tienen una orientación mayormente horizontal. Al observar la interfaz de refuerzo-matriz se evidencia la existencia de una capa delgada de homogeneidad por lo que se puede afirmar que no existe separación entre el PET y la resina Epoxica.

**Palabras Clave:** Resina Epoxi, PET, material compuesto, flexión.

## ABSTRACT

This research analyzes the mechanical behavior of a composite material generated with a polymeric matrix of epoxy resin reinforced with recycled PET flakes, with a volume composition of 40% crushed PET and 60% epoxy resin. In the manufacture, test pieces were made under the ASTM D 7264/D 7264M - 07 standard for bending tests on compounds with a polymeric matrix, solidified at room temperature and machined by using a milling machine, grinder and sandpaper. The specimens were made by manual mixing. The analysis of the results of the bending tests determined that pure epoxy resin and the composite material PET-resin have an average maximum stress of 46.3 MPa and 5.48 MPa, respectively. Regarding elasticity, the epoxy resin and PET-resin have an average elasticity of 1912 MPa and 946 MPa, respectively. Finally, the epoxy resin and PET-resin present an average maximum deformation of 1.98% and 0.73%, respectively. This is a significant decrease in all three properties studied. The micrographic analysis revealed that the distribution of the reinforcement is not homogeneous, due to a higher concentration of crushed PET near the top of the specimen and most of the crushed PET flakes showed a mostly horizontal orientation. The reinforcement-matrix interface showed that there is no separation between the PET and the epoxy resin and even a thin layer of homogeneity was observed.

**Keywords:** Epoxy resin, PET, composite material, flexion

## INTRODUCCIÓN

Se producen enormes cantidades de desechos plásticos debido a la extensa industrialización y la siempre creciente población [1], además de la creciente producción de elementos plásticos como subcomponentes de productos complejos. Se generan grandes sumas de desechos plásticos debido a que muchos productos no son reutilizables [2].

Los plásticos no se consideran productos tóxicos, pero la exposición excesiva a largo plazo puede provocar problemas a la salud humana [3]. Los desechos de tereftalato de polietileno (PET) en particular son muy comunes y la industria se encarga de ellos mediante la incineración. Esto produce que se liberen gases tóxicos al medio ambiente y se generen problemas en el sistema respiratorio [4].

El PET tarda más de un siglo en desaparecer y no se considera biodegradable [5]. Estos residuos se suelen utilizar en la industria de textiles para la fabricación de productos como calzado, camisetas, cepillos, escobas plásticas y alfombras [6].

En Ecuador, cada año se producen cuatro millones de toneladas plásticas. De esto, de un 15% al 25% son botellas plásticas recicladas. Los otros residuos lamentablemente son desechados en los contenedores erróneos lo cual crea una mezcla entre el material reciclable y no reciclable [7].

La utilización del PET en la manufactura de botellas plásticas para varios usos siendo mayormente para envases de bebidas, presenta un crecimiento que parece no tener fin [8]. En los últimos años se han realizado varios ensayos para determinar sus propiedades químicas y mecánicas del PET para determinar segundos usos [9]. Estos ensayos dan como resultado materiales tentativos donde el plástico se utiliza como fibra en una matriz polimérica, lo cual podría presentar un posible uso del PET y reducción de los desechos de este material.

Existe un nuevo enfoque para la despolimerización del PET dentro de lo cual se encuentra la producción de resina polimérica, la cual es muy económica y de fácil acceso [9]. Otra área de estudio dentro de la ingeniería civil a llevado a usar fibras de PET para reforzar mortero utilizado en construcciones civiles [10].

La presente investigación, con la intención de mejorar la resistencia a la flexión, toma como base trabajos previos sobre el uso del PET y otros plásticos como refuerzo en materiales

compuestos, el método que es usado como base para la obtención del material deseado ha sido reportado [11]. Una vez obtenidas las probetas se establecerán las propiedades del PET y resina epoxi mediante ensayos estandarizados y análisis de resultados.

### **OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar un material o sustancia compuesta de resina epoxi reforzada con 40% de PET triturado sometido a cargas de flexión.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer estudios referentes a la obtención de materiales compuestos de resina epoxi-PET.
- Determinar una alternativa viable para la obtención de material compuesto de resina-PET al 40%.
- Analizar la resiliencia a la flexión del material compuesto de resina-PET al 40%.
- Caracterizar la distribución del refuerzo y la interfaz de refuerzo-matriz mediante análisis micrográfico.

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTO TEÓRICO

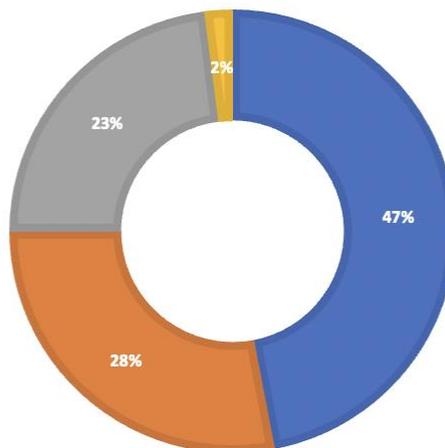
### 1.1 Conceptos y desarrollo de los materiales compuestos

Material compuesto se define como toda mezcla de materiales que se ha constituido a partir de una cohesión no química, de dos o más materiales. Esta mezcla da origen a un nuevo material, con propiedades y características específicas, que se diferencia de las propiedades anteriores a la unión. Una característica del material compuesto es que sus componentes no deben fusionarse o disolverse entre sí. Es decir que los materiales que componen al material compuesto deben distinguirse por medios físicos. [11]

El uso de materiales compuestos se extendió durante el año 1994 hasta el 2000 en un 5,7 por ciento por año. Según un estudio de “Materiales Compuestos” publicado en el 2002 y realizado por Nodal Consultants, en el 2000 se produjeron 7 millones de toneladas. En la figura 1 podemos valorar la distribución de la industria de materiales compuestos en diferentes lugares del mundo, estas son del mismo estudio de Nodal Consultants. [12]

#### MERCADO MUNDIAL DE MATERIALES COMPUESTOS

■ Estados Unidos de América ■ Europa ■ Asia ■ América del Sur



Fuente: el autor

Figura 1. Mercado mundial de materiales compuestos [12].

La producción automotriz lidera el consumo de materiales compuestos, con más de una cuarta parte, le sigue la aeronáutica, luego la construcción y el deporte, como los que más usan estos materiales, se puede notar esto en la fig.2.

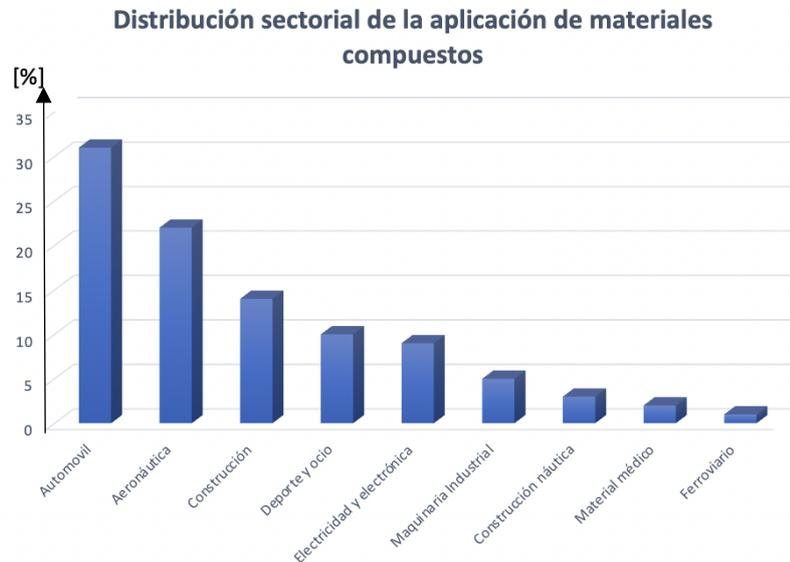


Figura 2. Gráfica de barras de la distribución sectorial [12].

## 1.2 Componentes.

Los materiales compuestos están creados a partir de dos componentes principales como se puede visualizar en la Fig.3, la matriz, conocida como fase continua, la cual es menos rígida y la fase discontinua que se denomina el refuerzo, esta tiende a ser más rígida. El refuerzo tiene como cometido principal el absorber las tensiones, aumentar la resistencia y la dureza del material final [13].

La función de la matriz es ser protector de todos los factores externos y generar estabilidad al conjunto al transmitir los esfuerzos entre los componentes reforzantes.

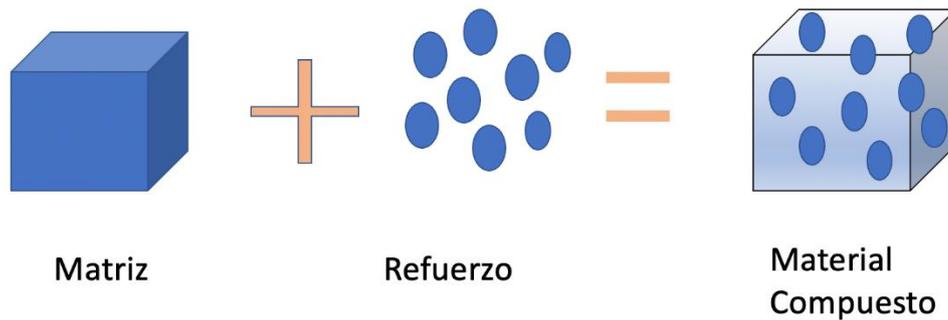


Figura 3. Matriz y refuerzo del material compuesto [13].

### 1.3 Tipos de materiales compuestos según la matriz

Existen diferentes tipos y se pueden clasificar según la matriz, esta puede ser metálica, de cerámica o de polímeros como se detalla en la Fig. 4.

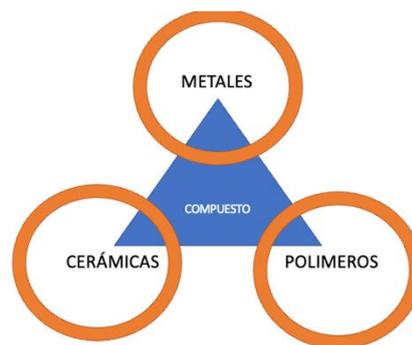


Figura 4. Esquema de clasificación según la matriz de materiales compuestos [14].

#### 1.3.1 Matriz metálica

Los compuestos que contienen una matriz metálica, más utilizados para el campo aeroespacial y motores, su característica es su alta resistencia y bajo peso, un ejemplo de estos serían las mezclas de aluminio con refuerzo de boro. [15] Los materiales más usados son el aluminio, magnesio y titanio.

En el área de la ingeniería tienen un gran campo de aplicación por su alta resistencia mecánica, alta resistencia térmica, buena conductividad termoeléctrica. Los de matriz metálica son usados

en la producción aeronáutica ya que se requiere de una resistencia elevada a altas temperaturas, abrasión, además, de requerir bajo peso [16].

La matriz metálica tiene como funciones:

- Proteger a las fibras del aire y la humedad.
- Unir las fibras de refuerzo entre ellas.
- Permitir que las cargas que sufre el refuerzo se repartan y transmitan entre ellas, de tal forma que permita la deformación para tensiones inferiores a las que se someterá el compuesto.
- La matriz debe presentar una buena respuesta a la oxidación y a la corrosión. [13]

### **1.3.2 Matriz cerámica**

Una de las características de los materiales de cerámica es que ofrecen un elevado punto de fusión, dureza, rigidez, resiliencia a la corrosión y baja densidad. Su desventaja es que tiene una alta fragilidad y baja resistencia a la propagación de grieta. Por esto es que es tan importante fabricar materiales compuestos de este tipo de matriz.

El desarrollo de estos materiales ha sido tardía en comparación con los metálicos o de polímeros debido a que sus procesos requieren elevadas temperaturas y por tanto los materiales usados como refuerzos deben ser resistentes a altas temperaturas [17].

### **1.3.3 Matriz Polimérica**

Los materiales de matriz polimérica han tomado un rol fundamental en la industria a causa de la relación resistencia-peso es mayor comparada con la de otros materiales como los metálicos.

Los materiales de matriz polimérica proporcionan adecuadas características mecánicas, que poseen buena resistencia al desgaste y a los agentes químicos. Por sus cualidades pueden ser conformados con diferentes métodos. La matriz es un polímero y la fibra que se usa como refuerzo puede ser sintética o inorgánica. [11]

Los compuestos reforzados con fibras de plástico, han incrementado su utilización en los últimos tiempos, sus usos son muy variados en diferentes campos, tanto en la aeronáutica (alas, fuselajes, tren de aterrizaje); en automóviles (carrocería, partes de faros, parachoques, ballestas);

náutica (cubiertas, mástiles); Química (envases y envases de presión); eléctrica (paneles, aislantes, interruptores) y en deportes (cañas de pescar, instrumentos de golf, piscinas) [18]

Otra característica de los compuestos con polímeros es su capacidad de sustituir a materiales muy usados como el acero o el aluminio entre otros. Y los avances tecnológicos permiten nuevas combinaciones que generan nuevas mezclas. [19]

Los compuestos de matriz polimérica se dividen en:

- Termoplásticos
- Termoestables
- Elastómeros

Los termoplásticos se caracterizan por fundirse y tomar diferentes formas que se conservan al enfriarse, su particularidad es que se pueden fundir y modelar varias veces, sin embargo esto hará que vaya perdiendo sus cualidades físicas y la capacidad de ser reutilizados.

Los termoplásticos tienen múltiples aplicaciones en la actualidad como vidrios irrompibles, lentes, faros de automóviles de policarbonato; el PVC en la fabricación de tuberías, cortinas de baños, impermeables, entre otros. El más usado de todos es el polietileno, se encuentra en las bolsas de plástico, chalecos antibalas, juguetes de niños, botellas y en muchos más elementos. [20]

Los materiales termoestables se forman de un líquido viscoso que al reaccionar y al endurecerse conforman un entramado molecular integrado con enlaces cruzados, esto da un sólido que no puede ser reprocesado como los termoplásticos. Los termoestables no se derriten al calor, pero si pueden perder su firmeza al alcanzar la temperatura de distorsión térmica. Sus características principales es que son resinas muy rígidas y presentan baja elasticidad y alta fragilidad. Se puede decir que esto es una desventaja ya que no permite el reciclaje. Los más comunes son las resinas epoxi, resinas poliéster y resinas fenólicas.

Los elastómeros presentan una alta elongación y gran flexibilidad debido a que forman cadenas con gran libertad de desplazamiento molecular. Se usa en goma natural para suelas de zapatos, los poliuretanos son de uso en el mundo textil, el polibutadieno en ruedas por su resistencia al desgaste, entre muchos otros usos.

#### **1.4 Materiales compuestos según su configuración**

Los materiales compuestos también se clasifican por la forma como se genera su configuración:

- Compuestos
- Sándwiches
- Celosías
- Estructuras segmentadas

En los compuestos los refuerzos pueden ser fibras o partículas que se detallan en los tipos de refuerzos. Los tipos sándwiches son aquellos formados por dos láminas resistentes externas, que reciben el nombre de caras, estas están separadas por el núcleo, un material menos denso y resistente, su propiedad es resistir esfuerzos de flexión transversal [21].

Las celosías por su parte combinan material y espacio, que a su vez puede contener otro material. En las segmentadas se crean subdivisiones, es decir que el material es dividido, que pueden ser de una a tres dimensiones, estas subdivisiones dividen la rigidez y también da tolerancia al daño. La fig. 5 presentan estas diferentes configuraciones [22].

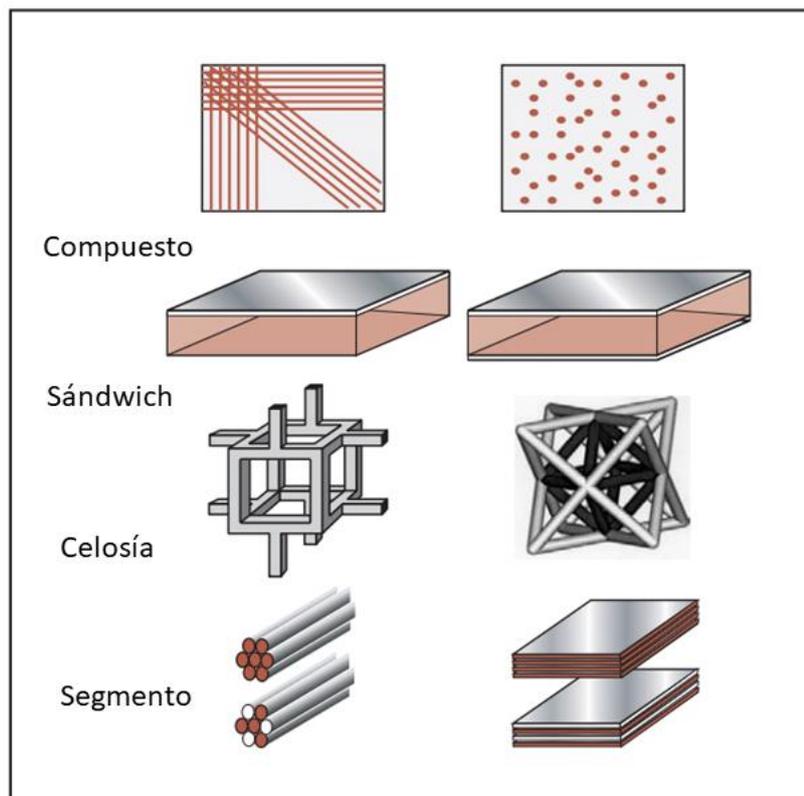


Figura 5. Configuraciones de los materiales compuestos [22].

Existen muchas investigaciones que permiten ver las funciones que estas diferentes formas de configuración aportan a los materiales. Como se puede detallar en la Figura 6, un material compuesto que ha sido reforzado con partículas, ofrece mayores aportes que las configuraciones tipo sándwich, celosías y estructuras segmentadas. Los mayores aportes son en las siguientes propiedades: rigidez y resistencia axial, rigidez y resistencia flexión y aislamiento térmico. Esto está bien detallado en la Fig. 6.

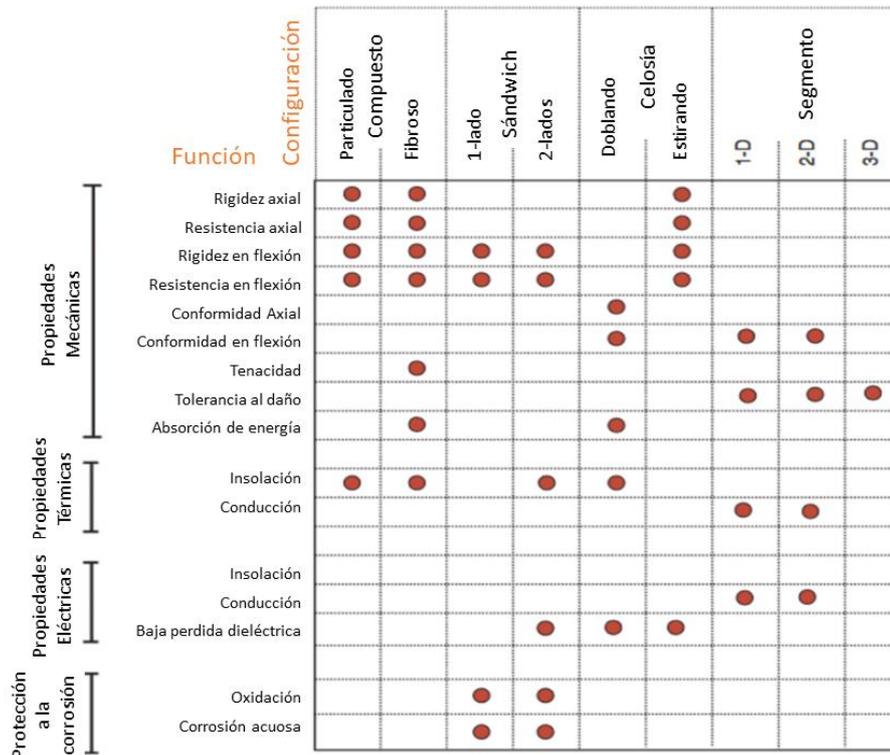


Figura 6. Funcionalidad proporcionada por cada configuración. [22].

## 1.5 Tipos de refuerzos

El refuerzo es el material que se incorpora a la matriz, su propósito es mejorar las cualidades mecánicas. Esto da al nuevo compuesto una mejor aguantante a la fatiga, superior correlación entre la resistencia y el peso además de mejorar la rigidez. Las fibras o partículas añadidas soportarán la mayor cantidad de esfuerzo que reciba el material. Las propiedades varían de acuerdo a cuánta fibra se añade, la orientación que estas tengan y la composición de la matriz. Si el compuesto va a ser expuesto a altas temperaturas, el refuerzo debe tener una temperatura de fusión elevada [14].

### 1.5.1 Refuerzos con fibras.

Los materiales compuestos que son re-forzados con fibras son mas conocidos porque dan una alta prestación mecánica al material final. Pueden ser reforzados con fibras continuas, es decir que estas son más largas y alineadas o discontinuas que son mas cortas, las discontinuas pueden estar alineadas o rientadas al azar, esto puede observarse en el lado derecho de la Fig. 7.

Según el diámetro y las propiedades, las fibras se pueden dividir en 3 agrupaciones, whiskers, fibras y alambres. Las primeras, son fibras monocristalinas, y es considerado un elemento de refuerzo excepcional, por sus altas propiedades mecánicas, entre ellas resistencia a la tracción [23].

Las fibras que son materiales policristalinos, pueden ser de gran variedad y sus diámetros son pequeños. Las hay poliméricas como la aramida, carbono o boro entre otras. También existen fibras naturales como el coco, cabuya y otras.

En los refuerzos con alambres, se dan diámetros grandes, algunos materiales usados son el tungsteno, molibdeno y acero, muy usado en llantas para automóviles.

### 1.5.2 Refuerzos con partículas.

Este tipo de refuerzo que se puede observar a la izquierda de la Fig. 7, las grandes partículas son usadas con matrices poliméricas, cerámicas o metálicas. Un ejemplo de esto, sería el hormigón (matriz) con un refuerzo de partículas de arena y grava.

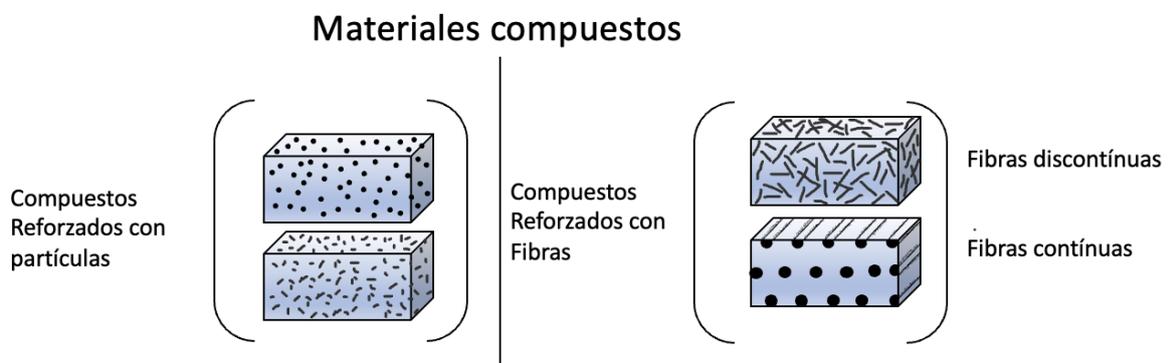


Figura 7. Materiales compuestos y sus refuerzos- Particulas a la izquierda y Fibras a la derecha [24].

Los Wood Polymer Composites (WPC) o maderas plásticas, es un ejemplo de material compuesto con matriz polimérica y reforzada con madera en polvo, que serían las partículas. Por su resistencia mecánica, mayor durabilidad y menor densidad estos materiales tienen una alta aplicabilidad arquitectónica y estructural.

En muchos de los casos, la faceta de las partículas es más fuerte y rígida que la matriz y lo que hacen es limitar el movimiento de la matriz, esta traslada una parte del esfuerzo a las partículas. El mejoramiento mecánico del material depende del grado de la adhesión matriz-partículas [25].

En la fig.8, se compara el comportamiento de un material compuesto reforzado con partículas. En el primer caso (izquierda) el refuerzo es más duro que la matriz por lo tanto el esfuerzo se transmite a este y se agrieta antes. En el segundo caso (derecha) la matriz es la más dura y el esfuerzo no se transmite al refuerzo. Como resultado la matriz se agrieta primero. Debido a este fenómeno, se establece que las partículas de refuerzo deben ser más duras que la matriz [26].

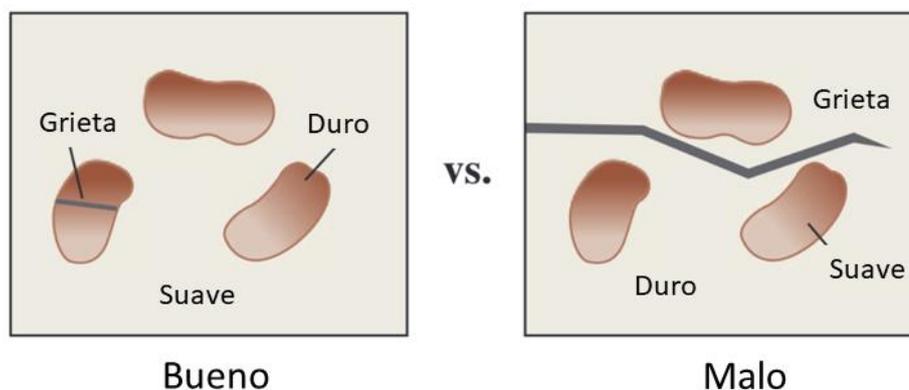


Figura 8. Esquema del refuerzo particulado que debería ser más duro que la matriz [26].

## 1.6 Micrografías

Cuando se requiere ver la constitución, composición o propiedades mecánicas de un material a nivel microscópico se hacen las micrografías, que son fotografías tomadas por medio de elementos ópticos o electrónicos, puede ser por medio de un microscopio o lupas. Para que sea una foto microscópica o fotomicrografía las imágenes del objeto o material deben ser ahueentadas mínimo diez veces en su tamaño. Si el tamaño de ampliación es menor reciben el nombre de macrografía [27].

Las micrografías aportan en la valoración de mecanismos de fractura, la propiedad de la interfaz que puede darse entre la matriz y su refuerzo y también permite ver la distribución de refuerzos [28].

Para realizar la micrografía se requiere de dos fases en el proceso, preparar la probeta y luego hacer el análisis. Para la preparación de la probeta se deben tener en cuenta los siguientes pasos [27]:

- El corte de la probeta debe ser transversal al sentido de laminación.
- Se debe evitar alterar o dañar la estructura del material que se va a examinar
- Para lograr un área plana y uniforme se debe hacer un desbaste de la muestra por medio de lijas abrasivas.
- La muestra debe ser limpiada con agua y secada correctamente luego del desbaste.
- Finalmente se hace el pulido para eliminar rayas e impurezas para darle un mejor acabado, esto se hace con una pulidora.

Luego se procede a realizar la micrografía, es decir tomar las fotos de la probeta ya preparada, para luego hacer los análisis de calidad de unión y distribución de fuerzas.

### **1.7 Ensayo de Flexión**

Este ensayo es usado en materiales mas quebradizos y su objetivo es obtener la resistencia a la flexión. La carga se aplica en tres puntos causando una curvatura, así una fuerza de tensión se ejerce de forma opuesta sobre el material y en el punto medio de este; donde debería comenzar la ruptura. Esta resistencia a la flexión o módulo de ruptura, es la que describe que resistencia tiene el material [26].

$$\text{Resistencia a la Flexión} = 3FL/(2wh^2) \quad (1)$$

- $F$  es la carga al provocarse la ruptura.
- $L$  es la distancia de suspensión.
- $w$  es el ancho de la probeta,
- $h$  es la altura como se puede contemplar en la fig. 9

Los resultados de la resistencia a la curvatura son parecidos a los gráficos de esfuerzo deformación. Aun así, el esfuerzo es graficado con relación a la deflexión y no a la deformación.

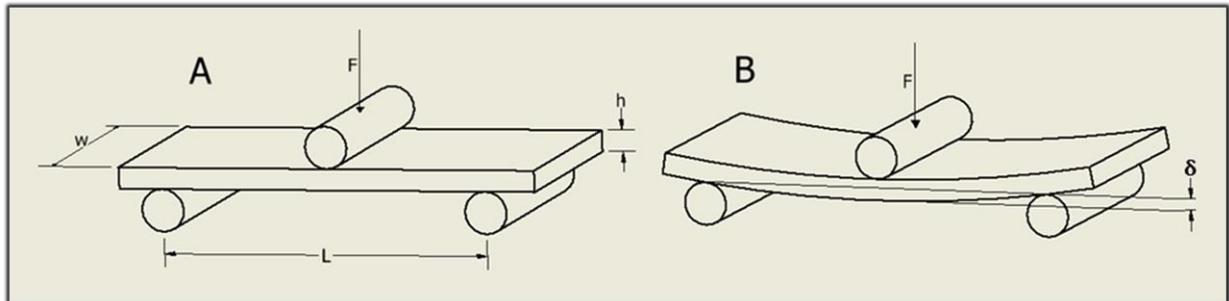


Figura 9. Prueba de Flexión aplicada en 3 puntos. A: probeta sin carga. B: probeta sin carga debido a una carga externa [26].

$$\text{Módulo de Flexión} = \frac{h^3 F}{4wh^3\delta} \quad (2)$$

Donde  $\delta$  es la deflexión de la probeta cuando se sobrepone la carga.

Este ensayo puede tener variación, se conoce como prueba de flexión en 4 puntos, esta es recomendada para materiales que tienen imperfecciones.

## 1.8 Estudios previos

Existen varios estudios sobre FRP (Fiber Reinforced Plastics), polímeros que han sido reforzados con fibras continuas, según estas investigaciones, hay mejoras en el material que lo hace más apetecido en la industria, algunas de ellas son: alta resistencia corrosiva, dura mucho más en el medio ambiente y es muy adaptable [29].

Los estudios sobre FRP, dejan en claro que el uso de estos materiales ha crecido significativa y rápidamente, especialmente en la industria de la construcción en la cual se ha vuelto una parte integral, ya que estos refuerzos de FRP son usados en hormigón armado, y su aplicación es amplia en elementos que sufren cargas de flexión, torsión, axial, corte y sísmicamente [29].

En estudios realizados sobre el empleo de FRP en estructuras, se encontraron varias ventajas y algunas desventajas. Las ventajas se colocan a continuación [30]:

- la ligereza del material
- Su densidad está ente 1,5 y 2,5 g/cm<sup>3</sup>, muy diferente a la densidad del acero de 7,85 g/cm<sup>3</sup>.

- La fatiga en carga cíclica es mucho mejor que los materiales metálicos
- En ambientes con agentes químicos y alta agresividad su resistencia a la corrosión es buena

Algunas de las desventajas encontradas en estructuras de concreto [30]:

- Tiene un alto costo los componentes
- La concentración de tensiones pueden crear grietas en los refuerzos, ya que estos sistemas se unen en el exterior del hormigón con resina epoxi y debe ser realizado correcta y adecuadamente, si no se hace pueden aparecer las grietas.
- La tolerancia al fuego es de 80 grados centígrados, si pasa de esta temperatura los FRP se separará del acero.

Los FRP de matriz epoxi y fibras PEN (polietileno de naftalato) y PET (Polietileno de tereftalato), tienen una capacidad superior al 5% en cuando a su deformación, esto los hace perfectos para la absorción de energía, algo muy necesario en el tema de protección sísmica en las construcciones [31].

### **1.8.1 Resultados de estudios previos**

Esta investigación es una continuación al estudio Caracterización de un material con resina epoxi, reforzado con 20% PET triturado sometido a cargas de tracción [32]. Este estudio desarrollo un material compuesto muy similar y realizo ensayos de tracción. Los resultados de esta investigación son:

- La resina-PET, con un calentamiento de la mezcla de tres minutos, demostró un decremento del 28%, de 60.6 MPa a 43.6 MPa, en su esfuerzo máximo a tensión.
- La resina-PET, con un calentamiento de la mezcla de cinco minutos, demostró un decremento del 7.5%, de 50.5 MPa a 46.7 MPa, en su esfuerzo máximo a tensión.
- Concluye que la disminución en la resistencia del material se podría atribuir a la repartición de las escamas plásticas de refuerzo en la matriz.

### **1.9 Método de manufactura de resultados previos**

La investigación Caracterización de un material de resina epoxi, reforzada al 20% de PET triturado sometido a cargas de tracción [32]. Presenta un método de manufactura con el material

compuesto resina-PET al 20% y resina pura. Este método se encuentra resumido paso a paso a continuación:

- El PET, proveniente solo de botellas, paso por un proceso de lavado con agua y secado al sol. Además, se retiraron las etiquetas y las tapas debido a que estas podrían contener o ser de otros materiales.
- Todo el PET se molió en un Molino 15/21 M2.6 pm Inson. Para esto se requirió pre cortar las botellas de PET a pedazos rectangulares menores a 5cm por 5cm para evitar el atascamiento del molino. Además, se requirió de pausas regulares para evitar el sobrecalentamiento del PET el cual se podía derretir y agrumar. Finalmente, el PET se vertía de poco en poco al molino para evitar sobrecargarlo.
- La forma del molde se desarrollo en el software Autodesk AutoCAD y se utilizó para cortar a laser una plancha de MDF de 6mm de espesor dejando agujeros donde se vertería la mezcla.
- La combinación se hizo usando un 20% de PET en volumen. Las medidas se realizaron utilizando instrumentos básicos como balanzas y jeringas.
- El mezclado de la resina epoxica con el endurecedor (y PET en la mezcla correspondiente) se realizó por cuatro a cinco minutos. Después de esto se realizo un calentamiento de la mezcla con el objetivo de extraer las burbujas de aire atrapadas durante el mezclado. Esto tiene el propósito de minimizar la porosidad del material y evitar los concentradores de esfuerzo. Este calentamiento se realizó con dos tiempos (tres minutos y cinco minutos) con el simple objetivo de evaluar, al realizar el ensayo de tracción, cual tiempo de calentamiento otorgo mejores resultados. Se aclara que el calentamiento de tres minutos se aplico a la mezcla de resina pura y a la resina-PET, de igual manera al calentamiento de cinco minutos, para comparar resultados de resina pura versus resina-PET con el mismo tiempo de calentamiento. Este calentamiento se realizo colocando el contenedor con la mezcla dentro de otro contenedor con agua caliente, este proceso se conoce popularmente como “baño maría”.
- El molde diseñado para 40 probetas se monto utilizando una plancha de MDF como base. Encima de la base se coloco una muy fina plancha plástica para impedir que la mezcla se adhiere a la base. Luego se coloco el molde cortado a laser y se aseguro las tres plantas con tornillos para evitar que la plancha plástica se expanda con la mezcla. Aquí es cuando se vertió las mezclas al molde en los agujeros cortados a laser de la

plancha de MDF. Una vez vertida la mezcla se cubrió con otra fina plancha plástica y encima otra plancha de MDF para mantener la superficie de la mezcla plana. Encima de esta última plancha se colocó peso para evitar la expansión excesiva de la mezcla al secarse.

- Las mezclas se dejaron curar por 24 horas.
- Después del curado de 24 horas se desmontó el molde dejando solo la plancha cortada a laser que contenía ahora la resina epóxica y resina-PET endurecida.
- En el software Autodesk AutoCAD se realizaron los planos de la geometría requerida para las probetas y se prosiguió a cortar a laser las probetas. La geometría requerida para las probetas se establece en la norma ASTM D638.
- Finalmente, las probetas que presentaron un ancho mayor a los 6 mm requeridos, debido a la expansión durante el curado, se lijaron con lija 80 hasta alcanzar los 6 mm. Mientras se lijaban se colocaron en un molde de 6mm en ancho para asegurar la medida deseada correcta. De esta forma las probetas quedaron listas para el ensayo de tracción.

### **1.10 Propiedades del Pet**

El PET se considera un termoplástico debido a su capacidad de comportarse como un líquido al calentarse y volver a su estado sólido una y otra vez. La forma del material se puede transformar con distintos procesos de extrusión como lo son la inyección, termoformado, soplado, etc. Las propiedades del PET se listan a continuación:

- Resiste altas cargas incluso con la aplicación de colorantes o en plena transparencia.
- No se oxida y tiene mucha resistencia al desgaste.
- Buena relación de desplazamiento.
- Buen conductor térmico y químico.
- Buenas compatibilidades con otros materiales, permitiendo mejorar la calidad de barrera de envases plásticos usados dentro del mercado industrial.
- Buenos estándares de calidad para el contacto de productos alimenticios.

A continuación, se muestran las cualidades mecánicas del PET:

**Tabla 1.** *Tabla 1 Especificaciones Técnicas de las propiedades mecánicas PET [33].*

<b>Propiedades Mecánicas PET</b>	<b>Datos</b>
<b>Resiliencia a ensayos de tracción</b>	59 - 72 MPa
<b>Módulo de flexibilidad a ensayo de tracción.</b>	3300 MPa
<b>Tensión límite de elasticidad</b>	91 MPa
<b>Elongación a la fluidez</b>	4%
<b>Resistencia a la flexión</b>	134 MPa
<b>Extensión a la rotura</b>	14 %
<b>Módulo de flexibilidad a flexión</b>	3400 MPa
<b>Módulo de flexibilidad a Tracción</b>	37000 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Firmeza a compresión</b>	21, 38, 89 MPa
<b>Densidad</b>	1350 kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de Young</b>	9 GPa

Además, se incluye la siguiente tabla que especifica las propiedades térmicas del PET.

**Tabla 2.** *Especificaciones de propiedades térmicas PET [34].*

<b>Propiedades Térmicas PET</b>	<b>Datos</b>
<b>Temperatura de transición</b>	81 °C
<b>Temple de unión</b>	244 °C
<b>Temperatura de servicio</b>	170 °C
<b>Capacidad calorífica</b>	1250 g °C

### **1.11 Resina epóxica**

Las resinas epóxicas presentan una variedad de aplicaciones como lo son los revestimientos, compuestos y adhesivos. Se encuentran en múltiples industrias como la química, automotriz, aeroespacial y química debido a que estas demuestran alta resistencia química, la resina epoxica se conforma de dos soluciones distintas que se conocen como agente endurecedor y la resina epóxica en si [35].

El proceso de curado, que empieza al mezclar bien estas soluciones químicas, empieza con la apertura de los anillos de oxirano al final de la cadena del polímero convirtiéndose en termoestable tridimensional de manera insoluble y que no se funde fácilmente [36]. Para obtener un curado exitoso es de suprema importancia la proporción correcta de resina epoxi y agente de curado, la cual se establece según el fabricante. La proporción errónea genera inconsistencias en la red que reducen las propiedades finales de la resina [37].

Para este estudio se utilizarán dos resinas epoxicas. la Primera es Resina Epóxica Dura Quarz Cast-11 [38], diseñada para usarse como revestimiento de mesas, barras, etc.

Sus ventajas son:

- Fácil aplicación de altos espesores de una sola capa.
- Acabado duradero y transparente.
- Mezcla de baja viscosidad
- Poca formación de burbujas.
- Se auto nivela.
- Alta resistencia a los rayos UV.
- Acabado brillante.
- Fácil de usar.
- Poco olor.

En la tabla 3, se identifican las cualidades más importantes de la resina epóxica Dura Quarz Cast-11:

**Tabla 3.** Propiedades características resina epóxica Quarz Cast-11 [38].

<b>Características de resina epóxica</b>	<b>Dura Quarz Cast-11</b>
<b>Viscosidad (cps at 25°C)</b>	2000-3000 mPa.s
<b>Densidad</b>	1.33 kg/L
<b>Pot- Life (a 25°C)</b>	30-35 min
<b>Relación resina: endurecedor</b>	1:1 al peso
<b>Tiempo de secado</b>	12h a 25°C
<b>Tiempo de curado</b>	48h a 25°C
<b>Espesor máximo</b>	2 cm
<b>Dureza</b>	Shore D84
<b>Apariencia</b>	Transparente

la segunda resina a utilizar es Resina Epóxica Q2 – Refuerzo Estructural [39], diseñada en base de resina líquida tipo bisfenol A con un aditivo llamado catalizador de solución de amoníaco. Estos componentes brindan una buena penetración en superficies tales como concreto.

Se utiliza en:

- Refuerzos estructurales
- Estructuras o piezas que soporten altas temperaturas
- Selladores de superficies porosas
- Reforzar piezas o estructuras sometidos a esfuerzos mecánicos
- Sector Aeroespacial
- Sector Automotriz

En la tabla 4, se menciona las características importantes de la resina epóxica Q2 refuerzo estructural para fibras de carbono mostrada a continuación.

**Tabla 4.** Propiedades características resina epóxica Q2 [39].

<b>Características de resina epóxica</b>	<b>Q2</b>
<b>Viscosidad (cps at 25°C)</b>	11.500 mPa.s
<b>Densidad Comp A</b>	1.17 kg/L
<b>Pot- Life (a 20°C, 200gr)</b>	130min
<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	79
<b>Fuerza de compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	554
<b>Tensión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	370
<b>Resistencia a la adhesión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	116
<b>Impacto (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	1.68
<b>Resistencia a Temperatura °C</b>	185°C
<b>Dureza</b>	Shore D85
<b>% e Absorción de agua</b>	0.201

### 1.12 Zonas del diagrama esfuerzo – deformación

De acuerdo al comportamiento en los ensayos de deformación, los polímeros se clasifican en: elastómeros, plásticos flexibles, plásticos rígidos y fibras [40], cada uno de ellos tienen diferentes curvas de deformación, como se puede apreciar los elastómeros son los de mayor deformación a menor fuerza, los plásticos rígidos y fibras son los que tienen una mayor resistencia y la curva de los plásticos flexibles está en medio.

### 1.13 Evaluación de propiedades mecánicas con ensayos destructivos

Se realizan ensayos destructivos para poder hacer el análisis de las cualidades mecánicas de los materiales. Para esto se realiza un número de pruebas a probetas o muestras, para poder caracterizar su comportamiento. Las probetas deben ser elaboradas bajo las normativas ASME, ISO, UNE, ASTM, ICONTEC, INEN, etc. Para realizar el ensayo destructivo se requiere de equipos de laboratorio adecuados.

Los ensayos se rigen bajo la Sociedad Americana, ASTM desarrollando normativas para ensayos de laboratorio de materiales en conjunto de la caracterización de materiales compuestos. De tal manera, los análisis realizados en esta investigación para la identificación

del material compuesto, enfocado en ensayo de flexión, bajo normativa ASTM para materiales compuestos, la Universidad Politécnica Salesiana cuenta con el equipo universal de ensayos de flexión.

#### 1.14 Norma de ensayo ASTM D 7264/D 7262M - 07

La norma ASTM D 7264/D 7262M – 07 fue específicamente diseñada para realizar ensayos de flexión con materiales compuestos. Con esta se puede determinar principalmente el máximo esfuerzo de flexión, máxima deformación y el módulo de elasticidad de flexión [41].

La norma permite ensayo de flexión de tres puntos o cuatro puntos, donde se recomienda que las probetas tengan la geometría mostrada en la fig. 10:



Figura 10. Geometría de la probeta requerida para la norma ASTM D 7264/D 7262M - 07 [41].

La norma plantea una sección transversal de la probeta de 13 mm de alto y 4 de ancho. Lo importante a cumplir es la razón de largo a ancho que debe ser 32:1. Otras razones son aceptables mientras se mencione en la investigación. Las otras razones aceptables son 16:1, 20:1, 40:1 y 60:1. Además, los datos obtenidos de un ensayo con una razón no se pueden comparar con los datos de otro ensayo que utilice una razón diferente.

El número de probetas debería a probar, por condición, es cinco pero pueden ser menos si se pueden encontrar resultados validos con menos, como es el caso de un experimento diseñado [41].

### 1.15 Cálculos de propiedades mecánicas de materiales compuestos

Las siguientes ecuaciones, descritas en la norma ASTM D7264/D 7264M - 07 [41], permiten realizar los cálculos de las propiedades mecánicas relacionadas al ensayo de flexión. Solo se especifican las ecuaciones correspondientes al ensayo con tres puntos de apoyo.

Esfuerzo máximo de flexión: en el momento en que una viga homogénea y de material elástico, se prueba en curvatura sostenida en dos puntos y forzada con una carga en el punto medio, el esfuerzo máximo en la superficie exterior ocurre en la mitad del segmento. El esfuerzo se puede calcular para algún punto de la curva de carga-deflexión con la ecuación 3:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3)$$

$\sigma$  = esfuerzo en la área exterior en el punto medio del segmento, MPa [psi],

$P$  = fuerza aplicada, N [lbf],

$L$  = tramo de soporte, mm [plg],

$b$  = ancho de la viga, mm [plg], y

$h$  = espesor de la viga, mm [plg].

Tener en cuenta que la ecuación 3 se aplica únicamente a los materiales para los cuales la tensión es linealmente proporcional a la deformación hasta la marca de ruptura, teniendo en cuenta que las deflexiones deben ser pequeñas. El cálculo será legítimo para datos de comparación y valores de especificación hasta una deflexión máxima del 2 % para las muestras ensayadas mediante el procedimiento establecido por la norma.

La resistencia a la flexión es igual al máximo esfuerzo en la superficie exterior correspondiente a la fuerza máxima aplicada antes de la falla. Se calcula tomando  $P$  como la fuerza máxima aplicada en la misma ecuación 3.

La máxima deformación en el área exterior también ocurre en el punto medio del segmento, y se calcula mediante la ecuación 4:

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (4)$$

Donde:

$\epsilon$  = máxima deformación en la parte exterior, mm/mm [plg/plg],

$\delta$  = deflexión en la mitad del segmento, mm [plg],

$L$  = tramo de soporte, mm [plg], y

$h$  = espesor de la viga, mm [plg].

El módulo de cuerda de elasticidad de flexión ( $E_f^{cuerda}$ ) es la relación entre el rango de esfuerzo y rango de deformación correspondiente. Para calcular el módulo de cuerda de elasticidad, el rango de deformación recomendado es 0.002 con un inicio en el punto de 0,001 y un punto final de 0,003. Si los datos no están disponibles en estos puntos exactos del rango de deformación (como ocurre a menudo con datos digitales), use los puntos de datos disponibles más cercano. Se calcula el módulo de cuerda de elasticidad usando la ecuación 5:

$$E_f^{cuerda} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (5)$$

Donde:

$E_f^{cuerda}$  = módulo de cuerda de elasticidad de flexión-curvatura, MPa [psi],

$\Delta\sigma$  = diferencia en esfuerzo de curvatura entre los dos puntos de deflexión elegidos, MPa [psi], y

$\Delta\epsilon$  = diferencia en deflexión entre los dos lugares de deflexión elegidos.

Si un rango de deflexión diferente ubicado entre 0.001 y 0.003 es usado, debe ser reportado. Además, el modulo de cuerda debe ser reportado pero otras definiciones de módulo de elasticidad también se pueden utilizar siempre que se indique en el reporte.

El módulo de secante de elasticidad de flexión ( $E_f^{secante}$ ) está dada por la correlación entre el esfuerzo y la deformación correspondiente en cualquier lugar de la gráfica esfuerzo-deformación. El módulo de secante es el mismo que el módulo de cuerda en el que el punto de deformación cero. Se expresará en MPa [psi]. Se calcula de la siguiente manera en la ecuacion 6:

$$E_f^{secante} = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (6)$$

Donde:

$E_f^{cuerda}$  = módulo de secante de elasticidad de flexión, MPa [psi],

$L$  = tramo de soporte, mm [plg],

$b$  = ancho de la viga, mm [plg],

$h$  = espesor de la viga, mm [plg], y

$m$  = pendiente de la secante de la curva carga-deformación.

Para las estadísticas, por cada serie de pruebas calcule la valoración media, desvío estándar y coeficiente de variación por atributo:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) \quad (7)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - nx^2)}{n-1}} \quad (8)$$

$$CV = 100 \cdot \frac{s_{n-1}}{\bar{x}} \quad (9)$$

Donde:

$\bar{x}$  = valor promedio,

$x_i$  = valor medido o derivado,

$n$  = número de especímenes,

$s_{n-1}$  = desviación estándar estimada,

$CV$  = coeficiente de variación en %.

### **1.16 Maquina universal de ensayo de flexión**

La Universidad Politécnica Salesiana cuenta con un equipo-maquina universal de ensayos de flexión Testresources modelo 316-1096, esta se puede ver en la Fig. 11, también puede utilizarse para ensayos de tensión y compresión. Esta maquina cuenta con una configuración de tres puntos y rodillos de 10mm. Además, puede realizar el ensayo de flexión con probetas de un largo mínimo de 40 mm.



*Figura 11. Máquina de flexión Testresources modelo 316-1096.*

## **CAPÍTULO II**

### **MATERIALES Y METODOLOGÍA**

#### **2.1 Descripción**

Esta investigación se basó en métodos de manufactura de materiales compuestos similares, los cuales se encontraron mediante investigación experimental, científica y ensayos de laboratorio. Sobre todo, esta investigación se basa, con énfasis en el método de manufactura, en la investigación Caracterización de un material de resina epoxi, reforzada al 20% de PET triturado sometido a cargas de tracción [32]. Se aplicaron estos conocimientos para desarrollar la obtención de este nuevo material compuesto, con la intención de mejorar la resistencia a la flexión.

Para este estudio se utiliza dos resinas epoxicas con el objetivo de observar cómo, al ser reforzadas con PET, cambia su comportamiento según sus características originales.

#### **2.2 Preparación y Molienda del PET**

Previo a la molienda, el PET, proveniente solo de botellas, pasa por un proceso de lavado con agua y secado al sol. Además, se retiran las etiquetas y las tapas debido a que estas podrían contener o ser de otros materiales. A continuación, el PET se muele en un Molino 15/21 M2.6 pm inson que se muestra en la fig. 12. Para esto se requiere pre cortar las botellas de PET a pedazos rectangulares menores a 5cm por 5cm para evitar el atascamiento del molino. Además, se requiere de pausas regulares para evitar el sobrecalentamiento del PET el cual se puede derretir y agrumar. Finalmente, el PET se vierte de poco a poco al molino para evitar sobrecargarlo.



*Figura 12. Molino 15/21 M2.6 PM INSON utilizado para la molienda del PET. Fuente: El autor.*

Se utiliza el PET triturado y no pellets por dos razones. La primera es que los pellets presentan una forma aproximándose a una esfera con una superficie mínima, mientras el PET triturado presenta una geometría aproximándose a una escama usualmente triangular. La segunda es la superficie muy rugosa que se encuentra en los bordes de estas escamas de PET triturado que aumentan la superficie y posibilitan una mayor adherencia a la resina epoxica. La fig. 13 muestra las escamas de PET triturado las cuales tiene un área de 5 a 36 mm<sup>2</sup> y un área promedio de 17 mm<sup>2</sup>.



*Figura 13. Escamas de PET triturado donde se evidencia su gran superficie y presencia de rebabas las cuales no están presentes en el PET peletizado. Fuente: el autor.*

### 2.3 Diseño y fabricación del molde

La forma del molde se desarrolla en el software Autodesk AutoCAD y se utiliza el método de cortado a laser para cortar dos planchas de MDF de 6mm de espesor dejando agujeros donde se verterá la mezcla. El molde, diseñado para 12 probetas, se monta utilizando una plancha de MDF de 6mm como base. Encima de la base se coloca una muy fina plancha plástica para impedir que la mezcla se adhiera a la base. Luego se coloca las dos planchas cortadas a laser, que previamente se pegaron con superglue. Aquí es cuando se vierte las mezclas al molde en los agujeros cortados a laser de las planchas de MDF, de las cuales se dará más información más adelante. Una vez vertida la mezcla se cubre con otra fina plancha plástica y encima otra plancha de MDF para mantener la superficie de la mezcla plana. Encima de esta última plancha se coloca un peso de 3 kg para evitar la expansión excesiva de la mezcla al secarse. La fig. 14 muestra como se ensambla el molde completo.

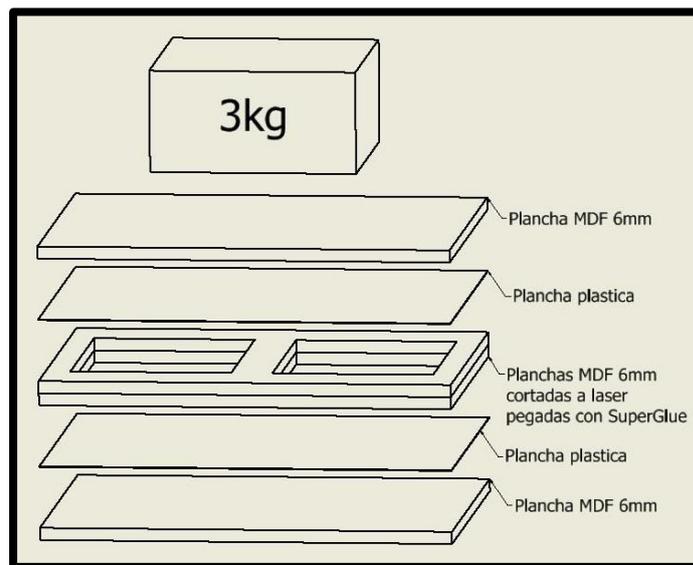


Figura 14. Ensamble del molde para conformado de las probetas – capas que lo constituyen. Fuente: El autor.

#### 2.3.1 Elaboración de probetas normadas para ensayo de flexión

Para este estudio se utiliza dos resinas epoxicas con el objetivo de observar cómo, al ser reforzadas con PET, cambia su comportamiento según sus características originales. Para el primer set de probetas se utiliza Resina Epóxica Dura Quarz Cast-11 [38] y para el segundo se utiliza Resina Epóxica Q2 – Refuerzo Estructural [39]. Se utilizan estas dos resinas debido a que presentan una gran diferencia en su valor de resistencia mecánica comparando los valores

dados por el fabricante. La resina Dura Quarz Cast-11, se utilizo principalmente para probar el método de manufactura previo a realizar las probetas con la resina Q2. Esta resina se preparó con una relación 1:1 en peso de resina-endurecedor, la cual presenta una resistencia relativamente baja. En cambio, la resina Q2 presenta una resistencia relativamente alta debido a una relación 100:14 en peso de resina-endurecedor y se elige porque está específicamente diseñada para utilizarse como refuerzo estructural de acuerdo con lo reportado por el fabricante.

La metodología es el mezclado manual a una velocidad lenta para minimizar el encapsulamiento de aire y la creación de burbujas. Esta metodología se escogió debido a que no requiere de equipo extra, es el método más recomendado en la industria y es el que más se ajusta a las capacidades técnicas en esta etapa de la investigación. La mezcla se realiza usando un 40% de PET en volumen. Las medidas se realizan utilizando instrumentos básicos como balanzas y jeringas. El mezclado de la resina epoxica con el endurecedor se realiza por cuatro minutos. Después, en las mezclas correspondientes se agrega el PET triturado y se mezcla por cinco minutos más. Posteriormente se vierte las mezclas en los moldes correspondientes. Las mezclas de resina Dura Quarz Cast-11 se curan por 48 horas, mientras las mezclas de Resina Epóxica Q2 – Refuerzo Estructural se curan por tres semanas.

Se eligió un 40% de refuerzo en volumen debido a que un estudio previo en que se utilizó un 20% reporto resultados en los que no existía mayor diferencia en las propiedades mecánicas estudiadas en los dos materiales, por lo que se considero duplicar la cantidad de refuerzo para medir el efecto de esta sobre el material original.

### **2.3.2 Extracción de probetas del molde**

Después del curado se desmonta los moldes dejando solo las planchas cortadas a laser que ahora contienen la resina epóxica y resina-PET endurecidas. La fig. 15, muestra como se ve el material curado antes de ser sacado del molde:



Figura 15. Extracción de probetas. A la izquierda se encuentra la resina pura y a la derecha la resina-PET. Fuente: el autor.

Para la extracción de las probetas del molde se lija el exceso de material, solo existente en la resina-PET con amoladora con disco de lija. Luego se utiliza la amoladora con disco de corte para metal para cortar de forma longitudinal el molde como se muestra en la fig. 17.

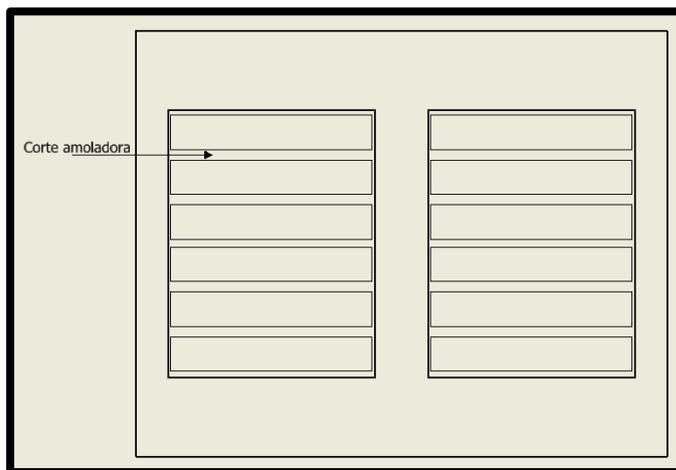
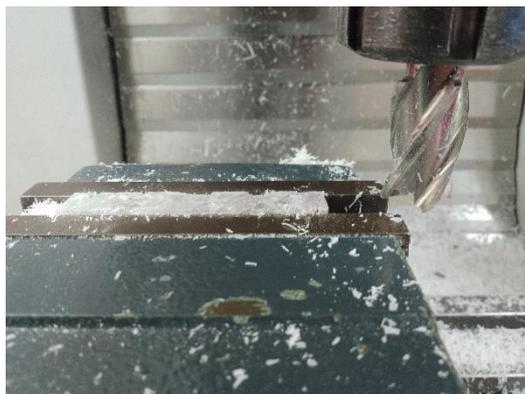


Figura 16. Extracción de probetas del molde mediante corte del molde con amoladora. Fuente: el autor.

Luego se cortan los extremos restantes de MDF, de igual manera con la amoladora.

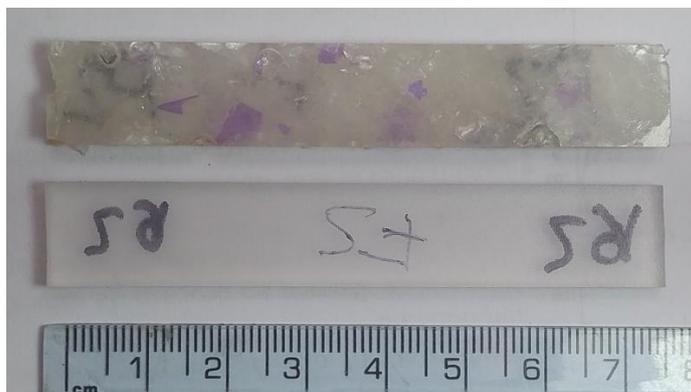
### 2.3.3 Obtención de geometría final

Para la obtención de la geometría final se realizan dos métodos, uno para cada resina. Las probetas de resina Dura Quarz Cast-11 obtienen su geometría final mediante el método de mecanizado en fresadora. La fresadora EmcoMat FB-450 L se utiliza para este fin y se puede ver en la fig. 17.



*Figura 17. Obtención de geometría final de las probetas de resina Dura Quarz Cast-11 mediante el método de mecanizado en fresadora de la probeta. Fuente: el autor.*

La geometría final de las probetas se puede advertir en la fig. 18, las cuales miden 77x13x4 mm.



*Figura 18. Geometría final de las probetas con Dura Quarz Cast-11*

*Fuente: El autor.*

Las probetas de Resina Epóxica Q2 – Refuerzo Estructural obtienen su geometría final mediante el método de lijado con el uso de lija debido a fragilidad relativa, que podría quebrarse durante el mecanizado por fresadora. La geometría final se deja ver en la fig. 19 las cuales miden en promedio 77x14x11 mm. Las dimensiones de estas probetas difieren de las realizadas con resina Cast-11, estas se realizaron con un ancho y alto superior al recomendado por la norma para asegurar que resistan la carga mínima ejercida por la maquina universal de ensayos a flexión.

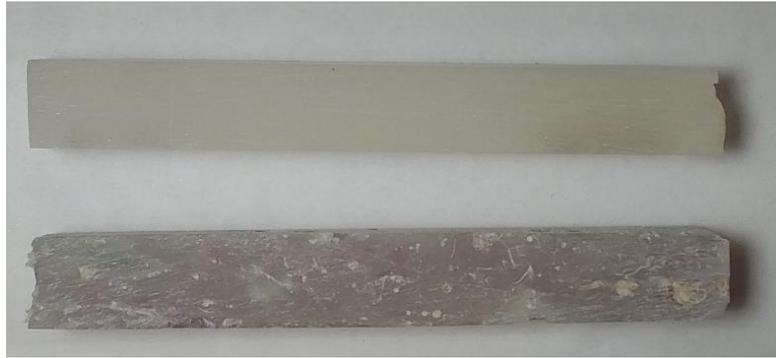


Figura 19. Geometría final de las probetas de Resina Epóica Q2. Fuente: EL autor.

Se obtuvieron 12 probetas con las dimensiones apropiadas para soportar la carga de la maquina universal en la que se realizarían los ensayos. De acuerdo a la norma ASTM D7264/D 7264M – 07 que estipula un requerimiento mínimo de cinco probetas para obtener resultados válidos. Se han ensayado seis probetas con refuerzo y seis sin refuerzo, con lo que se cumple las condiciones mínimas de validez de resultados.

#### 2.3.4 Ensayo de flexión

Este ensayo se lleva a cabo de acuerdo con las especificaciones ASTM D7264 /D 7264M – 07, en un equipo universal de ensayos de flexión Testresources modelo 316-1096, fotografiado en la fig. 20.



Figura 20. Equipo Universal de ensayos de Flexión Testresources 316-1096 (izq.) y probeta con tres puntos de apoyo y rodillos de 10mm (der.) Fuente: autor.

La máquina se configura con una rapidez de 1mm/min y un soporte de tres puntos. Se realiza dos excepciones a la norma. La primera excepción es el diámetro de los rodillos de apoyo. Se utiliza rodillos de 10mm en lugar de rodillos de 6mm especificados debido a la falta de

rodillos del diámetro requerido. La segunda excepción es la razón estándar de tramo a ancho requerida. En este caso se utiliza una razón menor debido a la poca resistencia ofrecida por el material que requiere de una razón menor para soportar la carga mínima aplicada por la maquina universal.

#### **2.4 Micrografía**

La micrografía, llevada a cabo con el método de microscopia, se realiza con el fin de estudiar la interfaz refuerzo-matriz y distribución del refuerzo. Para esto se preparó la sección transversal de la probeta con lijas 100, 240 y 1200 de forma progresiva para alcanzar una superficie lo suficientemente plana para observar en microscopio. No se realizó un baño químico. Las imágenes se capturaron con sensor digital.

## **CAPITULO III**

### **ANALISIS DE RESULTADOS**

#### **3.1 Evaluación de procesamiento de datos**

Mediante el ensayo de flexión aplicado a las probetas del material compuesto polimérico, se caracteriza el material en cuanto a su esfuerzo máximo, deformación máxima y la elasticidad del material de estudio, estos ensayos se realizan a cada probeta de manera individual. Mediante software especializado se sistematizan los resultados. El procesamiento de datos se realiza con los softwares Microsoft Excel, RStudio y Minitab18, para organizar los datos y realizar el análisis estadístico. Se utiliza el método Anova como análisis estadístico.

Los datos más relevantes se presentan en tablas en este capítulo, pero se incluye una tabla de Excel con resultados completos del ensayo de una probeta en los anexos.

#### **3.2 Observaciones generales**

Este estudio se realizó con dos resinas epoxicas, pero al realizar el ensayo de flexión con las probetas realizadas con la resina Dura Quarz Cast-11, están probaron ser muy poco resistentes y no soportaron la carga mínima que la maquina universal de ensayo de flexión requiere para encerar. Debido a esto solo se estudian los datos de la curva carga-deformación de los ensayos de flexión de la Resina Epóxica Q2 – Refuerzo Estructural.

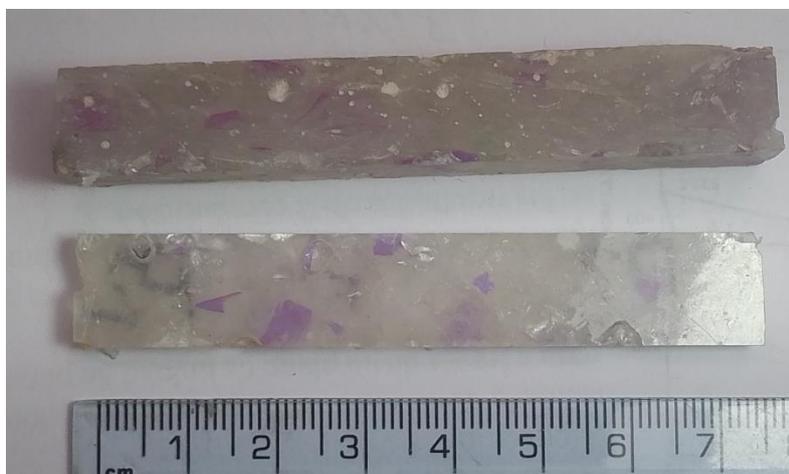
Al cortar el material del molde se puede observar que las probetas de resina Q2 presentan alta rigidez y son quebradizas mientras las probetas de resina Dura Quarz Cast-11 puras resultan ser demasiado flexibles. Estos dos casos se observan en la Fig. 21.



*Figura 21. Probeta de resina pura Dura Quarz Cast-11 (izq.) la cual resulta ser muy flexible y resina Q2 (der.) la cual resulta ser quebradiza.*

Al agregar el PET triturado como refuerzo las probetas de resina Dura Quarz Cast-11 pasan de ser muy flexibles a muy rígidas pero quebradizas. Para la resina Q2, al agregar el refuerzo dejan de ser quebradizas y resisten los cortes con amoladora.

Se observó un aumento en la porosidad del material al agregar refuerzo en ambas resinas, pero más en la resina Dura Quarz Cast-11. Se puede ver en la Fig. 22.



*Figura 22. Probeta de resina pura Dura Quarz Cast-11 (abajo) la cual resulta ser rígida y quebradiza y resina Q2 (arriba) la cual no resulta quebradiza al momento de mecanizar.*

Esto se podría deber en parte a que la probeta de resina Dura Quarz Cast-11 se mecaniza con fresadora mientras las de resina Q2 solo se tratan con lija.

### 3.3 Análisis del gráfico esfuerzo - deformación

En el gráfico de esfuerzo-deformación, en la fig. 23, que incluye solo las probetas con refuerzo, se puede hacer las siguientes observaciones:

- La deformación no aumenta de manera lineal con el esfuerzo, si no que el esfuerzo alcanza un máximo y luego decrece.
- Existe una variación relativamente alta en las magnitudes del esfuerzo máximo y la deformación máxima entre las probetas.

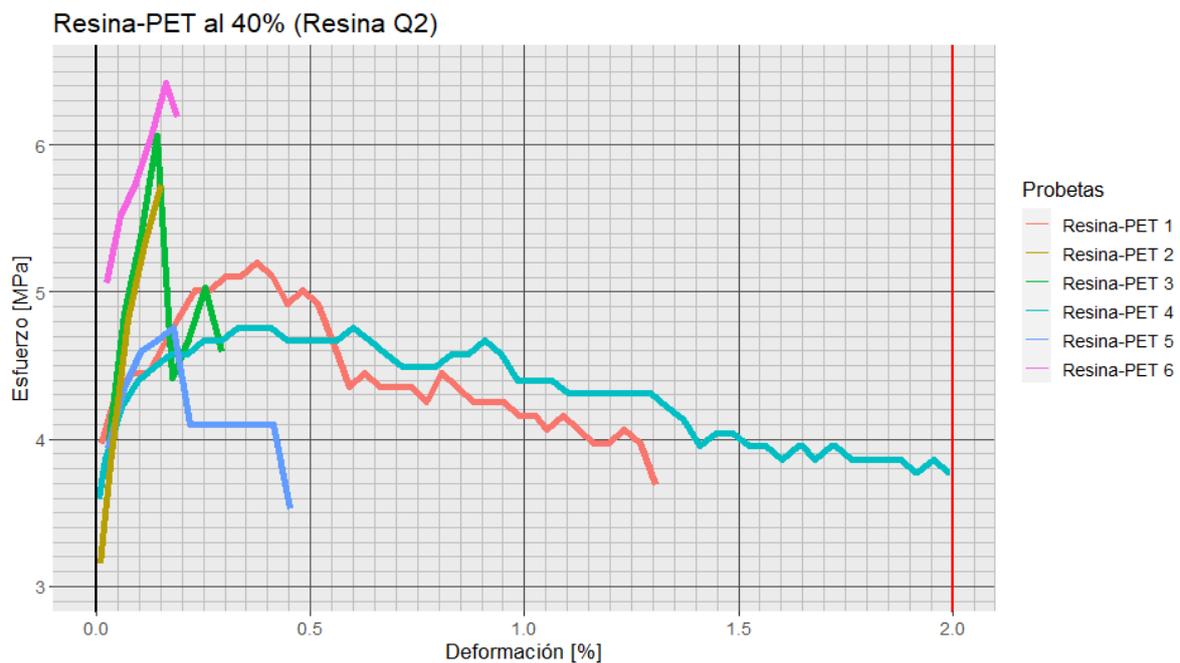


Figura 23. Esfuerzo-Deformación de Resina-PET al 40% (Resina Q2) donde se observa una alta variación en la magnitud de la deformación máxima.

Aquí se aclara que los valores de esfuerzo iniciales de las probetas se encuentran entre 3 y 5 MPa debido a las condiciones técnicas de la maquina universal de ensayos de flexión, la cual requiere de una carga mínima antes de iniciar el ensayo para asegurar que los sensores detecten la probeta.

La fig. 24 presenta, de igual forma, la curva esfuerzo-deformación incluyendo solo las probetas con refuerzo hasta una deformación de un 0.5%. Aquí se observa que hay probetas muy rígidas y otras muy elásticas. Estas probetas, extraídas del mismo lote, demuestran que la plancha no presenta homogeneidad en las propiedades mecánicas. Esto se puede atribuir a la porosidad y

la distribución no homogénea de refuerzo. Más detalles de este fenómeno se encuentra en el análisis de micrografía.

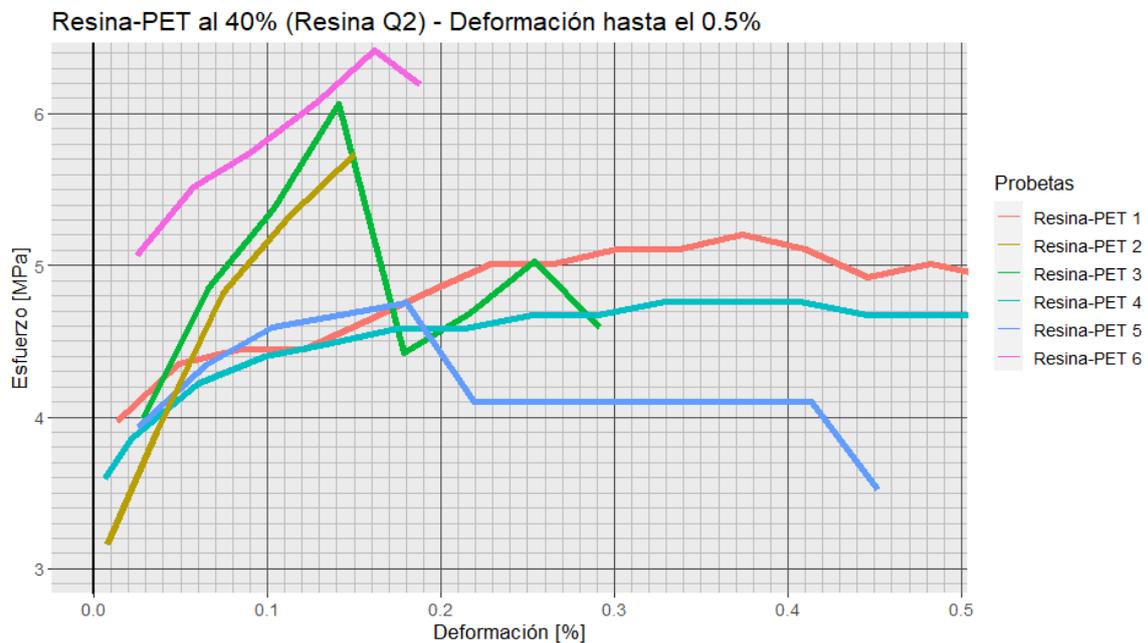


Figura 24. Esfuerzo-Deformación de Resina-PET al 40% (Resina Q2) – Deformación hasta el 0.5% donde se observa mucha variación en la magnitud del esfuerzo máximo y la elasticidad.

En la curva esfuerzo-deformación de la fig. 25, que incluye las probetas con y sin refuerzo, se puede hacer las siguientes observaciones:

- Las probetas de resina epoxi demuestran un comportamiento mayormente lineal.
- El esfuerzo y la deformación máximos de las probetas de resina epoxi son claramente mucho mayores a las probetas de resina-PET al 40%.
- A diferencia de las probetas de resina-PET al 40%, las probetas de resina epoxi demuestran un comportamiento mucho más consistente.

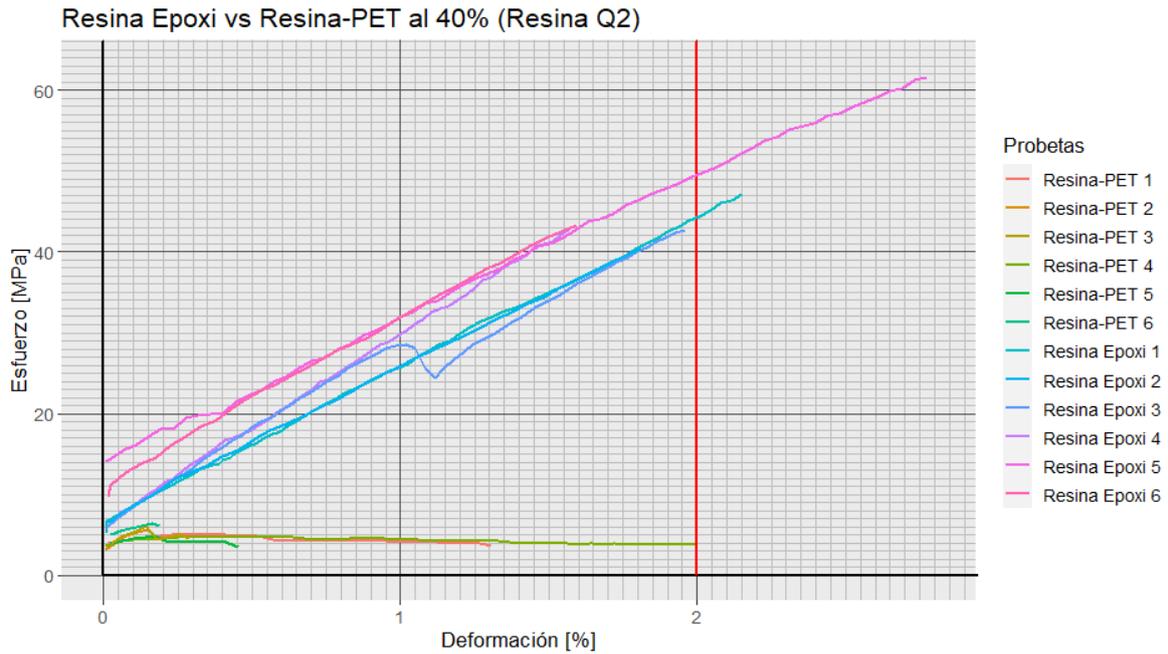


Figura 25. Curva Esfuerzo-Deformación de Resina Epoxi vs Resina-PET al 40% (Resina Q2) donde la resina epoxi pura demuestra alta consistencia, alta linealidad, esfuerzos máximos y deformaciones máximas mucho mayores a la Resina-PET.

### 3.4 Análisis estadístico de esfuerzo máximo

Se realiza un análisis estadístico al esfuerzo máximo mediante el método anova comparando los datos del ensayo de flexión de las probetas de resina epoxi pura con las de resina-PET. En la tabla se observa que el esfuerzo de la resina epoxi pura demuestra ser en promedio 60 MPa mayor a la resina-PET. Además, se puede asegurar que esta diferencia es válida debido a un valor p prácticamente igual a cero.

**Tabla 5.** Resultados de ensayos donde se lista el esfuerzo máximo presentado por cada probeta ensayada de manera individual, comparación del promedio y varianza y presentación del valor p.

Esfuerzo Máximo [MPa]		
Número de Probeta	Resina Epoxi	Resina-PET al 40%
1	47.09	5.20
2	40.42	5.73
3	42.64	6.07
4	42.81	4.76
5	61.52	4.75
6	43.35	6.42
Promedio [MPa]	65.31	5.49
Varianza [MPa <sup>2</sup> ]	60.2	0.485
Valor P	0,000	

En la gráfica de intervalos que se puede ver en la fig. 26, se observa como el esfuerzo máximo resulta ser muy distinto para las dos probetas y que no hay sobreposición en los intervalos lo cual significa que bajo un grado de confianza del 95 por ciento, las magnitudes son distintas y que la diferencia entre estas s no es al azar.

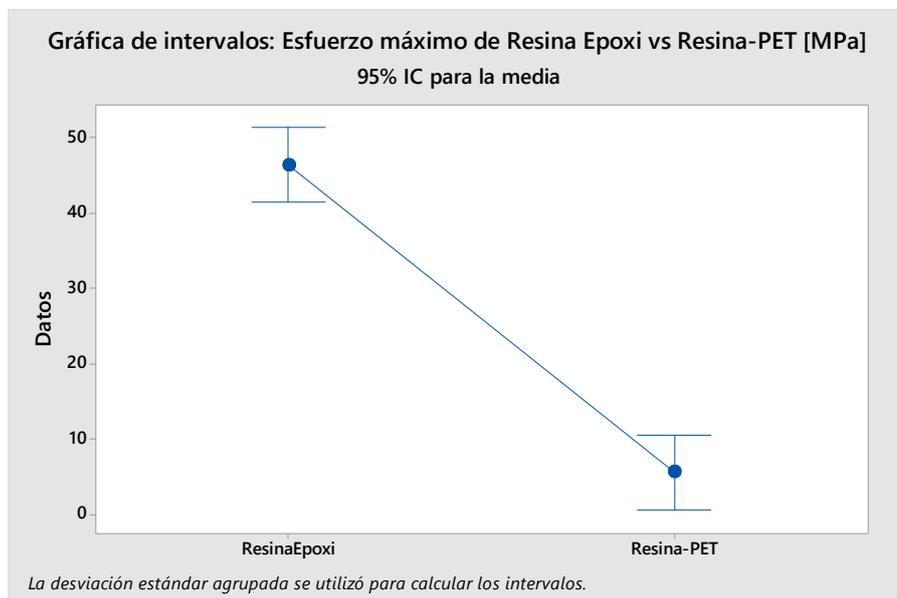


Figura 26. Gráfica de intervalos de esfuerzo máximo. El promedio se representa con el punto y el intervalo es  $\pm$  la desviación estándar. Si los intervalos no se superponen significa que la diferencia entre promedios es válida con un nivel de confianza del 95%.

En la gráfica de caja también se observa una gran diferencia entre el esfuerzo máximo de las dos probetas, esto se puede ver en la fig. 27. Además, se observa que los datos de la resina-PET están muy agrupados mientras que los datos de la resina epoxi no. Esto probablemente se deba a que el valor del esfuerzo máximo en estas probetas resulto ser mucho mayor y naturalmente las diferencias entre valores son más amplias. Además, se puede observar como el cuarto superior de la resina epoxi es el más grande. Esto se debe a que un solo dato resulto ser significante mayor a los demás. Aun así, este dato se conserva al ser mayor a los demás. En el caso de ser menor se ignoraría por que se consideraría una falla no relacionada al ensayo de flexión.

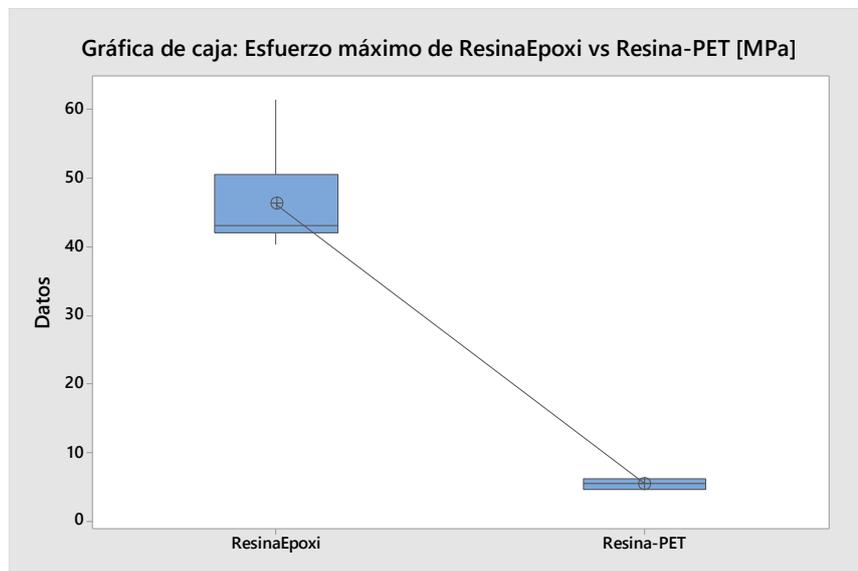


Figura 27. Grafica de caja del esfuerzo máximo de resina epoxi vs resina-PET. La grafica de caja presenta los cuartiles y como están dispersados los datos.

### 3.5 Análisis estadístico de elasticidad

También se realiza un análisis estadístico al módulo de elasticidad con el método anova comparando los datos en el ensayo de flexión de las probetas, de resina epoxi pura, con las de resina-PET. En la siguiente tabla puede observarse que la elasticidad de la resina epoxi pura demuestra ser en promedio alrededor de 1000 MPa mayor a la resina-PET. Además, se puede asegurar que esta diferencia es válida debido a un valor p igual a 0.01.

**Tabla 6.** Resultados de ensayos donde se lista el módulo de elasticidad presentado por cada probeta ensayada de manera individual, comparación del promedio y varianza y presentación del valor p.

Elasticidad [MPa]		
Número de Probeta	Resina Epoxi	Resina-PET al 40%
1	1882.7	319.09
2	1858.3	1800.3
3	1752.5	1801.8
4	2312.2	303.37
5	1610.0	507.71
6	2055.9	942.35
Promedio [MPa]	1911.9	945.8
Varianza [MPa <sup>2</sup> ]	60250	492064
Valor P	0,00975	

En la gráfica de intervalos se observa como la elasticidad resulta ser distinta para las dos probetas y que no hay sobreposición en los intervalos. Aun así, los intervalos casi se sobreponen entre si lo cual significa que no existe mucha diferencia, pero si se asegura que bajo un grado de confianza del 95 por ciento, los valores son distintos y que la diferencia entre ellos no es al azar. Asi se observa en la fig. 28.

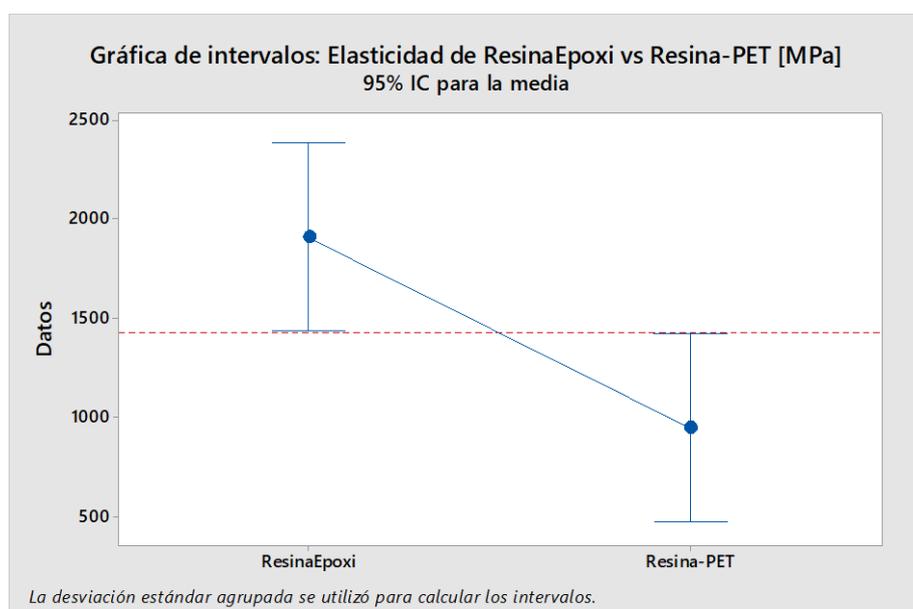


Figura 28. Gráfica de intervalos de elasticidad. El promedio se representa con el punto y el intervalo es  $\pm$  la desviación estándar. Si los intervalos no se sobreponen significa que la diferencia entre promedios es válida con un nivel de confianza del 95%.

En la gráfica de caja fig. 29, también se observa una diferencia entre la elasticidad de las dos probetas. Además, se observa que los datos de la resina-PET están muy dispersados. Esto podría deberse a la composición única del material la cual varía según como el refuerzo de PET este distribuido en cada probeta.

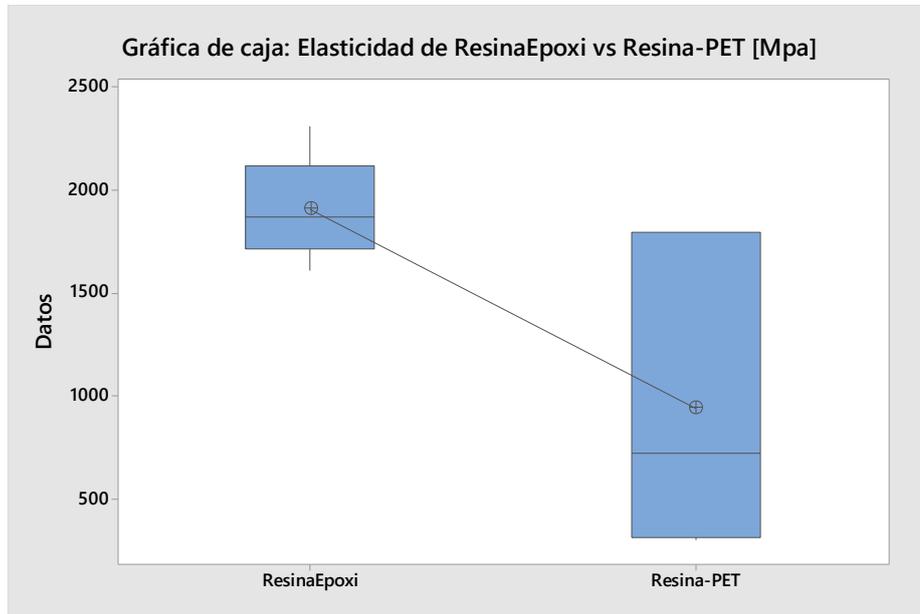


Figura 29. Gráfica de caja de elasticidad de resina epoxi vs resina-PET. La gráfica de caja presenta los cuartiles y como están dispersados los datos.

### 3.6 Análisis estadístico de deformación máxima

Finalmente, también se realiza un análisis estadístico a las deformaciones máximas mediante el método anova comparando los datos en el ensayo de flexión de las probetas de resina epoxi pura con las de resina-PET. En la tabla se puede observar la deformación máxima de la resina epoxi pura, esta demuestra ser en promedio un 1.2% mayor a la resina-PET. Además, se puede asegurar que esta diferencia es válida debido a un valor p igual a 0.006.

**Tabla 7.** Resultados de ensayos donde se lista la deformación máxima presentada por cada probeta ensayada de manera individual, comparación del promedio y varianza y presentación del valor p.

Deformación máxima [%]		
Número de Probeta	Resina Epoxi	Resina-PET
1	2.150	1.306
2	1.809	0.151
3	1.959	0.291
4	1.570	1.996
5	2.776	0.452
6	1.592	0.188
Promedio [%]	1.976	0.731
Varianza [%]	0.202	0.567
Valor P	0,00594	

En la gráfica de intervalos fig. 30, se observa como la deformación máxima resulta ser distinta para las dos probetas y que no hay sobreposición en los intervalos. Como en la elasticidad, aquí también se observa, que los intervalos casi se sobreponen entre si lo cual significa que no existe mucha diferencia, pero si se asegura que bajo un grado de confianza del 95%, los valores son distintos y que la diferencia entre ellos no es al azar.

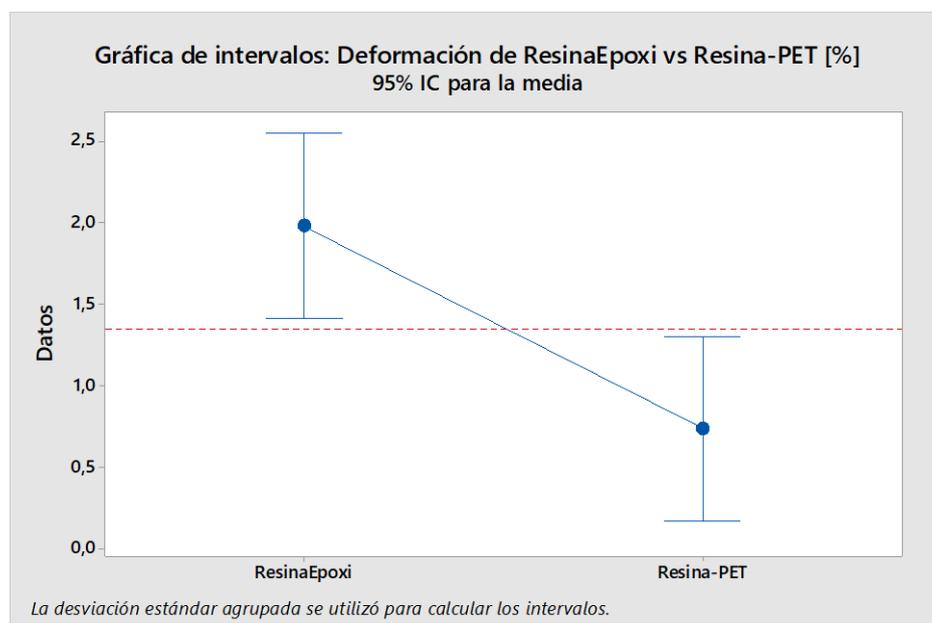


Figura 30. Gráfica de intervalos de deformación máxima de Resina Epoxi vs Resina PET. El promedio se representa con el punto y el intervalo es  $\pm$  la desviación estándar. Si los intervalos no se sobreponen significa que la diferencia entre promedios es válida con un nivel de confianza del 95%.

En la gráfica de caja también se ve una diferencia entre la deformación máxima de las dos probetas, esto se puede observar en la fig. 31. De igual forma, se observa que los datos de la resina-PET están significativamente dispersados. Esto también podría deberse a la composición única en cada probeta.

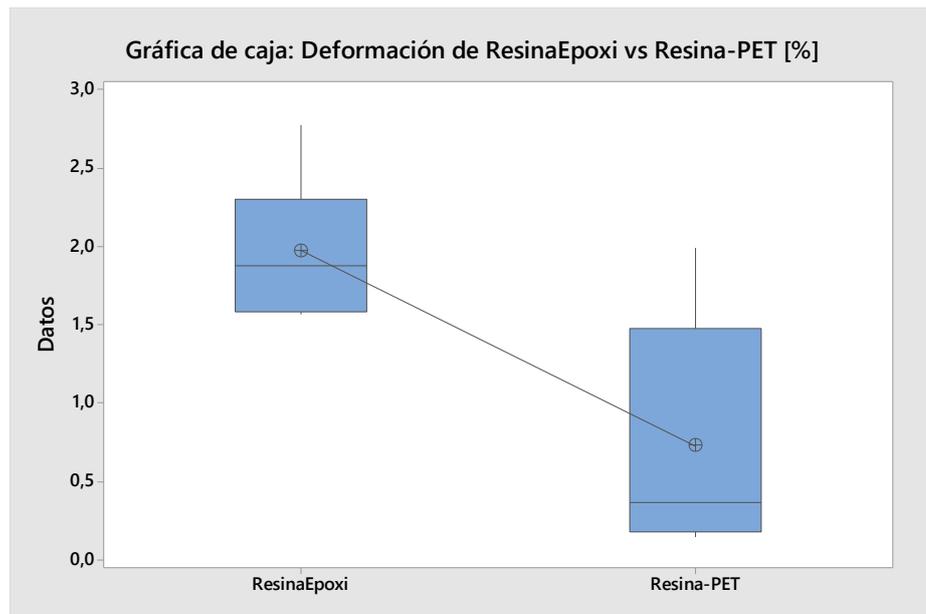


Figura 31. Gráfica de caja de deformación máxima de resina epoxi vs resina-PET. La gráfica de caja presenta los cuartiles y como están dispersados los datos.

### 3.7 Análisis de micrografía

Se realiza un análisis micrográfico con el fin de caracterizar la distribución del refuerzo y la interfaz de refuerzo-matriz mediante análisis micrográfico. Todas las imágenes mostradas a continuación son de la sección transversal de una probeta de resina-PET.

Primera observación:

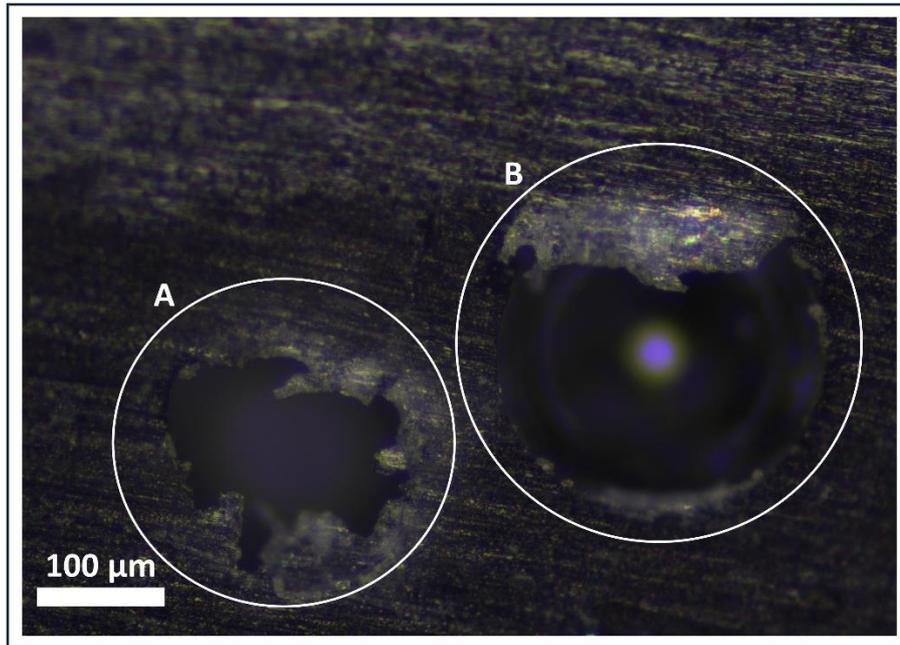


Figura 32. En A y B se observa la presencia de aire encapsulado en la micrografía de corte transversal de la probeta resina-PET lo que confirma la presencia de poros en la estructura interna del material.

En la fig 32, se puede observar la presencia de vacíos de aire con un diámetro de aproximadamente de 200 a 300 μm. Estos vacíos probablemente se deban a que, antes del curado de la mezcla, el refuerzo de PET no permite el flujo de las burbujas de aire a la superficie. Esto es una suposición debido a que no se realizó una micrografía a las probetas de resina epoxi puras y la comparación no es posible. Si se aclara que se encuentran relativamente pocos vacíos de este tipo.

La interfaz de refuerzo-matriz se puede ver detalladamente en la fig. 33:

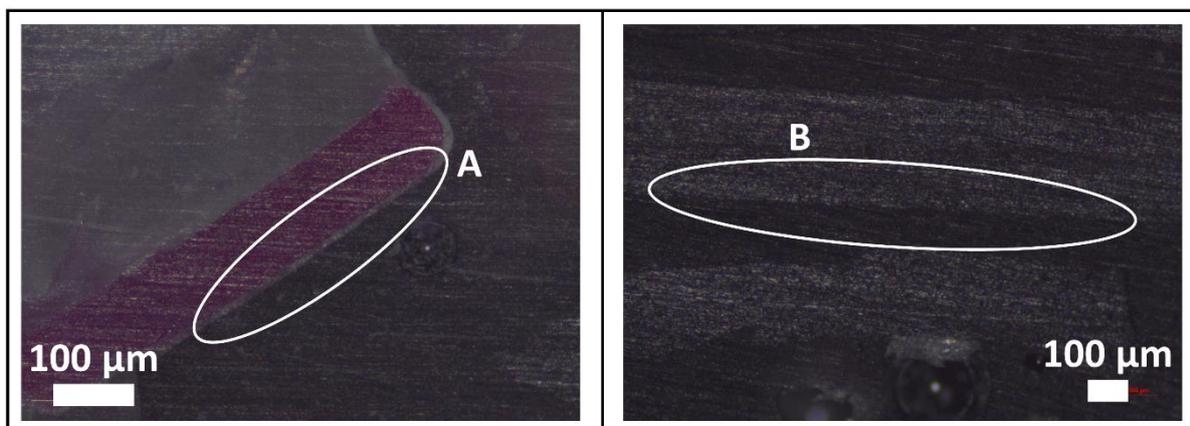
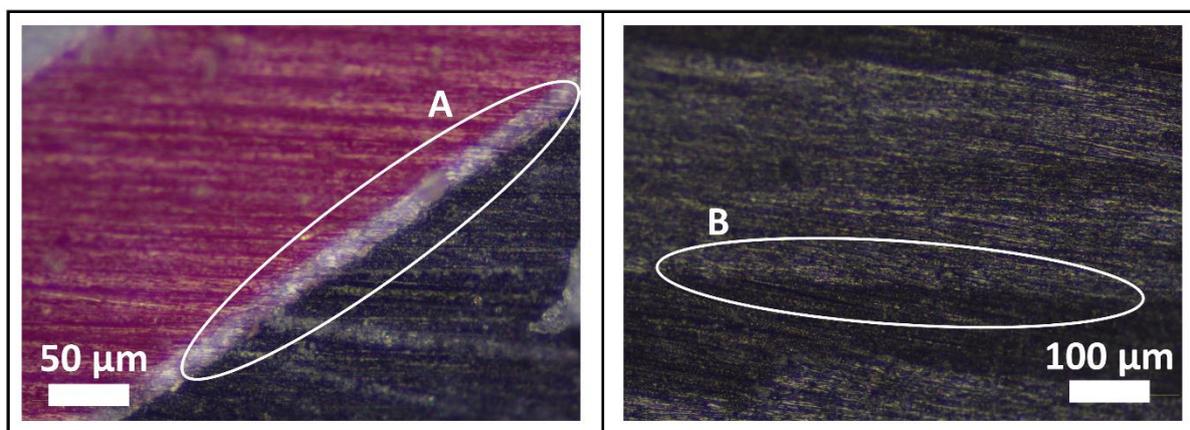


Figura 33. En A y B se observa que no existe separación en la interfaz de refuerzo-matriz en la micrografía de corte transversal de la probeta resina-PET.

En estas dos imágenes, se puede observar que no existe separación aparente en la interfaz entre el PET y la resina epoxi a excepción de la burbuja de aire en la segunda imagen. Es posible que las imperfecciones en la superficie del PET triturado faciliten la creación de burbujas en la mezcla antes del curado.

Las siguientes dos imágenes de la fig. 34, son un acercamiento a la interfaz refuerzo-matriz para un análisis más detallado:

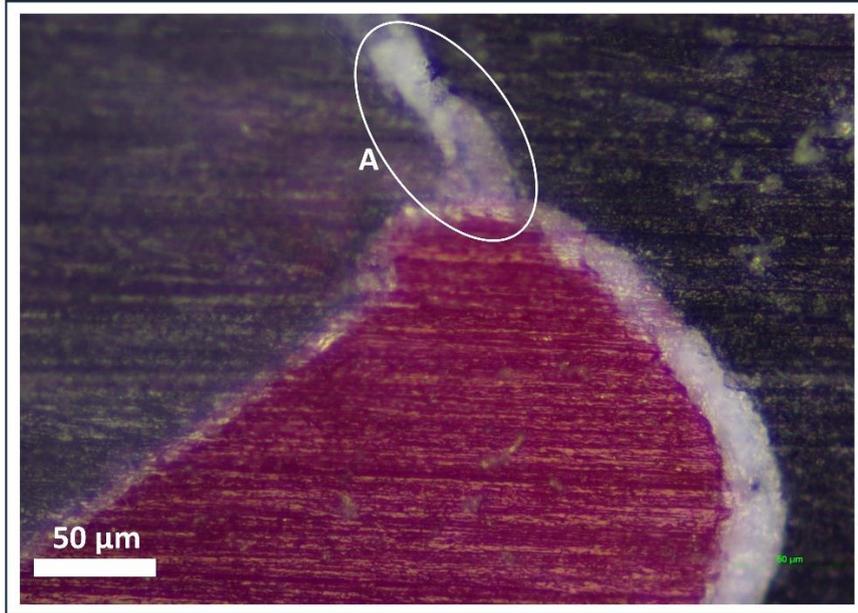


*Figura 34. En la micrografía de corte transversal de la probeta resina-PET se observa, en A, que existe una aparente capa de homogeneidad entre el PET y la resina, mientras que en B, no se observa probablemente debido al color transparente de la escama de PET.*

La imagen a la izquierda ha sido elegida debido a la presencia de una escama de PET triturado de color morado y permite ver la interfaz con mayor detalle. Aquí se observa que en la interfaz existe una capa de material de un color aparentemente blanco. Se presume que esta capa es una sección de homogeneidad entre los dos materiales. Esta homogeneidad podría deberse al calentamiento que presenta la resina epoxi al mezclarse con el endurecedor. Esta reacción no presenta temperaturas muy elevadas pero su una duración prolongada. Es posible que este calentamiento prolongado ayuda a la creación de esta capa de homogeneidad. En la imagen derecha no se puede observar esta capa de color blanco, probablemente debido a su color transparente original de la escama de PET, pero se presume que si se encuentra ahí.

El PET triturado se eligió como material de refuerzo debido que al ser triturado presenta una gran superficie en comparación con su volumen. La cual es mucho mayor a la del PET

peletizado. Además, presenta rebabas las cuales son excelentes para aumentar la superficie y proveer de una unión más intrínseca. La siguiente imagen de la fig. 35, evidencia la presencia de estas rebabas:



*Figura 35. En A se observa la presencia de una rebaba en la escama de PET que aumenta la superficie entre el refuerzo matriz en la micrografía de corte transversal de la probeta resina-PET.*

Al ser transparente, este material compuesto, en su sección transversal, exhibe no solo lo que está en la superficie, pero incluye de manera borrosa lo que se encuentra detrás. Las sombras que se encuentran en la siguiente imagen, detallada en la fig. 36, son las escamas de PET las cuales se encuentran con una inclinación con respecto a la superficie que no puede ser determinada con micrografía.

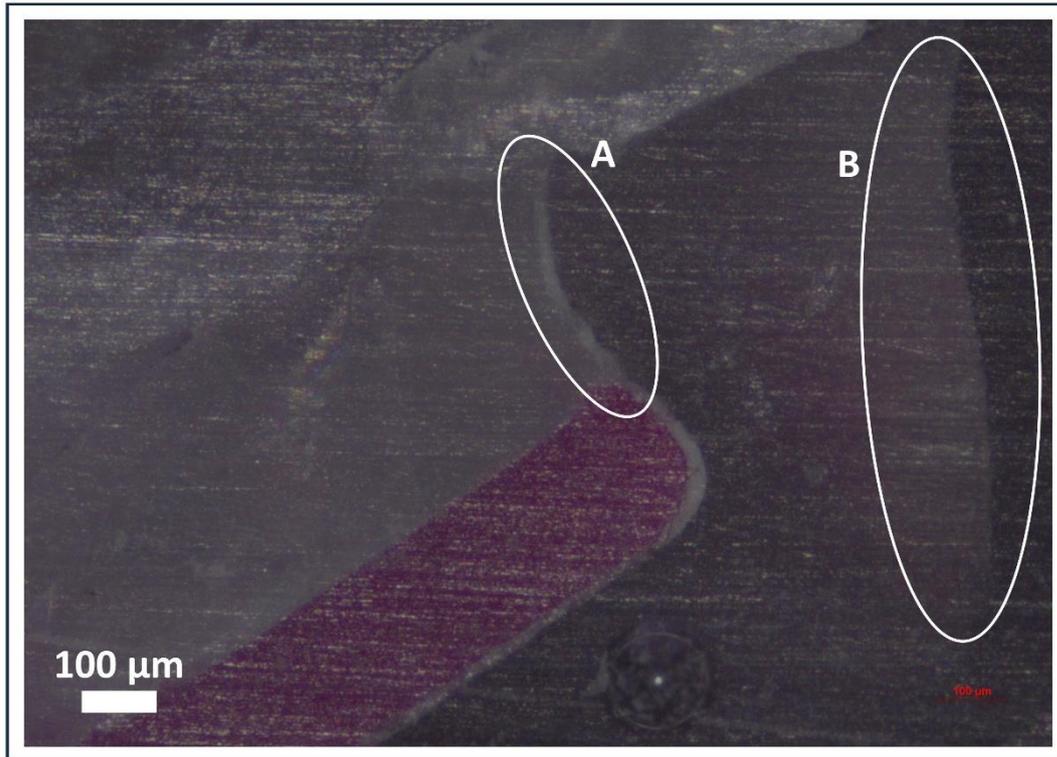


Figura 36. Se observa, en A y B, las escamas de PET debajo de la superficie del material debido a que este es transparente en la micrografía de corte transversal de la probeta resina-PET.

Finalmente se evalúa la distribución del refuerzo con una imagen de la sección transversal completa. Aquí se observa que el PET triturado se encuentra acumulado en mayor manera cerca de la parte superior de la probeta, donde se encuentra una distribución de 0.48, 0.51, 0.35 y 0.12 partículas por milímetro cuadrado en las zonas 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Esto tal vez se deba al simple hecho de que la resina epoxi inicialmente es líquida y por el efecto de la gravedad cae el fondo del molde a través del PET. La segunda observación es la orientación de las escamas de PET. Estas cuentan con un área de 5 a 36 mm<sup>2</sup> y un área promedio de 17mm<sup>2</sup> y la mayoría se encuentran de forma horizontal o ligeramente en diagonal. Este fenómeno puede deberse a su naturaleza geométrica y al hecho de que se aplicó presión al molde. Finalmente se observa cómo las burbujas de aire encapsulado se forman, en su mayoría justo debajo de las escamas de PET. Lo cual muestra que el PET triturado captura las burbujas en la mezcla de la resina y no les permite llegar a la superficie. Estas burbujas podrían actuar como concentradores de esfuerzo y disminuir la resistencia del material. La presencia de porosidad y la distribución de refuerzo no homogénea pueden ser posibles causas a la falta de homogeneidad en las propiedades mecánicas de la plancha,

de la cual se extrajeron todas las probetas de resina-PET. Todo esto se puede observar detalladamente en la fig. 37.

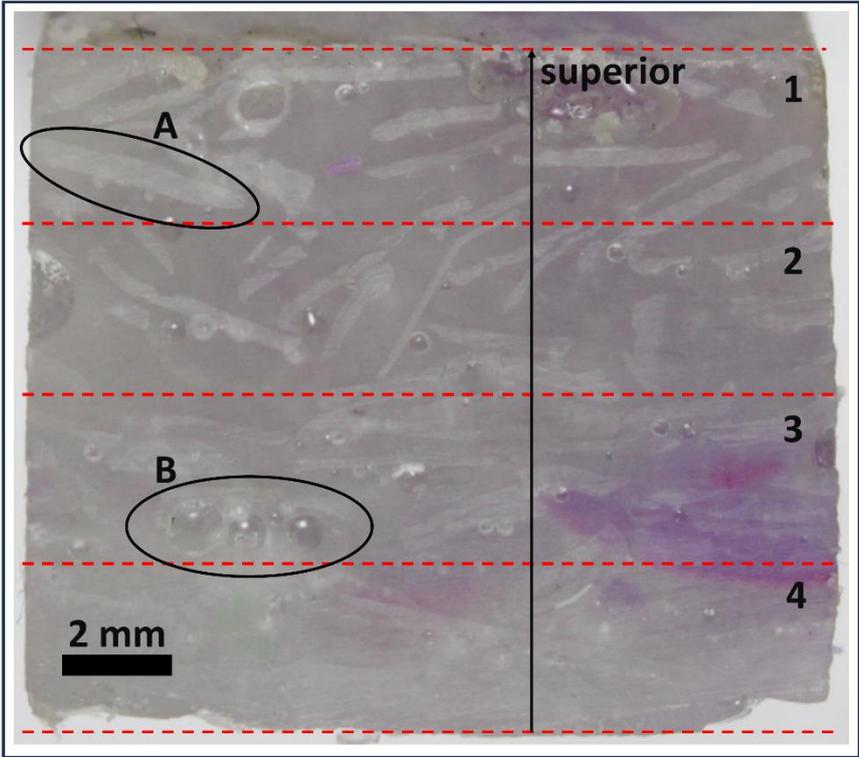


Figura 37. Se observa una concentración más alta de escamas de PET, una de las cuales se encuentra resaltada en A, por unidad de área cerca de la parte superior de la probeta, mientras que en B se observan burbujas de aire encapsulado justo debajo de una.

## CONCLUSIONES

El uso de los FRP (Fiber Reinforced Plastics) ha aumentado en la industria de la construcción, tiene mejoras en su alta resistencia corrosiva, su durabilidad y adaptabilidad [29]. Es un material ligero y mucho menos denso, presenta algunas desventajas son los altos costos y su baja tolerancia al fuego [30]. Las fibras de PEN y PET son ideales para la absorción de energía debido a su capacidad de deformación, superior al 5% [31]. El estudio más relevante de materiales compuestos con matriz polimérica de resina epóxica reforzados con escamas de PET sometió a cargas de tracción probetas reforzadas con 20% de PET triturado, las cuales demostraron un decremento del 7.6% en el esfuerzo máximo [33].

Se determinó que el método de mezclado manual a una velocidad lenta para la obtención del material compuesto resina-PET al 40% descrito en esta investigación es el método más recomendado en la literatura, no requiere de equipo costoso y se ajusta a las capacidades técnicas en la etapa de investigación en la que se encuentra. Sin embargo, este método no es viable debido a la porosidad presentada y la distribución no uniforme del refuerzo en el producto final. Las características mencionadas anteriormente contribuyen al decremento de las propiedades mecánicas estudiadas.

Se estableció mediante el análisis de resultados del ensayo de flexión que el material fabricado de resina epóxica pura presenta un esfuerzo máximo promedio de 46.3 MPa mientras que el material compuesto resina-PET presenta 5.48 MPa. Se evidencia un decremento del 88%, lo cual establece que no se encuentran mejoras en la resistencia a la flexión. En cuanto a la elasticidad la resina epóxica y resina-PET presentan una elasticidad promedio de 1912 MPa y 946 MPa, respectivamente. Lo que equivale a un decremento del 51%, indicando que el material compuesto es más elástico. Finalmente, la deformación máxima presente en la resina epóxica y resina-PET es en promedio 1.98% y 0.73%, respectivamente. Lo cual demuestra una disminución en la capacidad de deformación del material del 63%. Con los presentes cambios a las propiedades mecánicas estudiadas se puede establecer que este material compuesto resina-PET no puede ser estructural, pero si ornamental.

Los estudios de micrografía del material compuesto resina-PET reveló que la distribución del refuerzo no es homogénea, debido a una mayor concentración de PET triturado cerca de la parte superior de la probeta, como se evidencia en la figura 37, sección uno. Esto se atribuye al hecho de que la resina, durante su estado líquido antes de ser curada, se acumula en el fondo del molde. Además, la mayoría de las escamas de PET triturado muestran una orientación mayormente horizontal, lo cual se puede atribuir a la presión que se coloca en la parte superior del molde. Se puede observar que la interfaz refuerzo-matriz es homogénea, por lo que no existe separación entre el PET y la resina. Esto se evidencia en las micrografías presentadas. Además de mostrar aire encapsulado en forma de burbujas, debido a que las escamas de PET evitan que escapen del material antes del proceso de curado, lo que contribuye al decremento de la resistencia a flexión debido a que el material logrado presenta poros que actúan como concentradores de esfuerzo.

## RECOMENDACIONES

Para futuros estudios se recomienda considerar elaborar un material compuesto reforzado con fibras o laminas debido a que la literatura de este tipo de materiales es extensa, mientras que la literatura de materiales compuesto de matriz polimérica reforzados con partículas es muy escasa.

Al elegir la resina epoxica adecuada para la obtención del material se recomienda utilizar una resina específicamente diseñada para refuerzo estructural. Estas resinas se caracterizan por su muy alta razón de resina-catalizador. Si la razón es muy baja como resultado ser en la resina Dura Quarz Cast-11, el material probablemente resulte muy poco resistente y no soporte las cargas mínimas de los ensayos de propiedades mecánicas.

En los ensayos realizados se pueden ir agregando probetas con diferentes porcentajes de refuerzo. Esta recomendación se realiza con del fin de que los investigadores tengan un referente más completo de como el refuerzo actúa en el material y que se pueda determinar que porcentaje de refuerzo es el más efectivo para las propiedades mecánicas deseadas.

Se recomienda aplicar un mecanismo de conformado tal que la distribución del refuerzo sea homogénea y que garantice la expulsión del aire encapsulado con la finalidad de garantizar la homogenización de las propiedades mecánicas del material compuesto.

En el análisis micrográfico se recomienda investigar un proceso de caracterización de la interfaz matriz-refuerzo con la finalidad de definir los mecanismos de conformado del refuerzo dentro de la matriz para definir la naturaleza de la sección de homogeneidad y como las distintas formas y alineaciones de las partículas de refuerzo actúan sobre la matriz polimérica.

## Bibliografía

- [1] S. Akhtar, A. Ahmad, M. Qureshi y Shahraz, «Households willingness to pay for improved solid waste management,» *Global Journal of Environmental Science and Management*, vol. 3, n° 2, 2017 doi:10.22034/GJESM.2017.03.02.003.
- [2] E. Jaramillo, L. Muñoz, A. Ossa y M. Romo, «Comportamiento mecánico del polietileno Tereftalato (PET) y sus aplicaciones geotécnicas,» *Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, vol. 70, pp. 207-219, 2014 [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-62302014000100020](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302014000100020).
- [3] «ecodes.org,» 2013. [En línea]. Available: <https://ecodes.org/hacemos/cultura-para-la-sostenibilidad/salud-y-medioambiente/estudio-plastico-y-salud-el-coste-oculto-de-un-planeta-de-plastico>.
- [4] H. J. Araghi, I. Nikbin, S. Rahimi, E. Rahmani y H. Allahyari, «An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack,» *Constr Build Mater*, vol. 77, pp. 461-471, 2015 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814013397?via%3Dihub>.
- [5] D. Foti, «Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete,» *Compus Struct*, vol. 96, n° 10.1016/J.COMPSTRUCT.2012.09.019, pp. 396-404, 2013.
- [6] A. M. Prieto, «PT Plastics Technology,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.pt-mexico.com/articulos/problemas-decisivos-en-el-reciclado-de-pet-contaminacion>. [Último acceso: 14 junio 2023].
- [7] E. Naranjo, J. R. Moyano, Santill y C. J. Santillan, «Cienciadigital. org,» 5 marzo 2021. [En línea]. Available: [10.33262/concienciadigital.v4i1.2.1585](https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i1.2.1585). [Último acceso: junio 11].
- [8] E. Rahmani, J. Dehestani, H. Beygi, H. Allahyari y M. Nikbin, «ScienceDirect,» Enero 2009. [En línea]. Available: doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.06.041.

- [9] S. Waysal, Y. Patil y B. Dholkiva, «Use of PET resin and metakaolin in sustainable production of cement mortar,» *Mater Today Proc*, vol. 65, pp. 1298-1306, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.193.
- [10] L. Pereira y J. Castro Gomez, «Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar,» *Constr Build Mater*, vol. 25, n° 4, pp. 1712-1717, 2011  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181000574X>.
- [11] A. Besednjak, *Materiales compuestos*, Catalunya: Universidad Tecnológica de Catalunya, 2009.
- [12] H. Chalaye, «Los materiales compuestos Dinamismo e innovación,» *Le 4 Pages des statiques industrielles*, n° 158, Noviembre 2002  
<https://studylib.es/doc/5239524/los-materiales-compuestos-dinamismo-e-innovaci%C3%B3n>.
- [13] J. M. Martinez, «Repositorio de la Universidad Tecnológica de Pereira.,» Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/8fa95ded-32b0-476a-bced-cb698ce80c8a/content>. [Último acceso: 28 mayo 2023].
- [14] A. Markopoulos, I. S. Pressas, I. Papantonio, N. Karkalos y J. Davim, «Machining and Machining Modeling o Metal matrxx composites,» n° 10.1007/978-3-319-20152-8\_4, pp. 99-141, 2015.
- [15] R. Adamian, H. Vasconcellos y J. Weisz, *Novos Materiais:tecnología e aspectos economicos*, Rio de Janeiro, 2009.
- [16] a. Markopoulos, I. S. Pressas y N. Karkalos, «Springer link,» 2015. [En línea]. Available: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-20152-8\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-20152-8_4). [Último acceso: Mayo 2023].
- [17] J. F. V. Jiménez, 2016. [En línea]. Available: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56635877/Trabajo\\_Materiales\\_compuestos\\_de\\_matriz\\_ceramica\\_\\_Jose\\_Fernando\\_Valera\\_Jimenez-libre.pdf?1527065984=&response-content-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56635877/Trabajo_Materiales_compuestos_de_matriz_ceramica__Jose_Fernando_Valera_Jimenez-libre.pdf?1527065984=&response-content-)

- disposition=inline%3B+filename%3D2016\_Materiales\_compuestos\_de\_matriz\_cer.pdf&Expires=16869. [Último acceso: 1 junio 2023].
- [18] D. Hull, *Materiales compuestos*, Barcelona : Reverte, 1987.
- [19] F. Bartolome, «Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI,» [En línea]. Available:  
[https://www.academia.edu/19650992/Nuevos\\_materiales\\_en\\_la\\_sociedad\\_del\\_siglo\\_XXI](https://www.academia.edu/19650992/Nuevos_materiales_en_la_sociedad_del_siglo_XXI) . [Último acceso: 15 Mayo 2023].
- [20] Aristegui, «Aristegui.info,» 2020. [En línea]. Available:  
<https://www.aristegui.info/que-son-los-termoplasticos/>. [Último acceso: junio 2023].
- [21] «construinnova.net,» 22 Abril 2014. [En línea]. Available:  
<https://construinnova.net/2014/04/22/materiales-compuestos-o-composites-i/>. [Último acceso: 2023].
- [22] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Boston, London, Oxford, New York, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo: Elsevier butterwoeth Heinemann, Thir editition 2005.
- [23] A. Luque, J. Aldazabal, J. Martinez y J. Gil Sevillano, «Estudio de la resistencia a traccion de whiskers preagrietados mediante técnicas de dinámica molecular,» *Anales de mecánica*, vol. 22, nº <https://gef.es/images/publicaciones/22/12.pdf>, 2005.
- [24] R. M. Sanchez, «mwm.cimav.edu.mx,» 2021. [En línea]. Available:  
<http://mwm.cimav.edu.mx/wp-content/uploads/2021/01/PresentacionCompositos.pdf>. [Último acceso: junio 15].
- [25] V. H. Guerrero, J. Davila, S. Galeas, P. Ponton, N. Rosas, V. Sotomayor y C. Valdivieso, *Nuevos materiales Aplicaciones estructurales e industriales*, Quito: Imprefepp, 2011 <https://zilo.pub/nuevos-materiales-aplicaciones-estructurales-e-industriales-5y3n2ojyy3k0.html>.
- [26] D. Askeland, P. P. Fulay y W. J. Wrigth, *Ciencia e ingenieria de los materiales*, Australia, Brasil, Corea, España, Estados Unidos, Japón, Mexico, Reino Unido, Singapur: Cengage Learning, 2011

<https://osvaldoweb.files.wordpress.com/2016/04/ciencia-e-ingenieria-de-materiales-sexta-edicic3b3n.pdf>.

- [27] N. L. Alomaliza y ChavezJessica elizabeth, «<http://dspace.esPOCH.edu.ec/>,» 2012. [En línea]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2445/1/85T00223.pdf>. [Último acceso: 14 junio 2023].
- [28] L. G. Rodrigues, V. Amigo Borrás, M. Salvador Moya, D. Busquets Mataix y N. Martínez Mateos, «Características mecánicas y microestructurales de materiales compuestos de matriz reforzados con partículas cerámicas de B4C, desarrollados por vía pulvimetalúrgica,» *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 23, nº 1, 2003.
- [29] M. Naser, R. Hawileh y J. Abdalla, «Fiber-reinforced polymer compsites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review,» *ScienceDirect*, vol. 198, 2019 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109542>.
- [30] M. Nitoiu, «Empleo de FRP en estructuras,» *Digital.CSIC.es*, 2018 <http://hdl.handle.net/10261/215093>.
- [31] J. Dai, Y. Bai y J. Teng, «Behavior and Modeling of Concrete Confined with FRP Composites of Large Deformability,» *Journal of Composites for Construction*, vol. 15, nº 6, pp. 963-973, 2011 doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000230..
- [32] B. P. Guagrilla M, «Trabajo de titulación: Caracterización de un material de resina epoxi, reforzada con el 20% de Pet triturado a cargas de tracción,» Quito, 2023.
- [33] T. Richardson y E. Lokensgard, «Dialnet Industria del plástico:plastico industrial,» 1999. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=148179>. [Último acceso: 28 junio 2023].
- [34] «Tecnología de los Plásticos,» 30 mayo 2011. [En línea]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html> . [Último acceso: junio 15 2023].

- [35] D. Ratna y A. Banthia, «Epoxidized soybean oil toughened epoxy adhesive,» *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 14, n° 1, pp. 15-25, 2012 doi: 10.1163/156856100742087.
- [36] D. Ratna, «Mechanical characterization and morphology of carboxyl randomized poly(2-ethyl hexyl acrylate) liquid rubber toughened epoxy resins,» *ScienceDirect*, vol. 42, n° 18, pp. 7739-7747, 2001 doi: 10.1016/S0032-3861(01)00278-6.
- [37] E. M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*, New York, San Francisco, Toronto : Mc Graw Hill , 2007 <https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/a9dac63c933c1468/caa529ae147ed77a23c9f74255c85d4dfe3dc901e1135fe416d8819f13ab9528/book-summary.pdf>.
- [38] F. Técnica, «Wesco,» [En línea]. Available: <https://static1.squarespace.com/static/605230986f1c9c1648f1bc0a/t/608a10a4db7e9037b0d1edf1/1619660964661/Ficha+T%C3%A9cnica+WESCO+Dura+Quartz+V.2.pdf>. [Último acceso: 2 junio 2023].
- [39] «Scribd,» 3 Abril 2017. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/343832072/Quintum-Resina-Q2>. [Último acceso: Junio 2023].

## ANEXOS

Anexo1. Tabla de Microsoft Excel presentando los datos de esfuerzo y deformación.

Deformacion	Esfuerzo	Probetas	# de Probeta	Deformacion en magnitud
0,013100127	3,973215	Resina-PET 1	1	0,000131
0,048786679	4,351616	Resina-PET 1	1	0,000488
0,084676513	4,446216	Resina-PET 1	1	0,000847
0,121018069	4,446216	Resina-PET 1	1	0,00121
0,156953079	4,635417	Resina-PET 1	1	0,00157
0,193091362	4,824618	Resina-PET 1	1	0,001931
0,229410334	5,013819	Resina-PET 1	1	0,002294
0,265503415	5,013819	Resina-PET 1	1	0,002655
0,301415861	5,108419	Resina-PET 1	1	0,003014
0,337757391	5,108419	Resina-PET 1	1	0,003378
0,373918264	5,203019	Resina-PET 1	1	0,003739
0,410033957	5,108419	Resina-PET 1	1	0,0041
0,44617224	4,919218	Resina-PET 1	1	0,004462
0,482355703	5,013819	Resina-PET 1	1	0,004824
0,518426215	4,919218	Resina-PET 1	1	0,005184
0,554587089	4,635417	Resina-PET 1	1	0,005546
0,590657623	4,351616	Resina-PET 1	1	0,005907
0,626908835	4,446216	Resina-PET 1	1	0,006269
0,662911598	4,351616	Resina-PET 1	1	0,006629
0,699049881	4,351616	Resina-PET 1	1	0,00699
0,735165574	4,351616	Resina-PET 1	1	0,007352
0,771326426	4,257015	Resina-PET 1	1	0,007713
0,807487299	4,446216	Resina-PET 1	1	0,008075
0,843625582	4,351616	Resina-PET 1	1	0,008436
0,879763887	4,257015	Resina-PET 1	1	0,008798
0,915902148	4,257015	Resina-PET 1	1	0,009159
0,952040431	4,257015	Resina-PET 1	1	0,00952
0,988223895	4,162415	Resina-PET 1	1	0,009882
1,024294407	4,162415	Resina-PET 1	1	0,010243
1,053182439	4,067815	Resina-PET 1	1	0,010532
1,08927552	4,162415	Resina-PET 1	1	0,010893
1,125391277	4,067815	Resina-PET 1	1	0,011254
1,161439178	3,973215	Resina-PET 1	1	0,011614
1,197600094	3,973215	Resina-PET 1	1	0,011976
1,233715787	4,067815	Resina-PET 1	1	0,012337
1,26998959	3,973215	Resina-PET 1	1	0,0127
1,306082649	3,689413	Resina-PET 1	1	0,013061

