DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA MEDIANTE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN Y FLEXIÓN PARA UN MATERIAL COMPUESTO POR MATRIZ DE RESINA EPOXI Y REFUERZO DE PVC BLANDO PARTICULADO EN DIFERENTES CONCENTRACIONES (20%, 40% Y 60% DE PVC)

Autores
Cristian David Osorno Gonzalez
Jhoan Stevan Gomez Urazan



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Universidad Distrital Francisco José De Caldas
Tecnología en Mecánica Industrial
Bogotá, Colombia
2025

DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA MEDIANTE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN Y FLEXIÓN PARA UN MATERIAL COMPUESTO POR MATRIZ DE RESINA EPOXI Y REFUERZO DE PVC BLANDO PARTICULADO EN DIFERENTES CONCENTRACIONES (20%, 40% Y 60% DE PVC)

Autores
Cristian David Osorno Gonzalez
Jhoan Stevan Gomez Urazan

Monografía

Docente Director
Nicolas Gabriel Muñoz Bello

Universidad Distrital Francisco José De Caldas
Tecnología en Mecánica Industrial
Bogotá, Colombia
2025

Agradecimientos

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a nuestras familias, por su acompañamiento incondicional, motivación constante y apoyo en cada etapa de nuestra formación. Su presencia ha sido fundamental para culminar con éxito este proyecto y nuestra trayectoria como estudiantes de Tecnología en Mecánica Industrial.

De igual manera, extendemos un sincero agradecimiento al docente Nicolás Gabriel Muñoz Bello, por su valiosa orientación, compromiso y dedicación durante el desarrollo de este trabajo. Su acompañamiento fue clave para avanzar con claridad en cada fase del proceso.

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo de grado a nuestros padres, quienes han sido guía a lo largo de este camino.

Gracias por estar siempre ahí, con paciencia infinita, con palabras de aliento cuando más las necesitábamos y con esos consejos que, con el tiempo, entendimos lo valiosos que eran. Gracias por enseñarnos, con su ejemplo, lo que significan el esfuerzo, la disciplina y la perseverancia.

Este logro no es solo nuestro, también es de ustedes. Cada paso que dimos estuvo acompañado de su apoyo y su presencia constante, incluso en los momentos más duros.

A ustedes, que nos enseñaron a soñar y también a luchar por esos sueños.

CONTENIDO

1 RESUMEN 12

2 PROBLEMÁTICA 13

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. 13

2.2 OBJETIVOS 15

2.2.1 Objetivo General. 15

2.2.2 Objetivos específicos. 15

2.3 JUSTIFICACIÓN 15

3 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES 16

3.1 MARCO CONCEPTUAL 16

3.1.1 ¿Qué Es Un Material Compuesto? 16

3.1.2 Historia De Los Materiales Compuestos 16

3.1.3 Primeras aplicaciones de los materiales compuestos: 17

3.1.4 Evolución Durante El Siglo XX: 17

3.1.5 Clasificación De Los Materiales Compuestos 18

3.1.6 Materiales compuestos por matriz metálica: 18

3.1.7 Materiales compuestos por matriz cerámica: 19

3.1.8 Materiales compuestos por matriz polimérica: 19

3.1.9 Matrices. Generalidades: 19

3.1.10 Material de Refuerzo: 20

3.1.11 Interfase matriz/Refuerzo: 20

3.1.12 Unión en la Interfase: 21

3.2 MATERIAS PRIMAS 21

3.2.1 Monómeros: 21

3.2.2 Polímeros 22

3.2.3 Plásticos 22

3.2.4 Tipos de plásticos: 22

3.2.5 Termoplásticos: 22

3.2.6 Termoestables: 22
3.2.7 Elásticos: 23
3.2.8 PVC (Cloruro de polivinilo): 23
3.2.9 Cloruro de polivinilo (PVC) duro: 23
3.2.10 Cloruro de polivinilo (PVC) blando: 24
3.2.11 Pasta de PVC: 24
3.2.12 Resina epoxi 24
3.2.13 Matriz epoxi (termoestable) tipos de matriz epoxi 25
3.3 MARCO NORMATIVO: 26
3.3.1 Ensayo de tensión en polímeros: 26
3.3.2 Norma ISO 527-1 27
3.3.3 Norma ISO 527-2: 29
3.3.4 Ensayo de flexión en Polímeros 31
3.3.5 Norma ISO 178 32
3.4 ANTECEDENTES 35
3.4.1 Estado Del Arte 35
4 DESARROLLO DEL PROYECTO 42
4.1 PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS PARA LA ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE RESINA EPOXI CON LA CONCENTRACIÓN DE PVC BLANDO EN (20%, 40% Y 60%) 45
4.1.1 Obtención de materiales: 45
4.1.2 Resina Epoxi 45
4.1.3 Diseño de moldes: 46
4.1.4 PVC blando particulado 50
4.1.5 Elaboración de probetas para ensayos a tracción: 51
4.1.6 Elaboración de probetas para ensayos a flexión de acuerdo con la norma ISO 178: 59
4.1.7 Realización de ensayos a tracción – ISO 527-2 65
4.1.8 Realización ensayos a flexión – ISO 178 78

4.2 Evolución de los resultados de las propiedades mecánicas del material compuesto en búsqueda de la aplicación del mismo. 90

5 CONCLUSIONES 93

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 94

7 ANEXOS 98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones probeta tipo 1A y 1B (Normativa ISO 527).....30
Tabla 2. Formas de probetas y dimensiones para el ensayo de flexión en 3 puntos según la norma ISO 178 34
Tabla 3. Estado del arte 35
Tabla 4. Proporciones volumétricas para probetas de tracción.....55
Tabla 5. Proporciones volumétricas para probetas de flexión.....61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Refuerzos continuos. Representación de refuerzos particulados, por fibras y tipo sándwich....18
Figura 2. Probeta y mordazas....27
Figura 3. Probeta tipo 1A y 1B (Normativa ISO 527)....30
Figura 4. Posición de la muestra de prueba y el difractómetro al inicio de la prueba....32
Figura 5. Dimensiones para el ensayo de flexión en 3 puntos según la norma ISO 178....34
Figura 6. Diagrama de flujo propuesto para el proyecto....44
Figura 7. Resina epoxi JTDO....46
Figura 8. Moldes metálicos para probetas de tracción....47
Figura 9. Tapete de silicona....47
Figura 10. Moldes de silicona para probetas a tracción....48
Figura 11. Moldes de silicona para probetas de flexión....49
Figura 12. Agente desmoldante....49
Figura 13. PVC blando en presentación de pellets....50
Figura 14. Molienda de pellets PVC blando....51
Figura 15. Verificación dimensiones de los moldes para probetas a tracción....52
Figura 16. Elaboración de la mezcla resina/catalizador....53
Figura 17. Medición de porcentajes volumétricos de material, Resina/PVC particulado, para elaboración de probetas a tracción....54
Figura 18. Proceso de moldeo de las probetas....55
Figura 19. Desmolde probetas a tracción (100%Resina / 0%PVC)....56
Figura 20. Desmolde probetas a tracción (80%Resina / 20%PVC)....57
Figura 21. Desmolde probetas a tracción (60%Resina / 40%PVC)....58
Figura 22. Desmolde probetas a tracción (40%Resina / 60%PVC)....58
Figura 23. Verificación dimensiones de los moldes para probetas a flexión....60
Figura 24. Medición de porcentajes volumétricos de material, Resina/PVC particulado, para elaboración de probetas a flexión....61
Figura 25. Proceso de moldeo de las probetas....62
Figura 26. Desmolde probetas a flexión acorde a las dimensiones de la norma ISO 178....63
Figura 27. Desmolde probetas a flexión con dimensiones escaladas (100%Resina / 0%PVC)....64
Figura 28. Desmolde probetas a flexión con dimensiones escaladas (80%Resina / 20%PVC)....64

Figura 29. Desmolde probetas a flexión con dimensiones escaladas (40%Resina / 60%PVC). 65
Figura 30. Maquina universal de ensayos Shimadzu UH – 50A. 66
Figura 31. Formulas utilizadas para el análisis de los ensayos a tracción. 67
Figura 32. Probetas Falladas en prueba de tracción, muestra (100%Resina / 0%PVC) 68
Figura 33. Resultados prueba de tracción, muestra (100%Resina / 0%PVC) 68
Figura 34. Resultado promedio pruebas de tracción, muestra (100%Resina / 0%PVC) 69
Figura 35. Probetas falladas en prueba de tracción, muestra (80%Resina / 20%PVC). 70
Figura 36. Resultados prueba de tracción, muestra (80%Resina / 20%PVC). 71
Figura 37. Resultado promedio pruebas de tracción, muestra (80%Resina / 20%PVC). 71
Figura 38. Probetas Falladas en prueba de tracción, muestra (60%Resina / 40%PVC). 73
Figura 39. Resultados prueba de tracción muestra (60%Resina / 40%PVC). 73
Figura 40. Resultado promedio pruebas de tracción, muestra (60%Resina / 40%PVC). 74
Figura 41. Probetas Falladas en prueba de tracción, muestra (40%Resina / 60%PVC). 75
Figura 42. Resultados prueba de tracción, muestra (40%Resina / 60%PVC). 76
Figura 43. Resultado promedio pruebas de tracción muestra (40%Resina / 60%PVC). 76
Figura 44. Resultado promedio esfuerzo-deformación pruebas de tracción. 77
Figura 45. Formulas utilizadas para el análisis de los ensayos a flexión. 79
Figura 46. Probetas Falladas en prueba de flexión, muestra (100%Resina / 0%PVC). 80
Figura 47. Resultados prueba deflexión, muestra (100%Resina / 0%PVC) 81
Figura 48. Resultado promedio pruebas de flexión, muestra (100%Resina / 0%PVC) 81
Figura 49. Probetas Falladas en prueba de flexión, muestra (80%Resina / 20%PVC). 83
Figura 50. Resultados prueba deflexión, muestra (80%Resina / 20%PVC). 83
Figura 51. Resultado promedio pruebas de flexión, muestra (80%Resina / 20%PVC). 84
Figura 52. Probetas Falladas en prueba de flexión, muestra (60%Resina / 40%PVC). 85
Figura 53. Resultados prueba deflexión, muestra (60%Resina / 40%PVC). 85

Figura 54. Resultado promedio pruebas de flexión, muestra (60%Resina / 40%PVC). 86
Figura 55. Probetas Falladas en prueba de flexión, muestra (40%Resina / 60%PVC). 87
Figura 56. Resultados prueba deflexión, muestra (40%Resina / 60%PVC). 87
Figura 57. Resultado promedio pruebas de flexión, muestra (40%Resina / 60%PVC). 88
Figura 58. Resultado promedio esfuerzo-deformación pruebas de flexión. 89

1 RESUMEN

El campo de la ingeniería de materiales se encuentra en constante evolución, buscando nuevas alternativas para superar las limitaciones y desafíos que plantean los materiales convencionales como los metales. Estos, a pesar de poseer excelentes propiedades mecánicas, presentan inconvenientes significativos, incluyendo un alto costo de procesamiento y gastos energéticos, pues de acuerdo con la revista *La República* (2022), el Banco de América (DofA) advierte que, metales como el cobre, níquel, litio, platino, cobalto y la plata son considerados escasos y además esto representa un desafío para la transición a energías limpias.

Para atender a estas demandas, este estudio propone el desarrollo de un material compuesto, utilizando como base la resina epoxi y el PVC particulado como refuerzo, con el objetivo de analizar posibles mejoras en las propiedades mecánicas de la matriz. Estos polímeros, que se seleccionaron por su disponibilidad, facilidad de manufactura y su precio; se mezclaron en diferentes concentraciones (20%, 40% y 60% de PVC).

La elaboración de las probetas para los ensayos mecánicos se llevó a cabo conforme a las normas ISO, garantizando una alta reproducibilidad y confiabilidad en los resultados. Las pruebas se centraron en dos propiedades mecánicas fundamentales: la tracción según la norma ISO 527-1 e ISO 527-2 y la flexión según la norma ISO 178. La tracción es una medida de cómo un material puede resistir la fuerza axial, y la flexión es una medida de la capacidad de un material para resistir la deformación bajo una carga de flexión.

El objetivo de este estudio es evaluar la influencia de la concentración de PVC en las propiedades mecánicas del compuesto de matriz epoxi. Los resultados obtenidos pueden abrir un nuevo camino hacia la creación de materiales más rentables y sostenibles, con un rendimiento mecánico comparable o incluso superior al de los materiales convencionales.

2 PROBLEMÁTICA

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Debido al alto gasto energético para la extracción y el moldeo de los materiales metálicos, dentro del sector industrial de la fundición, se encuentran bastos consumos de energía térmica y eléctrica que producen altos índices de pérdidas energéticas e ineficiencia en los procesos de producción (García P., Perez E., 2013). Se calcula que la fundición de metales utiliza cerca del 4% de la energía mundial y produce sobre el 7% de las emisiones globales de GEI (Revista Alsimet, 2017). Se busca analizar la generación de nuevas alternativas que puedan satisfacer la de demanda de materiales con dichas características (alta resistencia mecánica), evitando el gasto excesivo de energía. Se opta por la búsqueda de un material que sea fácil en su manufactura y tenga propiedades mecánicas óptimas para su implementación y sustitución de otros materiales (metal). De esta manera se propone la creación de un material compuesto por polímeros: una matriz de resina epoxi y refuerzo de material PVC blando particulado, teniendo la resina una alta dureza e implementándole el refuerzo para mejorar su tenacidad.

Adicionalmente el mal aprovechamiento y tratamiento final de plásticos como el PVC puede ser dañino para el medio ambiente, pues según el periódico *El Tiempo* (1996), la activista de la organización Greenpeace Lina Finaldi advierte que este material no es biodegradable. Un problema importante en el reciclaje de PVC es el alto contenido de cloro en el PVC crudo (alrededor del 56 por ciento del peso del polímero) y los altos niveles de aditivos peligrosos que se agregan al polímero para lograr la calidad deseada del material (Michelle Rose Rubio, 2022). Además, su exposición a altas temperaturas propicia el desprendimiento de vapores de cloruro de vinilo tóxicos para la salud en altas concentraciones. Por eso en este proyecto se busca usar adecuadamente los desechos de PVC, alternativa al uso del material descartado y contribuyendo al medio ambiente mediante su reciclaje.

Si bien advierte Raúl Torres (funcionario de Pavco empresa fabricante de tubos PVC), el aspecto nocivo del PVC se da cuando este se expone a variaciones de temperatura en el medio ambiente, lo que produce vapores de cloruro de vinilo, pero si el material es debidamente manejado y reutilizado este factor se minimiza, *El Tiempo* (1996).

Considerando lo anterior, este proyecto no busca incentivar la fabricación y continuidad del Policloruro de Vinilo, sino que representa la oportunidad de reaprovechar tal material y destinarlo a aplicaciones que aseguren un buen uso y prevengan las emisiones toxicas resultantes de una mala disposición final.

Tras los resultados del análisis de las propiedades mecánicas a tracción y flexión del material compuesto, se contemplarán sus posibles aplicaciones, llegando a ser

un revestimiento anticorrosivo, aislante eléctrico y si sus valores de resistencia mecánica lo permiten, implementarlo en perfiles estructurales.

¿Puede el material compuesto de resina epoxi y PVC blando representar una solución tecnológica viable para la fabricación de materiales estructurales, al reutilizar el PVC y explorar sus posibles aplicaciones?

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo General.

Evaluar las propiedades mecánicas de tracción y flexión del material compuesto de resina epoxi con diferentes concentraciones de partículas de PVC blando como refuerzo.

2.2.2 Objetivos específicos.

120 Preparar las materias primas para la elaboración del material compuesto de resina epoxi con la concentración de PVC blando en (20%, 40% y 60%).
121 Fabricar probetas y ejecutar ensayos de tensión y flexión de acuerdo con la norma ISO 527-1 e ISO 527-2, ISO 178 respectivamente.
122 Analizar los resultados obtenidos bajo los ensayos mecánicos, determinando las principales características mecánicas a tensión y flexión del material compuesto.
123 Evaluar los resultados de las propiedades mecánicas del material compuesto en búsqueda de la aplicación del mismo.

2.3 JUSTIFICACIÓN

En acuerdo con Ayala, Cartagena, Villarpando y Pantoja (2020), las matrices compuestas a base de resina epoxica están tomando relevancia debido a las propiedades mecánicas, térmicas y de recubrimiento que ofrecen gracias a la estructura química de la resina. Estas características pueden ofrecer una alternativa a la implementación de los preciados materiales metálicos.

Adicionalmente se pretende dar un aporte al ámbito del desarrollo de materiales con el cual, según los resultados del análisis de propiedades mecánicas de este material compuesto, se quiere dar solución a requerimientos donde este compuesto pueda ser aplicado, pudiendo garantizar un buen aislamiento eléctrico, una buena resistencia a la corrosión y una resistencia mecánica considerable. No obstante, la falta de estudio de matrices termoestables con refuerzos termoplásticos particulados no ha permitido una caracterización general de como este tipo de refuerzos afecta las propiedades mecánicas de la matriz desconociendo así las posibles aplicaciones específicas para este material compuesto.

Por tal motivo se plantea el estudio de las propiedades mecánicas para un material compuesto de matriz de resina epoxidica con refuerzos particulados de PVC blando,

este último es elegido debido a su amplia aplicación en textiles, tuberías y recubrimientos.

3 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

3.1 MARCO CONCEPTUAL

3.1.1 ¿Qué Es Un Material Compuesto?

Los materiales compuestos son la combinación de dos o más materiales diferentes entre sí para formar un nuevo material que sea mejor en sus propiedades mecánicas, térmicas o químicas, a comparación de sus componentes por separado. Estos se componen de una matriz y un refuerzo, que en la mayoría de los casos son materiales sintéticos, aunque también existen materiales compuestos naturales, como por ejemplo la madera, los huesos, el bambú, entre otros.

Estos materiales se dividen en dos tipos: isotrópicos y anisotrópicos o amorfos; los materiales isotrópicos son los que sus propiedades tanto térmicas como mecánicas se comportan de igual manera en todas las direcciones de la estructura microscópica del elemento. Los materiales amorfos son en cambio los que varía su comportamiento mecánico a lo largo de su microestructura.

3.1.2 Historia De Los Materiales Compuestos

Aunque en la actualidad el uso de materiales compuestos nos resulte poco común, estos materiales están cada vez más presentes en todo tipo de industrias y aplicaciones sin que nos demos cuenta. Y es que los composites llevan existiendo desde hace más de 3000 años, cuando en Egipto y Mesopotamia usaban una mezcla de barro y paja para crear ladrillos de adobe resistentes y duraderos.

Pero ¿cómo ha sido la evolución de estos materiales hasta nuestros días?
En primer lugar, es necesario recordar qué se entiende como material compuesto, Se conoce como material compuesto a la unión heterogénea de dos o más materiales con el fin de crear un material uniforme con una suma sinérgica de propiedades. Para entender esto podemos utilizar el ejemplo anterior de los ladrillos de adobe: por un lado, un ladrillo de barro es una pieza quebradiza y frágil, como cualquier jarrón de arcilla. Por otra parte, unas hebras de paja no son capaces de aguantar el peso de un edificio. Sin embargo, cuando estos dos materiales son mezclados de manera uniforme dan como resultado un ladrillo mucho más resistente y tenaz.

3.1.3 Primeras aplicaciones de los materiales compuestos:

Por lo que vemos, la asociación de determinados materiales con propiedades a primera vista antagónicas puede llegar a crear otros productos con características mejoradas. A esta misma reflexión llegaron los mongoles al inventar alrededor del 1200 dC los primeros arcos de material compuesto.

Estas herramientas estaban fabricadas mediante una combinación de bambú para aportar las características de flexibilidad con resina de pino para rigidizar el producto. Estos pequeños, ligeros y potentes arcos fueron el arma más temida hasta la introducción de las armas de fuego en el siglo XIV.

Habría que esperar hasta finales del siglo XIX para que los avances en la industria química permitiesen transformar resinas de estado líquido a estado sólido mediante reticulación de la estructura molecular con el proceso conocido como polimerización. Este hito científico permitió que los materiales compuestos llegasen a ser lo que conocemos hoy en día. Ya que, hasta ese momento, las únicas fuentes de pegamentos y aglutinantes eran resinas naturales derivadas de plantas y animales.

Materiales como el vinilo, poliestireno, fenoles y poliéster fueron creadas y pronto superaron a las resinas derivadas única y directamente de la naturaleza.

3.1.4 Evolución Durante El Siglo XX:

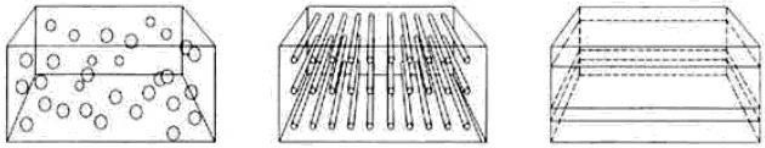
En 1907, el estadounidense de origen belga Leo Baekeland creó la primera sustancia plástica totalmente sintética, la baquelita. Este polímero termoestable con capacidades aislantes y resistentes al calor hicieron al compuesto ampliamente utilizado tanto en aplicaciones industriales como de consumo. Sin embargo, los plásticos como tal no son capaces de aportar la suficiente resistencia para cualquier aplicación estructural. Por lo que los refuerzos fueron necesarios para proveer de la resistencia y rigidez adicional necesaria.

En 1935, Owens Corning introdujo la primera fibra de vidrio. La fibra de vidrio cuando fue combinada con un polímero plástico creó una estructura increíblemente fuerte a la vez que ligera. De esta forma surgió la industria de los Polímeros Reforzados con Fibra (FRP), extendida y modernizada hasta nuestros días. En estas fechas se patentaron también resinas de poliéster insaturados (utilizados de forma dominante hoy en día debido a sus propiedades de curado), así como otros sistemas de resinas de mayor rendimiento como los epoxis años más tarde (Historia Y Evolución de Los Materiales Compuestos, 2021).

3.1.5 Clasificación De Los Materiales Compuestos

Los materiales compuestos se pueden clasificar de diferentes maneras; principalmente por su tipo de matriz la cual puede ser matriz metálica, matriz cerámica y matriz polimérica o según su tipo de refuerzo; el cual puede ser por partículas o por fibras, materiales compuestos estructurales o tipo sándwich son aquellos que son conformados por láminas de material homogéneas, de esta manera las propiedades dependen de los constituyentes y de la geometría de diseño establecida. En esta investigación se abarca según su tipo de matriz haciendo énfasis en el tipo de matriz y en los materiales compuestos por fibras.

Figura 1. Refuerzos continuos. Representación de refuerzos particulados, por fibras y tipo sándwich



Fuente. (Materiales Compuestos, 2023).

3.1.6 Materiales compuestos por matriz metálica:

Los materiales compuestos por matriz metálica (MMC) dentro de este tipo de material se podrían dividir en dos grupos teniendo en cuenta sus aplicaciones; dado que hay unos empleados para corte y desgaste (aceros reforzados, carburos cementados, entre otros). Como aquellos que por sus propiedades mecánicas tales como: su módulo especifico, resistencia y rigidez, tienen un gran auge en la industria aeronáutica y automotriz. Las propiedades físicas y mecánicas que presentan este tipo de material compuesto son afectadas por tratamientos térmicos, influyendo así en su desempeño. El tipo de microconstituyente presente en la matriz metálica va a depender de la cinética cuando se enfrié y solidifiqué el material. Dentro del uso más común de las fibras metálicas para la composición de la matriz están las fibras de aluminio, magnesio y titanio.

Entre sus principales ventajas se encuentran:

124Alto módulo de elasticidad.
125Baja densidad.
126Estabilidad térmica.
127Alta resistencia a la tracción y a la compresión
128Compatibilidad mecánica (un coeficiente de expansión térmica bajo, pero que se adapte a las características de la matriz).

3.1.7 Materiales compuestos por matriz cerámica:

Los materiales compuestos por matriz cerámica (CMC), la cerámica aporta buenas propiedades térmicas al material elaborado ya que soporta elevadas temperaturas, presenta una baja densidad lo que lo hace bastante liviano; aunque con muy buenas propiedades mecánicas; por esta razón es que comúnmente se emplean en componentes de vehículos automotores. Sin embargo, su principal desventaja es que es un material muy frágil; por lo cual la finalidad de combinar este tipo de material con otro es aumentar su tenacidad. Este tipo de matriz es reforzada habitualmente por fibras cortas y partículas que generalmente son metálicas o de otro tipo de cerámica; las cuales no interfieran en el proceso del moldeo y compactado del material, los refuerzos más comunes son: Vidrios cerámicos, nitruro de silicio (Si_3N_4), zirconio, carburo de silicio (SiC) y alúmina (Al_2O_3).

3.1.8 Materiales compuestos por matriz polimérica:

Los materiales compuestos por matriz polimérica (CMP) son aquellos que están constituidos por un polímero y son reforzados por fibras o polvos; los cuales se utilizan para brindar refuerzo a la matriz. Es tipo de matriz es la más utilizada; ya que tanto los polímeros termoplásticos, termoestables y elastómeros; son económicos a comparación a los materiales compuestos metálicos, y se destacan por su uso en aplicaciones tanto industriales como cotidianas; ya que presentan buenas propiedades mecánicas lo que los hace adecuados por su fácil adaptabilidad. Se emplean diferentes tipos de refuerzos, pueden usarse en forma de fibras o partículas.

Los materiales termoplásticos tienen la particularidad que una vez son calentados pueden derretirse. Es un proceso reversible el cual no afecta sus propiedades mecánicas. Por otra parte, los materiales elastómeros se pueden deformar considerablemente una vez se está realizando el ensayo a tensión; sin embargo, una vez terminada la prueba, este tipo de polímero es capaz de recuperar su forma inicial (Fonseca H, 2022).

3.1.9 Matrices. Generalidades:

La matriz cumple varias funciones en el material compuesto:

a) Su función principal es soportar la carga aplicada y transmitirla al refuerzo a través de la interfase. Para ello la matriz debe ser deformable.
b) Proteger las fibras del medio externo y mantenerlas unidas. Esta función requiere una buena compatibilidad entre matriz y refuerzo.

Las matrices poliméricas pueden ser termoestables o termoplásticas en función de si presentan o no reticulaciones:

a) Las matrices termoestables presentan uniones covalentes formadas en la reacción de reticulación o curado. Estas matrices presentan las siguientes características. - Son fáciles de procesar antes del curado debido al bajo peso molecular de las resinas precursoras o prepolímeros.

    129 Debido a la formación de reticulación son más tenaces.
    130 Son más frágiles que las termoplásticas.

b) Las matrices termoplásticas no tienen uniones permanentes entre cadenas porque no reticulan. Estas matrices presentan las siguientes características:

    131 Son más difíciles de procesar ya que deben tener un alto peso molecular para presentar buenas propiedades mecánicas.
    132 Se pueden reciclar ya que se reblandecen al calentar y vuelven a la forma sólida al enfriarlos (Mariano, 2015).

3.1.10 Material de Refuerzo:

Es la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz para conferir al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee. En general, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánicas, pero, también, se emplean refuerzos para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión.

El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras. Como regla general, es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz o cuando se incrementa la relación longitud/diámetro de la fibra..., los materiales de refuerzo pueden presentarse en forma de partículas en un amplio grupo de materiales compuestos, los más numerosos y ampliamente utilizados son aquellos reforzados con fibras. En la mayoría de los compuestos reforzados con fibras, éstas son resistentes, rígidas y de poco peso. Si el compuesto debe ser utilizado a temperaturas elevadas, también la fibra deberá tener una temperatura de fusión alta. Por lo que la resistencia específica y el módulo específico de la fibra son características importantes (Stupenengo, 2011).

3.1.11 Interfase matriz/Refuerzo:

“Los refuerzos deben de estar fuertemente unidos a la matriz, de forma que su resistencia y rigidez sea transmitida al material compuesto. El comportamiento a la fractura también depende de la resistencia de la interfase.

Una interfase débil da como resultado un material con baja rigidez y resistencia, pero con alta resistencia a la fractura, mientras que una interfase fuerte resulta en un material rígido y resistente, pero con una frágil resistencia a la fractura.” Las características de la interfase están determinadas por la discontinuidad en propiedades, por esta razón son específicas para combinación fibra matriz.

3.1.12 Unión en la Interfase:

La unión de la interfase tiene lugar una vez que la matriz haya impregnado el refuerzo.

Existen 4 tipos de unión:

a) Unión mecánica: Esta unión es efectiva cuando la fuerza se aplica paralela a la superficie (esfuerzos cortantes). Es poco efectiva para esfuerzos a tracción, cuanto más rugosa sea la superficie más efectiva es la unión.
b) Unión electrostática: Esta unión ocurre cuando una superficie está cargada positivamente y la otra negativamente. La unión es efectiva cuando la distancia es pequeña (orden atómico).
c) Unión química: Puede estar formada entre grupos químicos en la superficie de refuerzo y grupos químicos compatibles en la matriz, la resistencia de la unión depende del número de uniones por unidad de área.
d) Unión mediante reacción: Los átomos o moléculas de los componentes del material compuesto pueden difundirse en la interfase para dar lugar a este tipo de unión. Para interfases en las que estén involucrados polímetros, este tipo de unión puede considerarse como un entrelazado entre moléculas

3.2 MATERIAS PRIMAS

3.2.1 Monómeros:

Unidad atómica sobre la que se genera un enlace con átomos de otros elementos. El monómero más común es el carbono (C) en la forma de 2 átomos de este elemento unidos por un doble enlace, acompañado del hidrogeno y otro elemento (cloro, azufre, oxígeno o nitrógeno) formando así macromoléculas, estas están basadas en moléculas orgánicas exclusivamente y se conectan a partir de enlaces de tipo covalente.

3.2.2 Polímeros

Unión o consecución de macromoléculas de monómeros, que por medio de una reacción química (polimerización) establecen un enlace con la unidad estructural contigua. Esto da lugar a la creación de largas cadenas de monómeros entrelazadas llamadas polímeros que suelen ordenarse de una manera lineal con o sin ramificaciones. Además, los polímeros resultantes de la modificación de un solo monómero son denominados homopolímeros. Si en cambio el polímero es resultante de la unión de 2 monómeros diferentes este es un copolímero.

3.2.3 Plásticos

Son aquellos materiales sintéticos cuya constitución molecular consta de largas cadenas de macromoléculas llamadas polímeros las cuales se disponen de manera entrelazada pudiendo ser amorfos o cristalinos. Se basan en elementos químicos orgánicos, mayormente del carbono (C), acompañado de otros elementos como el nitrógeno (N), hidrogeno (H), oxígeno (O) y azufre (S). Se caracterizan por pasar o estar en un estado deformable, ser inertes, ofrecer buena resistencia al desgaste, poseer propiedades mecánicas variadas y sensibilidad a la temperatura. No todos los plásticos son necesariamente provenientes de materias artificiales.

3.2.4 Tipos de plásticos:

Si bien los plásticos están caracterizados por una estructura molecular basada en cadenas de monómeros, las formas en las que estas se sitúan una respecto a la otra pueden brindar ciertas características al material. Además, el rendimiento que ofrecen al aplicar calor permite evidenciar posibles reordenamientos de las cadenas de polímeros, según estas reacciones se pueden clasificar los plásticos.

3.2.5 Termoplásticos:

Aquellos plásticos que al aplicarles calor permiten un desplazamiento de sus cadenas de polímeros debido al entrelazado de malla ancha, lo que permite moldearles en caliente y adquirir dureza al reducir la temperatura, son llamados termoplásticos (Dr. Ing. von Meysenbug, 1982).

3.2.6 Termoestables:

De acuerdo con el ingeniero Von Meysenbug (1986), Si por el contrario el espacio de entrecruzamiento de las cadenas de polímeros es muy reducida es decir un entrelazado de malla estrecha, se dará lugar a un endurecimiento del material, adicionalmente el aporte de calor no podrá brindar movilidad a la estructura macromolecular limitando de esta manera la deformación, se tratará de un termoestable.

3.2.7 Elásticos:

Un caso especial de los plásticos es aquellos cuyas cadenas de polímeros se disponen en un entrelazamiento de malla ancha, es decir los polímeros se entrecruzan en el espacio, pero estas disposiciones son locales, esto significa que habrá zonas de entrecruzamiento y otras en las que las cadenas poseen la capacidad de desplazarse, permitiéndole al material deformarse y recuperar su forma.

3.2.8 PVC (Cloruro de polivinilo):

Es un termoplástico cuya estructura química se basa en macromoléculas formadas por carbono, hidrogeno y cloro, los cuales son extraídos de la sal (cloruro de sodio) en un 57% y petróleo en un 43%, es muy usado en la actualidad debido a sus propiedades mecánicas y eléctricas. Tiene alta susceptibilidad de conformado, es obtenido mediante polimerización en emulsión en este proceso se obtienen precipitados en forma de polvo fino el cual se aísla, se limpia y se seca para obtener como resultado gránulos finos de PVC.

3.2.9 Cloruro de polivinilo (PVC) duro:

Acorde con el doctor Von Meysenbug (1986), el cloruro de polivinilo (PVC) es un material termoplástico que se reblandece a alrededor de 80 °C (50-60 °C bajo fatiga mecánica) y se vuelve maleable a partir de los 140 °C. A esta temperatura, puede liberar cloro debido a su temperatura de descomposición relativamente cercana. Este desprendimiento de cloro puede dificultar su procesamiento, ya que puede dañar las herramientas utilizadas en la fabricación. Para prevenir esto, se agregan estabilizadores y se croman las herramientas. Además, el PVC duro tiene una baja fluidez a temperaturas bajas, lo que requiere altas presiones durante la conformación. Debido a estas propiedades, el moldeo por inyección no ha sido ampliamente utilizado para el PVC rígido. A pesar de esto, se ha logrado una fabricación económica de piezas moldeadas con amplia aplicación en tuberías.

3.2.10 Cloruro de polivinilo (PVC) blando:

El PVC tiene la capacidad de mezclarse con plastificantes de manera más efectiva que otros plásticos. Estos plastificantes se agregan al polvo polimerizado y se pueden laminar en hojas en una calandria (máquina de rodillos). En el proceso de extrusión, se prepara una mezcla de PVC blando en un granulador, donde se plastifica y se tritura en trozos gruesos que luego se alimentan al extrusor. El PVC blando se utiliza para fabricar una variedad de perfiles, como pasamanos de barandillas, bordes de escalones, revestimientos de mesas, cordones y ribetes para la industria del automóvil, la construcción de aparatos y para recubrir alambres y cables con PVC aislante. Además, el PVC reblandecido mezclado con cargas también se utiliza para fabricar pavimentos en forma de rollos o losetas, estas cargas reducen el costo del pavimento, mejoran su resistencia al desgaste y limitan la acumulación de carga electrostática, (Dr. Ing. von Meysenbug, 1982).

3.2.11 Pasta de PVC:

El PVC en polvo se puede convertir en una pasta al mezclarlo con plastificantes, lo que provoca que se hinche o esponje. Esta pasta se puede gelificar mediante calentamiento. Al tratar las dispersiones acuosas de PVC con plastificantes, se obtienen plastisoles, que son pastas de alta fluidez. Estos plastisoles se pueden verter en moldes o utilizar en el proceso de moldeo centrífugo. Además, a partir de los plastisoles, se fabrican objetos huecos mediante el método de inmersión, como guantes y calzado profiláctico.

Las pastas de PVC se utilizan principalmente para producir piel artificial mediante el proceso de cubrición. Al agregar agentes dilatadores, también se pueden obtener productos de espuma, como esteras para suelos o rellenos para alfombras, (Dr. Ing. von Meysenbug, 1982).

3.2.12 Resina epoxi

Las resinas epóxicas son productos químicos de uso común, de los cuales entre el 75 % y el 90 % se basan en el éter diglicidílico del bisfenol A (DGEBA), formado a partir de una combinación de epiclorhidrina y bisfenol A (Cao & Taylor, 2009, como se citó en ScienceDirect, traducido), también conocidas como resinas epoxídicas o etoxilénicas, son polímeros entrelazados que tienen un policondensado lineal como producto intermedio con moléculas aún reaccionables. Estas resinas pueden ser modificadas con diferentes grupos químicos para otorgarles propiedades distintas y se pueden elaborar de diversas formas. En la mayoría de los casos, los ingredientes se mezclan en el momento de la elaboración, ya que el entrelazamiento comienza de inmediato sin necesidad de aumentar la temperatura, y una vez iniciada la

reacción no puede interrumpirse. Sin embargo, también se pueden fabricar mezclas con una vida útil limitada que están listas para ser utilizadas.

Las propiedades principales de las resinas epoxídicas son que no requieren activación específica, aunque el calor puede acelerar la reacción. Además, durante el entrelazamiento no se forman productos secundarios, lo que significa que no es necesario utilizar presión para evitar la formación de burbujas u otros efectos no deseados. Estas resinas conservan dimensionalmente los productos acabados y se pueden trabajar tanto en estado puro como con cargas inorgánicas.

Las resinas epoxídicas encuentran aplicaciones en diversas áreas, como la fabricación de piel artificial, la confección de matrices y útiles de embutir, el pegado o adhesión de metales, la fabricación de laminados reforzados con fibra de vidrio y la fabricación de cojinetes deslizantes. Además, se utilizan como resinas de lacas y barnices.

En resumen, las resinas epoxídicas son polímeros versátiles que presentan propiedades de adhesión, estabilidad dimensional y resistencia mecánica, lo que las hace adecuadas para una amplia gama de aplicaciones en diferentes industrias, (Dr. Ing. von Meysenbug, 1982).

3.2.13 Matriz epoxi (termoestable) tipos de matriz epoxi

Es una matriz polimérica de tipo termoestable usada en varias aplicaciones de laminados, capas protectoras y compuestos reforzados con fibras y partículas sintéticas como naturales. Posee buenas propiedades mecánicas, mayores que sus homólogas poliésteres, alta estabilidad química, lo que le confiere resistencia frente agentes químicos como los álcalis y la luz solar. El agente de cura, poliamina, polimeriza a temperatura ambiente lo que es conveniente para la fabricación de estos compuestos al evitar la degradación de los refuerzos termoplásticos particulados por la temperatura. Otra ventaja es que, una vez mezcladas, poseen un tiempo de gel de 45 minutos a 25 ºC lo cual facilita la adición del refuerzo y el correcto llenado del molde, así también un bajo coeficiente de expansión térmica lo que significa una alta estabilidad dimensional. De entre las resinas termoestables es una de las que posee mejor adhesión con las fibras, lo que hace su uso muy generalizado en varias aplicaciones (Soto et al., 2015).

3.3 MARCO NORMATIVO:

3.3.1 Ensayo de tensión en polímeros:

El ensayo de tracción para polímeros consiste en someter probetas normalizadas a una velocidad constante y medir la fuerza necesaria para cada deformación como son el polietileno y la poliamida, a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produzca una rotura de la probeta, donde se han presentado serias dificultades para su análisis en lo referente en sus propiedades mecánicas.

Finalmente, nos darán resultados gráficos obtenidos como son el esfuerzo vs deformación, donde en vez de trabajar con la fuerza (F) se utiliza el esfuerzo (σ, en inglés “stress”) el cual se define como la fuerza aplicada dividida por el área transversal (Ao) e interpretar sus parámetros.

Este ensayo nos permite determinar la curva esfuerzo versus deformación de cada material donde podremos determinar sus características plásticas, elásticas y de tensión que pueda soportar el material. Este ensayo se realiza sobre una barra confeccionada con el material que se desea ensayar. Con el objetivo que en cada ensayo se obtengan resultados comparables, las dimensiones de las probetas han sido normalizadas según la norma ISO 527-1, en la cual también se dicta la velocidad de avance de la maquina la cual puede estar entre los 5 mm/min a 50 mm/min.

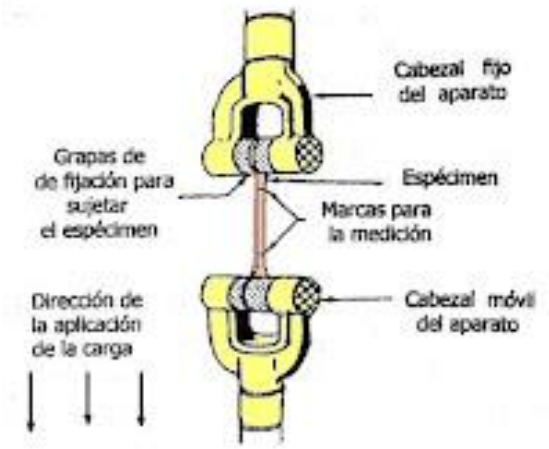
Para describir las propiedades mecánicas esenciales de un compuesto de moldeo, se determina una serie de valores característicos. Generalmente, los valores característicos se utilizan para fines comparativos.

Dichos valores característicos son:

- Tensión a tracción: Fuerza referida a la sección inicial de la probeta.
- Deformación: Variación de la longitud de medición referida a Longitud inicial.
- Módulo de tracción: Gradiente de la curva en el diagrama de tensión-deformación.
- Punto de fluencia: Tensión y deformación en el punto de la curva donde el gradiente es cero.
- Punto de rotura: Tensión y deformación en el momento de rotura de la probeta.
- Coeficiente de Poisson: relación negativa de deformación transversal respecto a extensión longitudinal (Ensayo de Tracción Plásticos ISO 527-1 | ISO 527-2, 2023).

No obstante, la norma ISO 527 no especifica un número mínimo de probetas, esto es decisión de quien va a ejecutar el ensayo y queda a consideración de factores económicos, de repetitividad del procedimiento y la dispersión de los datos; teniendo en cuenta tales ítems se deciden emplear 5 probetas por concentración de PVC blando.

Figura 2. Probeta y mordazas.



Fuente. (Tecnología de los Plásticos: PROPIEDADES MECANICAS, en línea)

3.3.2 Norma ISO 527-1

La norma ISO 527, especifica los principios generales de cómo se deben determinar las propiedades en ensayos a tracción de plásticos y compuestos plásticos. Los métodos descritos en la norma se utilizan para investigar el comportamiento a tracción de las probetas, así como la resistencia a tracción, el módulo de elasticidad en tracción y otros aspectos de la relación esfuerzo/deformación en las probetas. Estos métodos son adecuados para los materiales termoplásticos rígidos y semirrígidos para moldeo, extrusión y colado, incluidos los materiales compuestos cargados y reforzados.

3.3.2.1 Principio:

La probeta es sometida a un esfuerzo de tracción a una velocidad constante a lo largo de su eje longitudinal principal, hasta que alcanza la rotura o hasta que el esfuerzo o la deformación alcancen un valor predeterminado. En el proceso se mide la carga que soporta la probeta y el cambio de longitud va experimentando durante el ensayo.

3.3.2.2 Método:

Los métodos especifican las dimensiones de las probetas. Los ensayos que se realicen con probetas de dimensiones diferentes o con probetas preparadas en condiciones diferentes a las especificadas, pueden conducir a resultados que no sean comparables a los que fija esta norma. También influyen en los resultados factores como la velocidad del ensayo o el acondicionamiento de las probetas. Por lo que, cuando se realicen ensayos se deben controlar y registrar cuidadosamente estos factores.

Cálculo y expresión de los resultados.

❖ Esfuerzo:

Se calculan todos los valores de los esfuerzos utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma = F/A$$

Donde:
σ, es el valor del esfuerzo en cuestión, expresado en MPa.
F, es la fuerza medida implicada, expresada en Newtons.
A, es el área inicial de la sección transversal de la probeta expresada en mm2.

Cuando se determina el esfuerzo al x% de deformación, x se debe determinar a partir de la norma del material correspondiente.

❖ Deformación:

Para materiales y/o condiciones de ensayos para los cuales, es predominante una distribución homogénea de las deformaciones en la sección paralela de la probeta, es decir, para deformaciones previas al punto de fluencia y en el punto de fluencia, se calculan todos los valores de las deformaciones, utilizando la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \Delta L0/L0$$

Donde:
ε, es el valor de la deformación en cuestión, expresado como una relación adimensional, o en porcentaje.

$\boldsymbol{L0}$, es la longitud de referencia de la probeta, expresada en mm.
$\Delta\boldsymbol{L0}$, es el incremento de la longitud de la probeta entre las marcas de referencia expresado en mm.

La determinación de los valores de deformación utilizando un extensómetro, promedia las deformaciones sobre la longitud de referencia. Esto es correcto y útil siempre y cuando, la deformación de la probeta en la longitud de referencia sea homogénea. Si el material comienza a estrecharse, la distribución de la deformación se volverá no homogénea y las deformaciones determinadas con un extensómetro dependerán fuertemente de la posición y del tamaño de la zona del estrechamiento. En tales casos, se utiliza la deformación nominal para describir la evolución de la deformación tras el punto de fluencia.

La deformación nominal se utiliza cuando no se emplea un extensómetro. La deformación nominal se basa en el incremento de la distancia entre las mordazas respecto a la distancia inicial entre ellas. Se admite registrar el desplazamiento del cabezal en lugar de medir el desplazamiento entre mordazas.

El desplazamiento del cabezal debe corregirse para tener en cuenta los efectos de conformidad de la máquina.

133Módulo de elasticidad en tracción.

El módulo de elasticidad en tracción se puede calcular utilizando diferentes alternativas.

Pendiente secante: $Et = \sigma 2 - \sigma 1 / \varepsilon 2 - \varepsilon 1$

Donde:
Et, es el módulo de elasticidad en tracción, expresado en MPa.
σ1, es el esfuerzo, expresado en MPa, medido en el valor de deformación.
ε1=0,05%.
σ2, es el esfuerzo, expresado en MPa, medido en el valor de deformación.
ε2=0,25% (García & Gallo, 2023)

3.3.3 Norma ISO 527-2:

Esta parte de la Norma ISO 527 especifica las condiciones de ensayo para la determinación de las propiedades en tracción de plásticos para moldeo y extrusión, basadas en los principios generales de la Norma ISO 527-1.

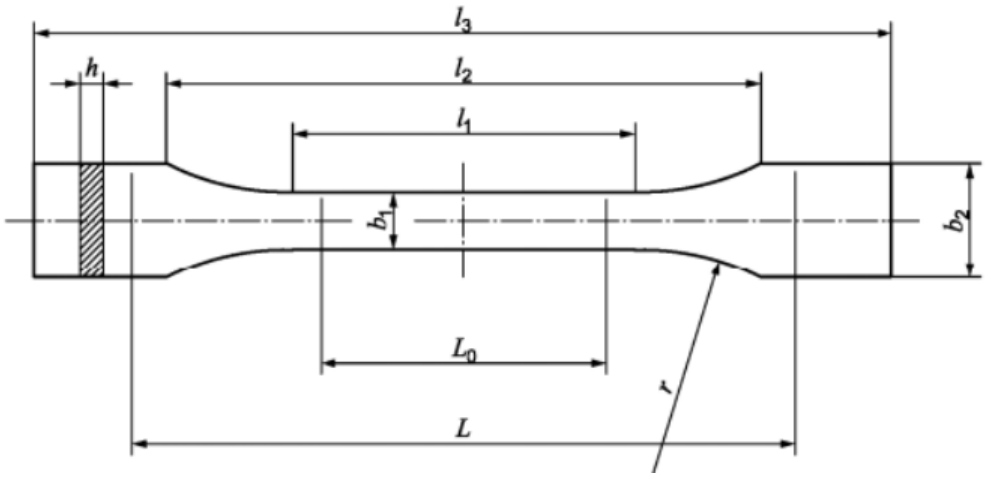
Los métodos no son adecuados normalmente para su uso con materiales celulares rígidos o con estructuras tipo sándwich que contengan material celular. Tampoco son adecuados para películas y hojas flexibles, de espesor inferior a 1 mm. Los

métodos son aplicables a probetas que pueden ser o bien moldeadas a las dimensiones seleccionadas o mecanizadas, cortadas o troqueladas a partir de placas moldeadas por inyección o por compresión.

3.3.3.1 Probetas:

Siempre que sea posible, las probetas deben de ser de tipo 1A y 1B en forma de altera de acuerdo con la Figura 2. La probeta del tipo 1A se debe utilizar para probetas de usos múltiples directamente moldeadas por inyección, las del tipo 1B para probetas mecanizadas. El tipo 1A también puede utilizarse para probetas moldeadas por compresión.

Figura 3. Probeta tipo 1A y 1B (Normativa ISO 527)



Fuente (INTERNATIONAL STANDARD ISO 527-2, 2012)

Tabla 1. Dimensiones probeta tipo 1A y 1B (Normativa ISO 527)

	Specimen type	1A	1B
l_3	Overall length[a]	170	≥150
l_1	Length of narrow parallel-sided portion	80 ± 2	60,0 ± 0,5
r	Radius	24 ± 1	60 ± 0,5
l_2	Distance between broad parallel-sided portions [b]	109,3 ± 3,2	108 ± 1,6
b_2	Width at ends	20,0 ± 0,2	
b_1	Width at narrow portion	10,0 ± 0,2	
h	Preferred thickness	4,0 ± 0,2	
L_0	Gauge length (preferred)	75,0 ± 0,5	50,0 ± 0,5
	Gauge length (acceptable if required for quality control or when specified)	50,0 ± 0,5	
L	Initial distance between grips	115 ± 1	115 ± 1

[a] The recommended overall length of 170 mm of the type 1A is consistent with ISO 294-1 and ISO 10724-1. For some materials, the length of the tabs may need to be extended (e.g. l_3 = 200 mm) to prevent breakage or slippage in the jaws of the testing machine.

[b] $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, resulting from l_1, r, b_1 and b_2, but within the indicated tolerances.

Fuente. (INTERNATIONAL STANDARD ISO 527-2, 2012).

3.3.4 Ensayo de flexión en Polímeros

El ensayo de flexión para polímeros, también conocido como ensayo de flexión en tres puntos, es una prueba mecánica utilizada para determinar el comportamiento de un material cuando se le aplica una carga de flexión. Es especialmente útil en polímeros y plásticos para evaluar propiedades como la resistencia a la flexión, el módulo de flexión y la deformación bajo carga. En este se posiciona la probeta en dos puntos de apoyo inferior, y se aplica una carga equidistante de cada punto de apoyo. A medida que se incrementa la carga, se mide la fuerza aplicada y la deflexión (deformación vertical en el punto de carga), lo que permite obtener una curva esfuerzo-deformación en flexión.

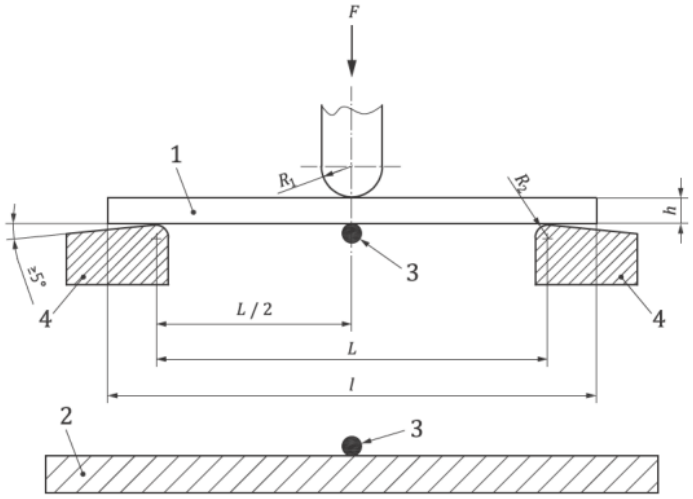
Este ensayo tiene como fin caracterizar el material sometido a un esfuerzo de flexión evaluando los siguientes parámetros:

134 Resistencia a la flexión: tensión máxima que soporta la probeta antes de fracturarse o alcanzar el límite elástico.
135 Módulo de elasticidad en flexión (módulo de flexión): relación entre el esfuerzo y la deformación en la parte lineal de la curva.
136 Deformación a la rotura: Deformación alcanzada al fallar la probeta, si es que se presenta.

Debido a la no aclaración del numero de probetas que se tiene que elaborar para el ensayo de acuerdo con la normativa ISO 178, se decide fabricar 5 probetas por cada concentración de PVC propuesta, teniendo en cuenta las desviaciones en la

obtención de datos, la repetitividad del mismo y el costo de fabricación tanto de los moldes como de las probetas.

Figura 4. Posición de la muestra de prueba y el difractómetro al inicio de la prueba



Key

1	test specimen	h	thickness of specimen
2	support base plate	F	applied force
3	deflectometer position	l	length of specimen
4	supports	L	length of span between supports

Fuente. (NORMA INTERNACIONAL ISO 178, Sexta edición 2019-04).

3.3.5 Norma ISO 178

ISO 178 es un método de prueba para determinar las propiedades de flexión de los plásticos rígidos y semirrígidos mediante la realización de una prueba de flexión de tres puntos en una máquina de prueba de tracción. Una prueba de flexión de tres puntos aplica una fuerza en el punto medio de una muestra rectangular que está flojamente apoyada en ambos extremos. La fuerza aplicada se mide con una celda de carga y la deflexión resultante se mide por el desplazamiento de la cruceta del sistema (con resultados corregidos para la conformidad del sistema) o por un dispositivo de medición de deformación directa. Hay cuatro tipos de pruebas descritas en la norma ISO 178, cada una de las cuales especifica un método de medición de deflexión (por ejemplo, por cruceta directa o transductor de deformación) y un requisito de precisión de calibración asociado.

3.3.5.1 Principio:

Las pruebas ISO 178 generalmente se realizan en sistemas de prueba universales modelo de mesa debido al requisito de capacidad de fuerza relativamente baja. La

máquina de ensayo debe ser capaz de mantener una velocidad de ensayo constante entre 1 y 500 mm/min dentro de las tolerancias especificadas en la norma.

Modelos de máquinas de ensayo de las series 3400 y 6800 cumplen con los requisitos de precisión de velocidad necesarios. El dispositivo de medición de fuerza, o celda de carga, debe cumplir con la clase 1 de ISO 7500-1 en el rango de fuerzas a informar. Es importante asegurarse de que su laboratorio conozca las fuerzas de prueba mínimas y máximas para seleccionar una celda de carga con una capacidad de fuerza y un rango de prueba apropiados (*Guida Definitiva a ISO 178*, 2023).

3.3.5.2 Método:

Tomando en consideración la norma ISO 178 para ensayos de flexión en polímeros se establecen las siguientes ecuaciones para poder definir el esfuerzo de flexión y la deformación sufrida por las diferentes concentraciones de PVC blando implementadas en las probetas con el fin de comparar y analizar su influencia en la matriz epoxica.

❖ Esfuerzo:

Se calculan todos los valores del esfuerzo de flexión utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2$$

Donde:
σ_f, Es el esfuerzo de flexión expresado en MPa
P, La carga dada en N
L, La distancia entre apoyos de la probeta en mm
b, El ancho de la probeta en mm
d, El espesor de probeta expresado en mm

❖ Deformación:

Esta se puede deducir aplicando la siguiente formula:

$$\varepsilon_f = 6Dd/L^2$$

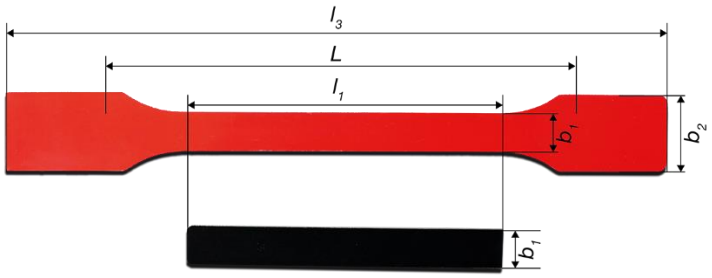
Donde:
ε_f, Es la deformación de flexión en la superficie expresada en % [mm/mm]
D, Máxima deflexión del centro de la viga en mm.
D, Espesor de la probeta en mm.

L, Longitud entre apoyos expresada en mm.

3.3.5.3 Probetas:

Las probetas para el ensayo de flexión comparten medidas de la sección central de las probetas de tensión según ISO 527, al igual que el espesor del espécimen.

Figura 5. Dimensiones para el ensayo de flexión en 3 puntos según la norma ISO 178



Fuente. (ZwickRoell, en línea)

Las muestras ISO 178 se mecanizan a partir de láminas según ISO 2818 o se preparan mediante compresión o moldeo por inyección según ISO 293/295 o ISO 294-1/10724-1 respectivamente. Los tamaños de muestra preferidos se especifican como:

Tabla 2. Formas de probetas y dimensiones para el ensayo de flexión en 3 puntos según la norma ISO 178

Formas de probetas y dimensiones para el ensayo de flexión en 3 puntos según la norma ISO 178									
Norma	Tipo	Observación:	l_3 mm	l_1 mm	b_2 mm	b_1 mm	h mm	L mm	Forma
ISO 20753	A1	Probetas de usos múltiples mediante moldeo por inyección	≥150	80±2	20±0.2	10±0.2	4.0±0.2	115±1	Probeta halterio
ISO 178	-	Parte central de la probeta de usos múltiples	-	≥80	-	10±0.2	4 (opción preferida)	-	Probeta en forma de barra

Fuente. (ZwickRoell, en línea)

Si no se pueden obtener las dimensiones preferidas, ISO 178 ofrece anchos alternativos dependiendo del grosor de la muestra. Si el material es anisotrópico, se deben probar ambas direcciones.

3.4 ANTECEDENTES

3.4.1 Estado Del Arte

Para el desarrollo de este proyecto, se hace una compilación de diferentes investigaciones relacionadas con el tema de interés: ‘’ Preparación y análisis mecánico de tracción y flexión para un material compuesto por matriz epoxi y refuerzo de PVC particulado en diferentes concentraciones (20%, 40% y 60% de PVC)’’; con la finalidad de recopilar ideas para la realización del proyecto.

Tabla 3. Estado del arte

Titulo	Año	Lugar	Autor	Descripción
Estudio de las propiedades mecánicas de un material compuesto de fibra de vidrio y resina polimérica modificada con poliestireno expandido.	2019	Santiago de Cali	Diana Carolina Andrade Perez, Laura Jimena Rodriguez Gonzalez	El documento describe un estudio en el que se evaluaron las propiedades mecánicas a tracción de un material compuesto hecho de fibra de vidrio (FV) y resina polimérica modificada con poliestireno expandido (EPS) en diferentes concentraciones (20, 30 y 50%). Durante el proceso de fabricación, se demostró que a medida que se agregaba más EPS a la muestra, las probetas se volvían más flexibles y maleables. Los ensayos realizados mostraron un comportamiento lineal entre esfuerzo y deformación en todas las pruebas, y se encontró que el esfuerzo máximo a la tracción y la elongación a la ruptura disminuyeron para los materiales que contenían más % de EPS. Sin embargo, se producirá que el material compuesto

				se modifique con la reutilización del EPS y podría ser empleado en otras aplicaciones que no requieran el nivel de resistencia a la tracción que la FV de manera individual. En general, se propone un proceso que podría reutilizar EPS de embalaje y reducir el impacto ambiental de este residuo.
Obtención y caracterización mecánica de material compuesto resina poliéster - fibra de piña	2017	Bogotá, Universidad libre	Andrés Mauricio Alvarado Castiblanco	El documento describe la fabricación de un material compuesto utilizando fibras de piña como refuerzo y resina poliéster como matriz. Se fabrican materiales con porcentajes de 5, 10 y 15 % de refuerzo para determinar por medio de ensayos de tensión y flexión las propiedades mecánicas de cada tipo de material y ver su aporte respecto al material de la matriz. Se concluyó que el material con un 15% de refuerzo presentó el mejor comportamiento mecánico.
Fabricación de materiales compuestos de alto rendimiento medioambiental con resina epoxi de origen renovable y núcleos ligeros permeables para infusión asistida por vacío.	2020	Ecuador, Universidad Politécnica Salesiana.	Diego Lascano, Jorge Valcárcel, Rafael Balart, Luís Quiles-Carrillo, Teodomiro Boronat.	El documento describe la fabricación de materiales compuestos tipo sándwich híbridos de bajo peso utilizando una resina epoxi parcialmente renovable y núcleos ligeros permeables para infusión asistida por vacío. Se evaluaron las propiedades mecánicas de los materiales en condiciones

				de impacto y flexión y se encontró que el uso de un núcleo poroso como medio de difusión en un proceso VARIM convencional es una alternativa exitosa para fabricar estructuras compuestas livianas tipo sándwich. Los silanos desempeñan un papel clave en la mejora del desempeño mecánico. Además, se encontró que la sustitución de uno de los tejidos de basalto en las láminas superficiales por tejido de lino tiene un efecto esencial en las propiedades globales, principalmente en la resistencia a la flexión y el módulo de flexión, mientras que la resistencia al impacto se mantiene casi invariable. En general, los paneles compuestos basados en lino representan una alternativa interesante desde el punto de vista técnico y ambiental.
Evaluación de la morfología y propiedades mecánicas de composites laminados a base de epoxi, corcho y microesferas de vidrio.	2019	Pereira, REVISTA MATERIA	Bruno Santos Pereira	El estudio evaluó compuestos laminados hechos de resina epoxi, corcho y microesferas huecas de vidrio en términos de densidad, morfología y resistencia a la flexión. Se encontró que la inserción de los rellenos redujo la densidad de los compuestos y mejoró el módulo de flexión y el esfuerzo de flexión en

				comparación con la matriz polimérica. Los compuestos laminados con núcleo incorporado de corcho pueden ser una alternativa para reducir el peso y para aplicaciones que requieren una mayor capacidad de plegado que la resina pura puede soportar.
Optimización bajo metodología de superficie de respuesta (MSR) del material compuesto de matriz epoxi reforzado con fibra de chambira (ASTROCARYUM), curado al ambiente y su incidencia en las propiedades mecánicas.	2022	Ambato - Ecuador	Andrés Santiago Tintín Chicaiza	El documento presenta un estudio sobre un material compuesto de resina epoxi propiedades reforzadas con fibras de chambira, en el que se logró la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) para optimizar las propiedades mecánicas. Se pueden producir tres factores de entrada con tres niveles cada uno: la orientación de las fibras de chambira (-45, 0, 45 grados), el tiempo de curado (16, 24, 32 días) y la relación de mezcla de la resina epoxi (70/30, 80/20, 90/10). Se obtuvo una configuración óptima al combinar la orientación de las fibras de chambira a -45 grados, el tiempo de curado de 32 días y la relación de mezcla de la resina epoxi de 70/30, con una deseabilidad compuesta de 0.8323 y una cantidad de las propiedades del 99.95 por ciento.
Análisis de las características	2018	Ambato – Ecuador	Carolina Nataly	El proyecto analiza las propiedades mecánicas de

mecánicas de un material compuesto de matriz polimérica reforzado con partículas de caucho de neumáticos reciclados y su incidencia en las propiedades mecánicas.			Acosta Benavides	un material compuesto de matriz polimérica reforzado con partículas de caucho de neumáticos reciclados con concentraciones de refuerzo del 30%, 35% y 40%. Se elaboraron probetas y se realizaron ensayos de flexión, compresión y dureza bajo normativas ASTM. Se determinó que la combinación del 30% de partículas de caucho y 70% de resina poliéster presentó las mejores propiedades mecánicas. Se determinó que la incorporación de partículas de caucho en la resina poliéster inciden negativamente en los esfuerzos máximos de flexión y compresión, módulos de elasticidad de flexión y compresión, y dureza, pero soporta mayores deformaciones tanto a flexión y compresión.
Investigación sobre las propiedades mecánicas y los mecanismos de falla de un nuevo material compuesto tipo sándwich con fibra de carbono/epoxi Láminas frontales y núcleo de espuma de PVC	2022	Reino Unido-Universidad de Greenwich, Facultad de Ingeniería	Ayse Cagla Balaban.	El documento describe un estudio sobre las propiedades mecánicas y los mecanismos de falla de un material compuesto de sándwich novedoso que consiste en láminas de fibra de carbono/epoxi y un núcleo de espuma de PVC. Se realizaron pruebas de compresión, corte y flexión, y se encontró que las tensiones máximas dependen de la dirección

				de la carga y del grosor de las láminas. El estudio proporciona información valiosa sobre el comportamiento de los materiales compuestos de sándwich y sus posibles aplicaciones en diversas industrias. Además, se examinaron las características físicas y mecánicas de las láminas superior e inferior del panel compuesto de sándwich y se realizaron pruebas de tensión y compresión. Los resultados indican que, si el núcleo es débil en corte, las láminas no cooperan y el sándwich pierde su rigidez. Este estudio servirá como investigación preliminar para el estudio del comportamiento de fractura e impacto de los materiales compuestos de sándwich.
Evaluación a nivel de laboratorio de las características químicas y mecánicas del comportamiento de un material compuesto a partir de matrices de resina epoxi mezcladas con ripio de llanta en diferentes proporciones para su utilización como material alternativo en diversos campos de la industria.	2022	Fundación universidad de América facultad de ingenierías, Bogotá D.C.	Laura Maria Pardo Motta, Juan Camilo Maldonado Parra	El estudio evaluó las propiedades químicas y mecánicas de un material compuesto de resina epoxi y ripio de llanta en diferentes proporciones. Se realizaron pruebas de tensión y flexión, análisis morfológicos y solubilidad en diferentes solventes. Se adquirió un diseño experimental 2^3 y se manipuló la temperatura durante el proceso de curado. Los porcentajes de mezcla utilizados fueron 30%, 50% y 70% de resina

				epoxi y 70%, 50% y 30% de ripio de llanta, respectivamente. La probeta con relación 70% - 30% presentó la mayor carga a la tensión, con una resistencia máxima de 9,717KN/m. La resistencia máxima de flexión fue de 0,173Mpa. Las probetas mostraron baja dilatación térmica lineal y baja solubilidad frente a tres solventes comerciales. El análisis morfológico mostró baja regularidad estructural en probetas con alto contenido de resina y alto grado de homogeneidad estructural en las probetas con alto contenido de ripio. En general, los resultados sugieren que el material compuesto puede ser una alternativa viable para aplicaciones estructurales.
Efecto de la temperatura elevada en servicio sobre las propiedades mecánicas y la microestructura de los polímeros epoxi cargados con partículas	2019		Mojdeh Mehrinejad Khotbehsara, Allan Manalo	Este estudio investiga cómo la temperatura elevada afecta las propiedades mecánicas de las resinas a base de epoxi llenas de partículas con retardante de fuego y rellenos de cenizas volantes. Los resultados muestran que aumentar los porcentajes de refuerzo mejora la retención de las propiedades mecánicas a temperatura elevada en servicio. La resina epoxi cargada con partículas

				exhibe mejores propiedades de ingeniería a temperaturas elevadas en servicio, lo que la hace más duradera y adecuada para aplicaciones de ingeniería civil. Además, se propone una ecuación de predicción simplificada que se correlaciona fuertemente con la resistencia a la tracción experimental por compresión y división a diferentes niveles de temperatura elevada en servicio.

Fuente (Elaboración propia, 2025)

4 DESARROLLO DEL PROYECTO

Para lograr un análisis exhaustivo de las propiedades mecánicas de un material compuesto de resina epoxi y PVC blando, este proyecto seguirá una metodología precisa y detallada a lo largo de este proceso. Este enfoque riguroso nos permitirá comprender cómo la concentración de PVC influye en las propiedades mecánicas del material compuesto y avanzar hacia posibles aplicaciones. Prácticas.

1. Definición del enfoque metodológico: El proyecto empleará un enfoque de investigación experimental. Este enfoque permitirá medir directamente el efecto de diferentes concentraciones de PVC en las propiedades mecánicas de las probetas de matriz epoxi.

2. Revisión bibliográfica: Se realizará una revisión de literatura relacionada con materiales compuestos de matriz epoxi y PVC. Se investigarán las normas ISO específicas para la fabricación y prueba de probetas (ISO 527-1, ISO 527-2 e ISO 178).

3. Adquisición y preparación de los materiales: Se adquirirán la resina epoxi y el PVC. Se variará la concentración de PVC en tres niveles: 20%, 40% y 60% para examinar su impacto en las propiedades mecánicas del compuesto.

4. Fabricación de las probetas: Siguiendo las normas ISO 527-1 e ISO 527-2, se fabricarán probetas de la mezcla de resina epoxi y PVC para pruebas de tracción. Similarmente, se fabricarán probetas acordes a la norma ISO 178 para pruebas de flexión.

5. Pruebas mecánicas: Se realizarán pruebas de tracción y flexión en cada conjunto de probetas utilizando equipos de prueba estándar. Los resultados proporcionarán datos sobre cómo las diferentes concentraciones de PVC afectan las propiedades mecánicas del compuesto.

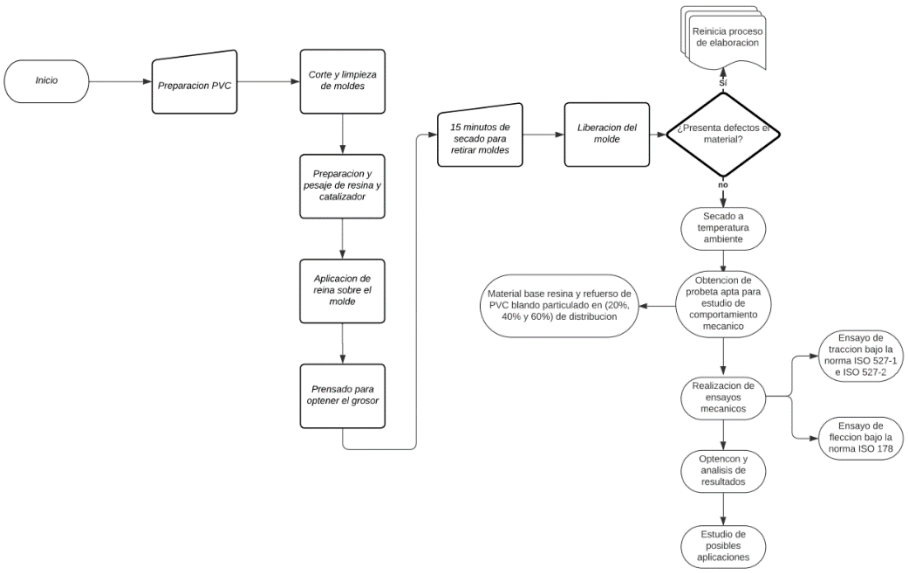
6. Identificación de las propiedades mecánicas a tensión y flexión: A partir de los datos recolectados en las pruebas, se calculará el módulo de elasticidad y de flexión para cada conjunto de probetas.

7. Análisis de datos: Se analizarán los datos recolectados utilizando técnicas estadísticas adecuadas. Este análisis buscará identificar tendencias y relaciones entre la concentración de PVC y las propiedades mecánicas observadas.

8. Interpretación y presentación de los resultados: Los resultados se interpretarán en el contexto de la literatura existente y los objetivos del proyecto. Se elaborará un informe detallando el proceso de investigación, los resultados obtenidos y su interpretación.

9. Redacción y revisión del informe final: Se elaborará un informe detallado, en el cual se presentarán todos los hallazgos del estudio. Este informe pasará por una etapa de revisión y edición antes de su presentación final.

Figura 6. Diagrama de flujo propuesto para el proyecto



Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1 PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS PARA LA ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE RESINA EPOXI CON LA CONCENTRACIÓN DE PVC BLANDO EN (20%, 40% Y 60%)

En esta sección se describe el proceso llevado a cabo para la obtención de materiales, la preparación de las muestras y la ejecución de los ensayos mecánicos de tracción y flexión. Estos ensayos permiten evaluar el comportamiento mecánico del material compuesto con matriz epoxi y refuerzo de PVC blando particulado en diferentes concentraciones (20%, 40% y 60% de PVC).

4.1.1 Obtención de materiales:

Para la fabricación del material compuesto, se utilizaron los siguientes materiales:

- Matriz: Resina epoxi de tipo (JTDO), con su respectivo catalizador.
- Refuerzo: Pellet de PVC blando.
- Moldes de silicona y desmoldante.
- Vasos volumétricos.
- Bascula.
- Pistola de calor
- Pie de Rey

4.1.2 Resina Epoxi

La resina utilizada en este estudio es la JTDO Resina Epoxi, transparente autonivelante sin burbujas, facilitando una distribución homogénea del material en los moldes. Además, presenta una baja tendencia a la formación de burbujas, lo que la hace ideal para la elaboración de las probetas, garantizando una mejor calidad en las muestras, evitando concentradores de esfuerzo que puedan afectar los resultados de los ensayos mecánicos.

No se dispone de la ficha técnica proporcionada por el fabricante; sin embargo, sus propiedades mecánicas serán determinadas a través de los ensayos realizados. Para establecer una referencia base, se prepararon muestras con 100% de resina y 0% de material particulado PVC como refuerzo para contrastar la resistencia mecánica a tensión y de flexión.

La formulación utilizada para la mezcla y curado de la resina consistió en una relación de componentes 1:1 (resina y endurecedor), siguiendo las indicaciones generales. El curado se realizó a temperatura ambiente durante 4 días, aplicando calor con pistola térmica en la etapa inicial para mejorar la distribución y eliminar posibles burbujas en la mezcla.

Figura 7. Resina epoxi JTDO



Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1.3 Diseño de moldes:

Para la fabricación de las probetas, se propone el método de colada, el cual consiste en verter el polímero en estado líquido o fundido en un molde (matriz) con un volumen y forma establecidos como explica el libro *tecnología de plásticos para ingenieros*; se diseñaron y probaron diferentes tipos de moldes a partir de la norma ISO 527-1 e ISO 527-2 con el fin de obtener muestras con las dimensiones requeridas y garantizar su correcta extracción sin daños.

Inicialmente, se propone el empleo de moldes de acero los cuales se obtienen por medio de corte laser para obtener las medidas requeridas. Una vez obtenidos los moldes (5), se implementaron, además, con una lámina de vidrio como fondo del molde. Al poner en práctica esta configuración se evidencio que los moldes de acero no cumplían con los requerimientos de planitud necesarios para el proceso de colada, ya que al situar el molde metálico sobre el vidrio se podía ver un paso de luz entre las superficies, esto propicio el derramamiento de la resina, adicionalmente la resina se adhiere fuertemente al acero produciendo por ende un resultado poco satisfactorio en las dimensiones y acabados de las probetas.

Figura 8. Moldes metálicos para probetas de tracción.



Fuente (Elaboración propia, 2025)

Debido a los problemas que se describieron anteriormente se decide utilizar un fondo de silicona. Este es comercializado como tapete de silicona para hornear, se elige este material debido a las propiedades antiadherentes que posee, además esta superficie proporciona un mejor agarre con los moldes de metal, pudiendo así contrarrestar la curvatura de estos. No obstante, la deformación de los moldes y la adhesión de la resina epoxi a los moldes metálicos no permitió obtener las probetas con los requisitos estipulados en la norma ISO 527, ya que estas presentaban grietas, rebabas y variaciones en la medida de su espesor.

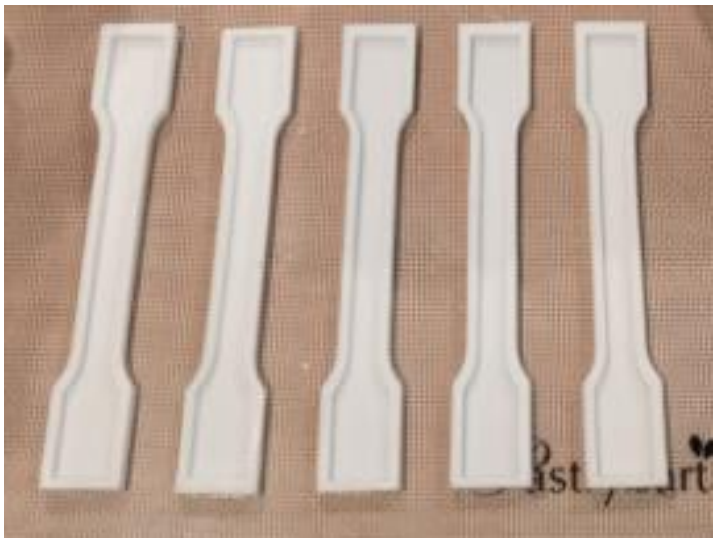
Figura 9. Tapete de silicona



Fuente (Elaboración propia, 2025)

Debido a esta limitación, se optó por la fabricación de moldes de silicona, los resultados respecto a las medidas y el acabado superficial fueron un éxito, debido a que la silicona presenta una estabilidad dimensional aceptable, además de garantizar la no adherencia de la resina con el molde lo que permitió una extracción limpia de la probeta una vez terminado su proceso de curado, además, se utilizó un desmoldante, lo que facilito la extracción de las probetas sin comprometer su geometría ni sus dimensiones.

Figura 10. Moldes de silicona para probetas a tracción.



Fuente (Elaboración propia, 2025)

Figura 11. Moldes de silicona para probetas de flexión.



Fuente (Elaboración propia, 2025)

Figura 12. Agente desmoldante



Fuente (Elaboración propia, 2025)

Se adquieren 5 moldes para las probetas de tensión y 5 para las probetas de flexión las cuales fueron diseñadas teniendo en cuenta las normas ISO 527-1 e ISO 527-2 para los ensayos de tracción e ISO 178 para ensayos de flexión.

4.1.4 PVC blando particulado

El material de refuerzo utilizado en la fabricación del material compuesto es PVC blando. Un polímero comúnmente utilizado en la industria de calzado debido a su flexibilidad y resistencia. Sin embargo, para su incorporación en la matriz epoxi, fue necesario transformarlo de su presentación inicial en pellets a una forma particulada con dimensiones adecuadas para su mezcla con la resina.

Para este proceso, se utilizó un molino manual, el cual permitió la reducción del tamaño del material hasta obtener un polvo fino del PVC blando. Durante la molienda, se aseguraron condiciones homogéneas para evitar la formación de partículas excesivamente grandes que pudieran afectar la distribución del refuerzo en la resina.

Figura 13. PVC blando en presentación de pellets.



Fuente (Elaboración propia, 2025)

Figura 14. Molienda de pellets PVC blando.



Fuente (Elaboración propia, 2025)

4.1.5 Elaboración de probetas para ensayos a tracción:

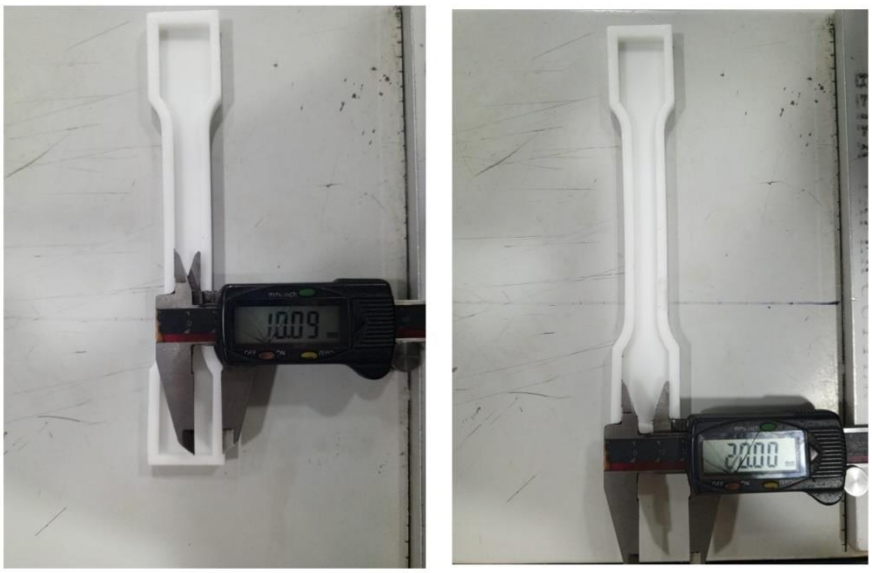
4.1.5.1 Verificación de las dimensiones:

Antes de iniciar la fabricación de las probetas, se realizó una verificación exhaustiva de las dimensiones de los moldes utilizados. Esto se hizo con el fin de garantizar que las probetas obtenidas cumplieran con los requerimientos establecidos ISO 572-2. Se midieron las dimensiones internas de cada cavidad del molde utilizando un calibrador pie de rey digital y se compararon con las dimensiones especificadas para asegurar su correspondencia, esta verificación es fundamental, ya que cualquier variación en las dimensiones podría afectar los resultados de los ensayos.

Dimensiones según la norma ISO 527-2 (Ensayo de tracción):

- Longitud total: 1170mm
- Longitud de la zona útil: 75mm
- Ancho de la zona útil: 10mm
- Espesor: 4mm
- Longitud de los extremos ensanchados :30mm
- Ancho de los extremos ensanchados: 20mm
- Radio de la transición entre la zona útil y los extremos: 25mm

Figura 15. Verificación dimensiones de los moldes para probetas a tracción



Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1.5.2 Medición de componentes y preparación de la mezcla:

Cada conjunto de probetas fue elaborado con una composición especifica de matriz epoxi y refuerzo de PVC blando particulado, expresada en porcentajes volumétricos. Para cada concentración, se fabricaron 5 probetas, asegurando la repetibilidad de los resultados

La dosificación de los materiales se llevó a cabo mediante el uso de un vaso volumétrico graduado, lo que permitió una medición precisa de los volúmenes requeridos de resina y refuerzo en casa caso. Los porcentajes volumétricos utilizados fueron los siguientes:

- 100% resina – 0% PVC particulado
- 80% resina – 20% PVC particulado
- 60% resina – 40% PVC particulado
- 40% resina – 60% PVC particulado

Dado que cada probeta de tracción requería un volumen de 11.2ml de mezcla, para evitar errores en la dosificación y facilitar la medición de los componentes, se calculó el volumen total necesario para la fabricación de las 5 probetas correspondientes a cada concentración. Este valor ascendió a 56ml. Sin embargo, para asegurar una mayor precisión y evitar inconsistencias durante la preparación, se decidió fabricar 75ml de mezcla en total por cada concentración. Esta cantidad permitió manejar números cerrados en la medición de cada componente según su porcentaje volumétrico y minimizar el impacto de pérdidas durante la manipulación.

La medición de la resina se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se determino el volumen exacto de resina a utilizar, teniendo en cuenta el porcentaje de refuerzo en cada mezcla.
- Se peso el catalizador con una precisión adecuada utilizando una báscula, para así asegurando que la mezcla estuviera dentro del rango recomendado por el fabricante.
- La relación de catalizador se mantuvo constante en todas las mezclas para garantizar un curado uniforme.

Figura 16. Elaboración de la mezcla resina/catalizador.

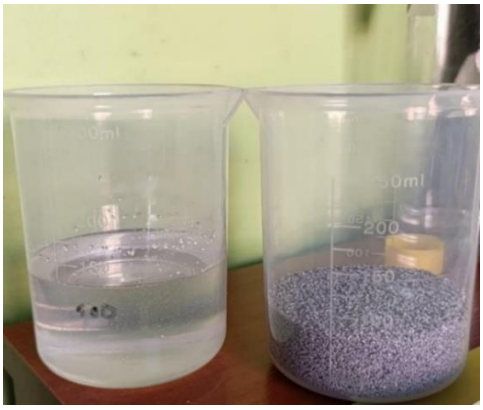


Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1.5.3 Incorporación del refuerzo de PVC blando particulado:

- Se midió el volumen correspondiente de refuerzo para cada concentración con ayuda de un vaso volumétrico.
- El refuerzo se añadió gradualmente a la resina, asegurando una distribución homogénea mediante agitación controlada.
- Se evito la formación de burbujas de aire durante la mezcla, ya que esto podría afectar la calidad y resistencia final de las probetas.

Figura 17. Medición de porcentajes volumétricos de material, Resina/PVC particulado, para elaboración de probetas a tracción.



Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1.5.4 Preparación de las probetas a tracción de acuerdo con la norma ISO 527-1 e ISO 527-2:

Una vez preparada la mezcla correspondiente a cada una de las concentraciones de PVC blando particulado (0%, 20%, 40% y 60% en volumen), se procedió al vertido dentro de los moldes de silicona para las probetas de tracción.

Antes del vertido, los moldes fueron cuidadosamente limpiados y ligeramente lubricados con desmoldante para facilitar la extracción posterior de las probetas.

El vertido se realizó directamente desde el vaso de mezcla, con movimientos lentos y constantes, procurando evitar al máximo la inclusión de aire y asegurando la cantidad necesaria de volumen de la mezcla requerido por cada probeta. Esta dosificación precisa fue gracias al cálculo anticipado de los volúmenes totales, lo cual permitió obtener números cerrados y evitar errores por cantidades insuficientes.

El proceso se repitió para cada uno de los porcentajes. Las 5 probetas de cada concentración fueron vertidas en paralelo, asegurando condiciones homogéneas de temperatura y manipulación.

Finalmente, las mezclas vertidas se dejaron curar a temperatura ambiente durante el tiempo recomendado por el fabricante de la resina, sin necesidad de aplicar curado adicional, con el fin de simular condiciones reales de uso del material.

Tabla 4. Proporciones volumétricas para probetas de tracción.

Tabla de Proporciones Volumétricas Para Probetas Ensayo a Tracción (75 ml)			
Resina - PVC (%)	Volumen Resina (ml)	Volumen PVC (ml)	NOTA: El volumen esta calculado para 5 probetas
100 - 0	75	0	
80 - 20	60	15	
60 - 40	45	30	
40 - 60	30	45	

Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 18. Proceso de moldeo de las probetas.



Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1.5.5 Desmolde de las probetas:

Una vez finalizado el tiempo de curado, se procedió al desmolde de las probetas. El tiempo de curado fue monitoreado para garantizar que el material alcanzara la rigidez adecuada antes de realizar los ensayos de laboratorio. El molde de silicona facilito el proceso, ya que su naturaleza flexible permitió liberar las probetas sin ejercer fuerzas excesivas que pudieran provocar deformaciones o fisuras.

Durante este procedimiento, se verifico que cada probeta mantuviera su geometría original conforme a las especificaciones de la norma ISO 527-2.

Figura 19. Desmolde probetas a tracción (100%Resina / 0%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025)

Figura 20. Desmolde probetas a tracción (80%Resina / 20%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 21. Desmolde probetas a tracción (60%Resina / 40%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025)

Figura 22. Desmolde probetas a tracción (40%Resina / 60%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1.6 Elaboración de probetas para ensayos a flexión de acuerdo con la norma ISO 178:

Con el fin de caracterizar las propiedades mecánicas del material compuesto en condiciones de flexión, se elaboraron dos tipos de probetas, ambos en cumplimiento con los requerimientos de la norma ISO 178, pero adaptadas a condiciones practicas del laboratorio y las limitaciones de la maquina disponible.

4.1.6.1 Verificación de dimensiones y preparación de los moldes:

Para la realización de los ensayos de flexión del material compuesto, fue necesario la fabricación de dos tipos diferentes de probetas, debido a las limitaciones técnicas del equipo disponible en el laboratorio de la universidad. Inicialmente, se elaboraron probetas con las dimensiones normalizadas establecidas por la norma ISO 178, que son comúnmente empleadas para materiales poliméricos con espesores inferiores a 6mm. Estas dimensiones corresponden a:

- Longitud (L): 80 mm
- Ancho (b): 10 mm
- Espesor (e): 4 mm

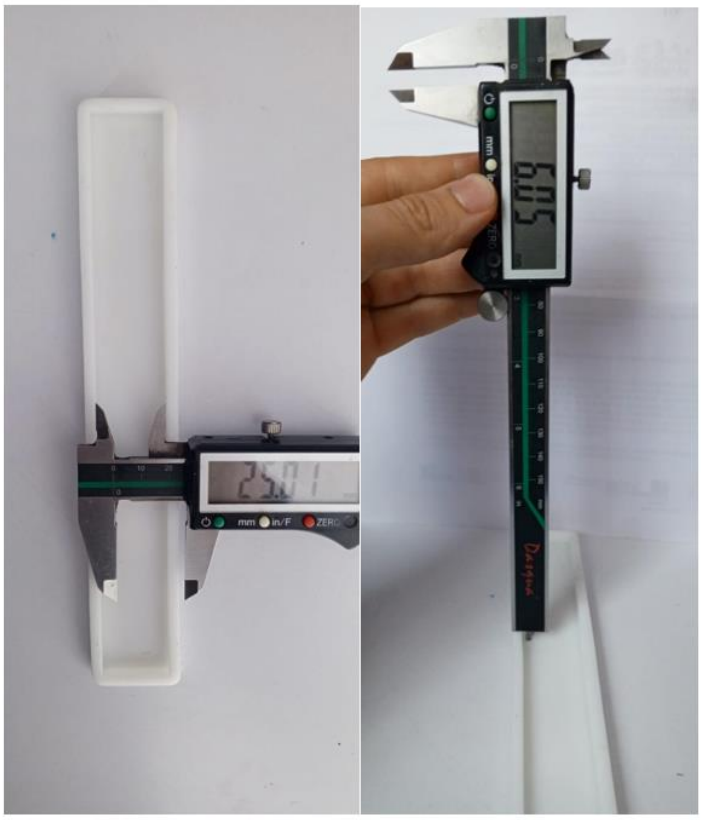
Sin embargo, al realizar las pruebas preliminares con estas dimensiones de probeta en la maquina universal de ensayos para materiales poliméricos, se identificó una importante dificultad: el punzón de la maquina contaba con una celda de carga mínima de 10KN, lo cual excedía significativamente la capacidad de carga de las probetas de tamaño reducido. Como consecuencia, no fue posible registrar datos fiables de fuerza y desplazamiento, lo cual afectaría directamente la interpretación de los resultados.

Ante esta situación, y en conjunto con las recomendaciones del docente a cargo, se tomó la decisión de escalar de forma proporcional las dimensiones de las probetas, permitiendo así una mayor resistencia estructural y una compatibilidad adecuada con el equipo de ensayo. Las nuevas dimensiones adaptadas a las condiciones requeridas fueron las siguientes:

- Longitud (L): 200 mm
- Ancho (b): 25 mm
- Espesor (e): 6 mm

Gracias a esta modificación fue posible realizar los ensayos en la maquina universal de ensayos convencional, obteniendo datos precisos y repetibles sobre la resistencia a flexión del material compuesto.

Figura 23. Verificación dimensiones de los moldes para probetas a flexión.



Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1.6.2 Medición de componentes y preparación de la mezcla:

Al igual que en la elaboración de probetas para tracción, las mezclas se realizaron con porcentajes volumétricos específicos de resina epoxi y PVC blando particulado: 0%, 20%, 40% y 60% de refuerzo.

Para las probetas de flexión, cada cavidad del molde requirió un volumen mayor en comparación con las probetas de tracción. Para asegurar la precisión del procedimiento, se calcularon volúmenes totales necesarios para cinco probetas por cada porcentaje de refuerzo, sumando un volumen adicional de seguridad para facilitar la medición y evitar inconsistencias. El cálculo de estos volúmenes se realizó con base en el tamaño de cada cavidad, usando vasos volumétricos calibrados.

Tabla 5. Proporciones volumétricas para probetas de flexión.

Tabla de Proporciones Volumétricas Para Probetas de Flexión (6 ml)		
Resina - PVC (%)	Volumen Resina (cm3)	Volumen PVC (cm3)
100 - 0	200	0
80 - 20	160	40
60 - 40	120	80
40 - 60	80	120

Fuente (Elaboración propia, 2025)

4.1.6.3 Incorporación del refuerzo de PVC blando particulado:

- Se midió el volumen correspondiente de refuerzo para cada concentración con ayuda de un vaso volumétrico.
- El refuerzo se añadió gradualmente a la resina, asegurando una distribución homogénea mediante agitación controlada.
- Se evito la formación de burbujas de aire durante la mezcla, ya que esto podría afectar la calidad y resistencia final de las probetas.

Figura 24. Medición de porcentajes volumétricos de material, Resina/PVC particulado, para elaboración de probetas a flexión.



Fuente (Elaboración propia, 2025)

4.1.6.4 Vertido de la mezcla en los moldes para la preparación de las probetas a flexión:

El proceso de vertido de la mezcla en los moldes de silicona para probetas a flexión fue similar al procedimiento realizado para el vertido de la mezcla en las probetas a tracción. Una vez preparada la mezcla correspondiente a cada una de las concentraciones de PVC blando particulado (0%, 20%, 40% y 60% en volumen), se procedió al vertido dentro de los moldes de silicona para las probetas de flexión.

Durante el vertido, se aplicó calor suficiente con una pistola de calor térmica, a una distancia prudente, para ayudar a la liberar burbujas de aire que pudieran quedar atrapadas. Además, se realizó una inspección visual para asegurar que no hubiera partículas acumuladas o mal distribución, especialmente en los extremos de las cavidades.

El proceso se repitió para cada uno de los porcentajes. Las 5 probetas de cada concentración fueron vertidas en paralelo, asegurando condiciones homogéneas de temperatura y manipulación.

Figura 25. Proceso de moldeo de las probetas.



Fuente (Elaboración propia, 2025)

4.1.6.5 Curado y desmolde de las probetas:

Las probetas fueron dejadas en los moldes durante un periodo de curado de 4 días a temperatura ambiente, sin aplicar curado térmico adicional, con el fin de simular condiciones prácticas y comparar el comportamiento real del material.

Una vez transcurrido el tiempo de curado, se procedió al desmolde, Gracias al uso de moldes de silicona y la aplicación previa de desmoldante, el proceso se realizó sin dificultades. Se aplico presión controlada en los extremos de cada molde para liberar las probetas, evitando deformaciones o daños en su geometría.

Cada probeta fue inspeccionada fue inspeccionada visualmente y medida con un calibrador digital para asegurar que cumpliera con las dimensiones requeridas.

Figura 26. Desmolde probetas a flexión acorde a las dimensiones de la norma ISO 178.



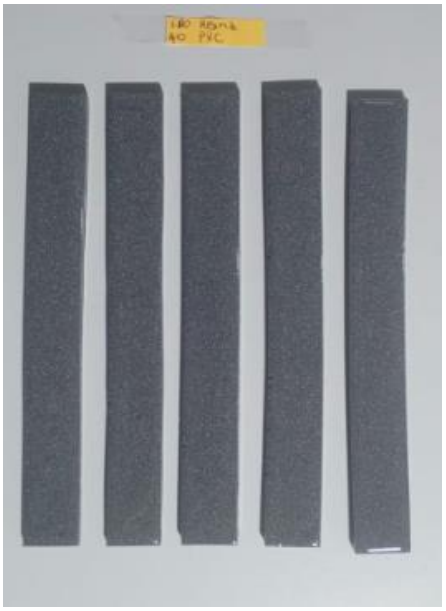
Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 27. Desmolde probetas a flexión con dimensiones escaladas (100%Resina / 0%PVC).



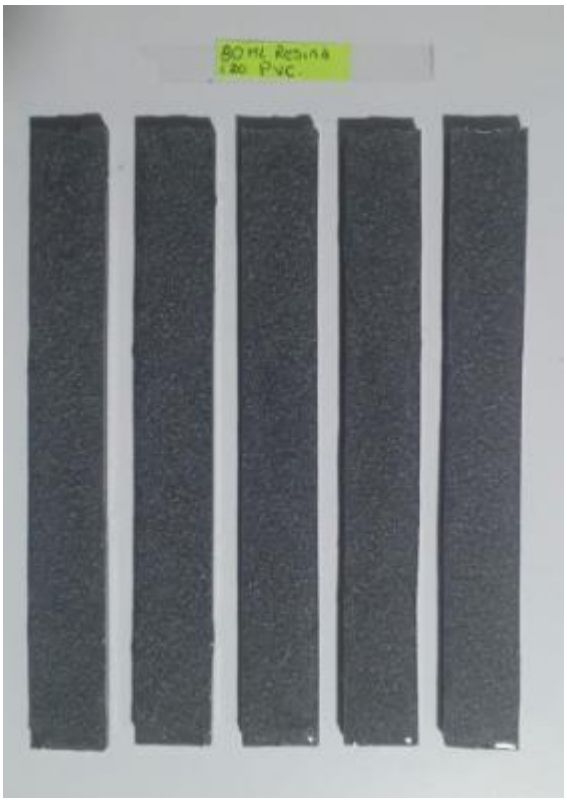
Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 28. Desmolde probetas a flexión con dimensiones escaladas (80%Resina / 20%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 29. Desmolde probetas a flexión con dimensiones escaladas (40%Resina / 60%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1.7 Realización de ensayos a tracción – ISO 527-2

Para la realización de los ensayos a tracción, se elaboraron un total de 20 probetas, distribuidas en cuatro grupos de mezcla correspondientes a diferentes concentraciones volumétricas de Resina con refuerzo de PVC blando particulado: 100%-0%, 80%-20%, 60%-40% y 40%-60% correspondientes. Para cada concentración se fabricaron cinco probetas, lo que permitió garantizar la repetibilidad del ensayo y obtener un promedio representativo de los resultados mecánicos para cada concentración.

Los ensayos fueron llevados a cabo en la maquina universal de ensayos Shimadzu UH – 50A ubicada en los laboratorios de la Facultad Tecnológica de la universidad. Este equipo cuenta con la debida calibración y certificación expedida por la

Organización Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), lo que asegura la confiabilidad y trazabilidad de los datos obtenidos.
Las pruebas se realizando de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ISO 527-2, que regula los ensayos de tracción para materiales poliméricos compuestos. Se utilizaron probetas tipo A1, fabricadas bajo las condiciones normalizadas de dicha norma. Estas probetas fueron colocadas cuidadosamente entre las mordazas de la máquina, prestando atención a no aplicar una presión excesiva que pudiera generar fracturas prematuras. Asimismo, se garantizó una correcta alineación axial, para asegurar que el esfuerzo de tracción se aplicara de manera uniforme a lo largo del eje longitudinal de cada probeta.

En el desarrollo del ensayo, se utilizó una velocidad de avance de 5 mm/min, según lo establecido por la norma ISO 527-2. Esta velocidad permitió un registro detallado de los parámetros de interés como el módulo elástico, la resistencia máxima a la tracción, y la elongación hasta la rotura, lo que facilito la comparación entre los distintos porcentajes de refuerzo evaluados.

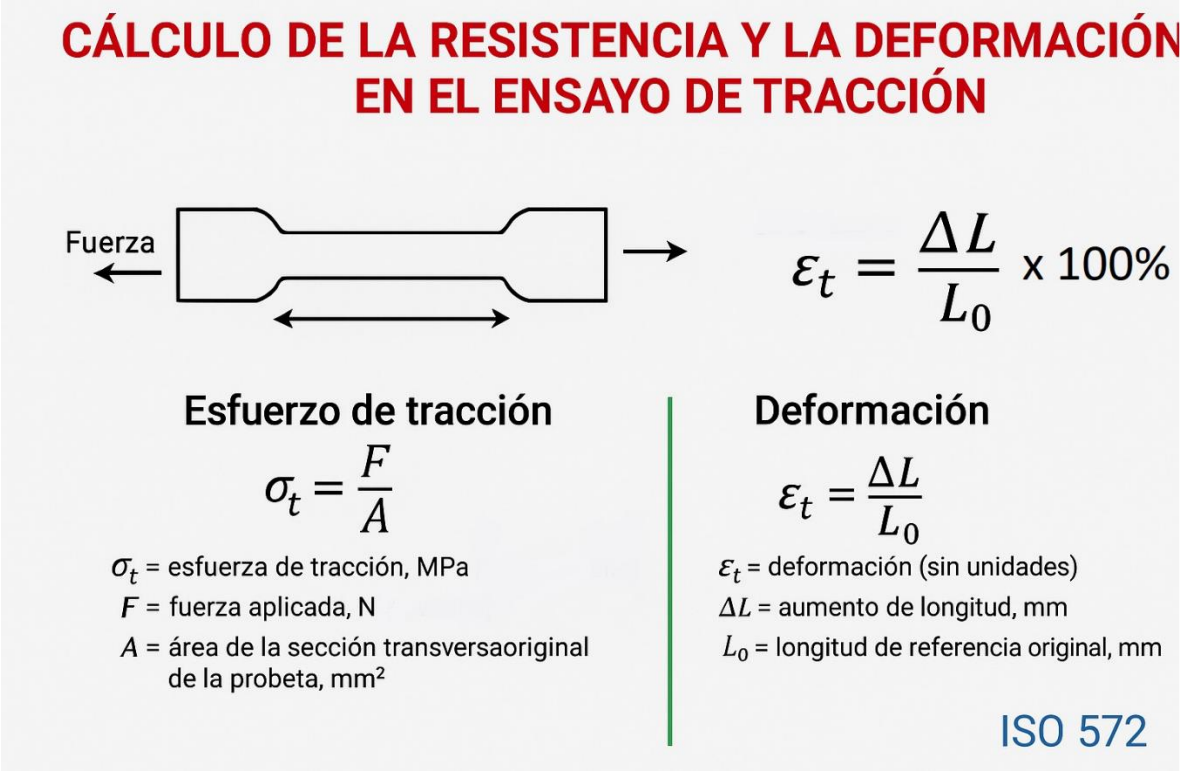
Durante el proceso de ensayo se registraron las curvas Carga vs Deformación, a partir de la cual se calcularon las curvas esfuerzo vs deformación por tracción (MPa vs %) mediante la aplicación de las fórmulas indicadas en la norma ISO 527-2.

Figura 30. Maquina universal de ensayos Shimadzu UH – 50A.



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 31. Formulas utilizadas para el análisis de los ensayos a tracción.



Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1.7.1 Resultados de probetas sometidas a tracción 100% Resina – 0% PVC blando particulado.

Para establecer un punto de referencia en el análisis del comportamiento mecánico del material compuesto, se realizaron ensayos de tracción sobre probetas elaboradas únicamente con resina epoxi, es decir, sin la incorporación del material particulado de PVC blando como refuerzo (0% de PVC). Se realizaron 5 probetas bajo la norma ISO 572-2; sin embargo, solo cuatro de ellas fueron evaluadas, ya que una fue utilizada como muestra de ajuste durante la calibración inicial de la maquina universal de ensayos.

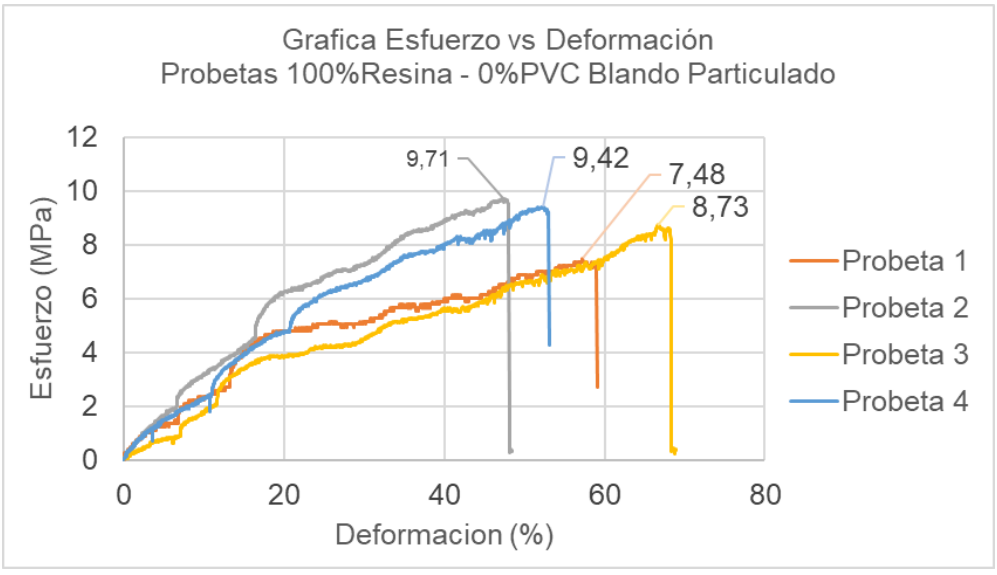
Los resultados obtenidos en estas pruebas se presentan a continuación de forma gráfica. Esta información permite evaluar las propiedades mecánicas intrínsecas de la matriz polimérica, y sirve como base comparativa para analizar el efecto que tiene la adición progresiva del refuerzo sobre el desempeño del material en términos de esfuerzo, deformación.

Figura 32. Probetas Falladas en prueba de tracción, muestra (100%Resina / 0%PVC)



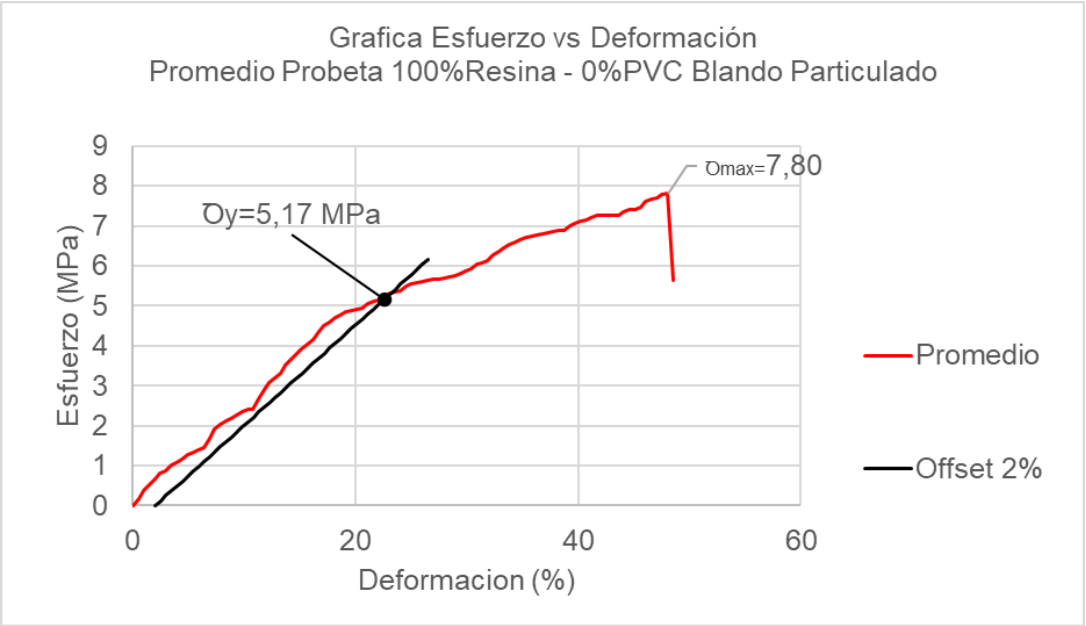
Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 33. Resultados prueba de tracción, muestra (100%Resina / 0%PVC)



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 34. Resultado promedio pruebas de tracción, muestra (100%Resina / 0%PVC)



Fuente (Elaboración propia, 2025).

La figura 33 muestra las curvas esfuerzo–deformaciones individuales obtenidas para las cuatro probetas evaluadas. En general, se evidencia un comportamiento progresivamente ascendente del esfuerzo con respecto a la deformación, hasta alcanzar valores máximos entre 7.48 y 9.71MPa y una deformación que supero el 50%, lo que indica una alta capacidad a la elongación y refleja una respuesta mecánica relativamente consistente entre las muestras, con ligeras variaciones atribuidas a las posibles imperfecciones en el moldeado.

Con base a los datos obtenidos de estas cuatro probetas, se calculó la curva promedio esfuerzo – deformación, la cual se presenta en la figura 33. A partir de esta curva, se determinaron parámetros mecánicos clave:

- Esfuerzo máximo promedio = 7.80MPa
- Esfuerzo de fluencia (offset 2%) = 5.17MPa

El esfuerzo de fluencia se calculó aplicando el método de offset del 2%, que consiste en trazar una línea paralela al tramo elástico inicial de la curva, desplazada horizontalmente en un 2% de la deformación. Este método es adecuado para

materiales poliméricos que no presentan un punto de fluencia claramente definido, como es el caso de la resina epoxi utilizada.

4.1.7.2 Resultados de probetas sometidas a tracción 80% Resina – 20% PVC blando particulado.

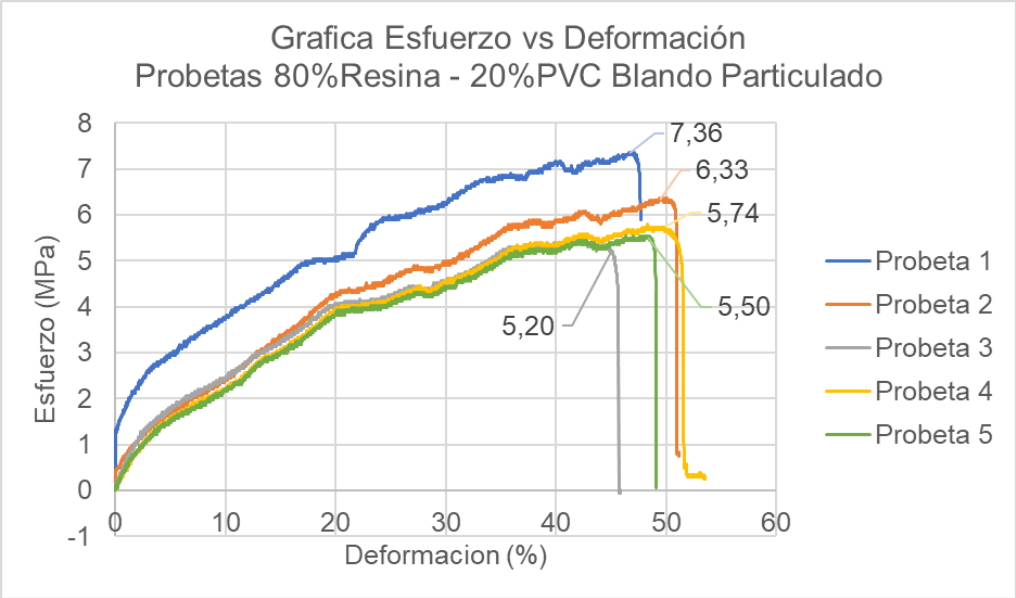
Para esta fase del ensayo se evaluaron 5 probetas con un 80% de resina epoxi y un 20% de PVC blando particulado como refuerzo. La figura 32 presenta las curvas esfuerzo-deformación individuales obtenidas para cada una de las cinco probetas sometidas a tracción.

Figura 35. Probetas falladas en prueba de tracción, muestra (80%Resina / 20%PVC).



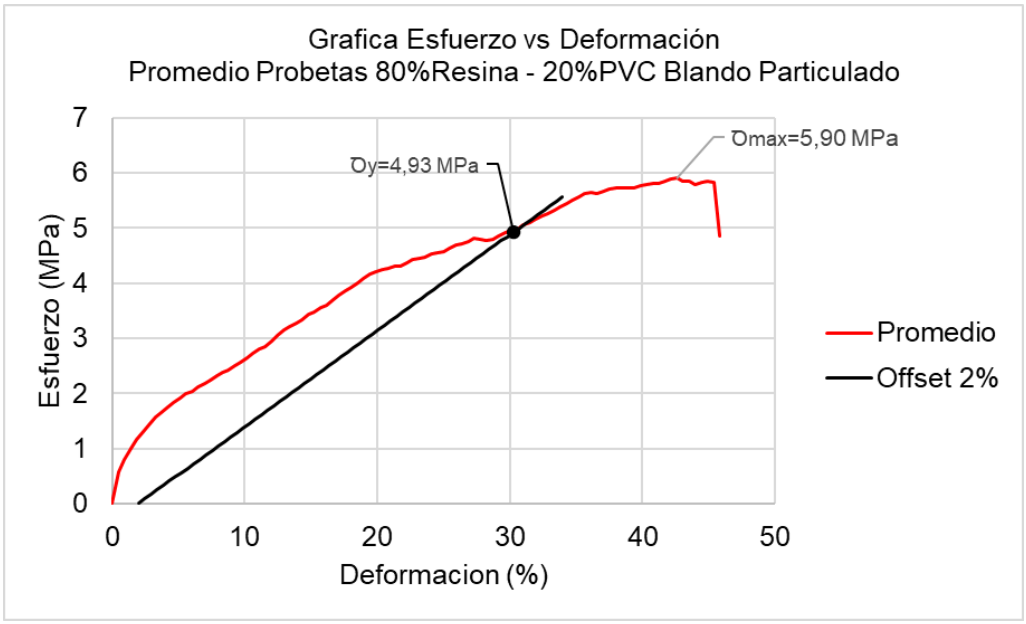
Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 36. Resultados prueba de tracción, muestra (80%Resina / 20%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 37. Resultado promedio pruebas de tracción, muestra (80%Resina / 20%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Se observo una disminución general en el esfuerzo máximo alcanzado respecto a las muestras sin refuerzo, con valores comprendidos entre 5.20MPa y 7.36MPa, así como una ligera reducción en la deformación máxima, manteniendo se no obstante en un comportamiento dúctil generalizado.

A partir de los datos de estas cinco probetas, se construyó una curva promedio esfuerzo-deformación, representada en la figura 33. De esta curva se determinaron dos parámetros clave:

- Esfuerzo máximo promedio = 5.90MPa
- Esfuerzo de fluencia (offset 2%) = 4.93MPa

El método de offset del 2%, recomendado por la norma ISO 527-2, fue nuevamente aplicado para estimar el esfuerzo de fluencia, dada la ausencia de un punto de fluencia definido en la curva.

4.1.7.3 Resultados de probetas sometidas a tracción 60% Resina – 40% PVC blando particulado.

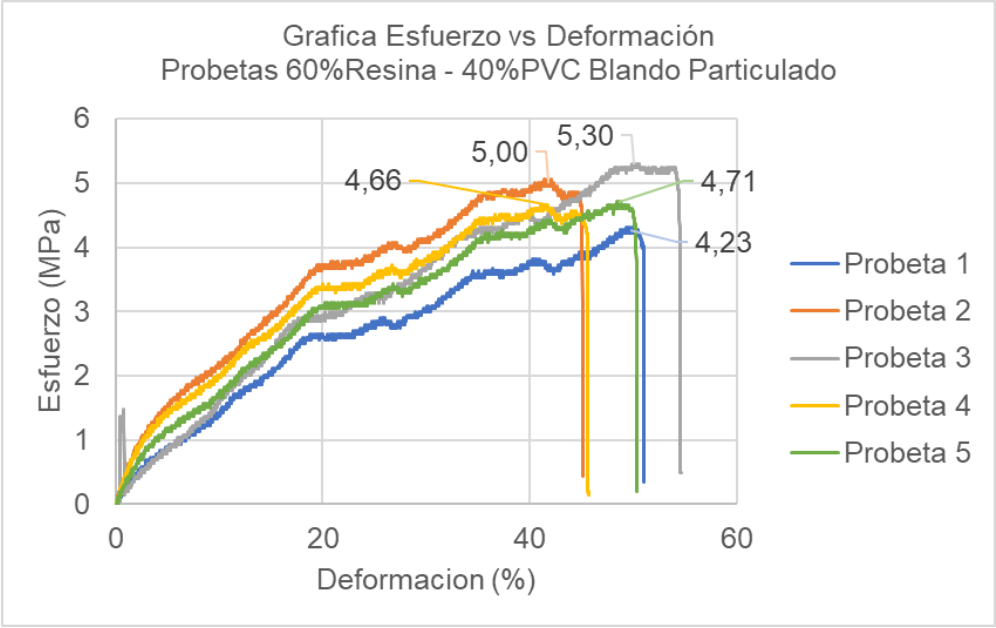
Para esta composición se ensayaron cinco probetas elaboradas con un 60% de resina epoxi y un 40% de PVC blando particulado. La figura 35 muestra las curvas esfuerzo-deformación individuales de cada una de las probetas sometidas al ensayo de tracción.

Figura 38. Probetas Falladas en prueba de tracción, muestra (60%Resina / 40%PVC).



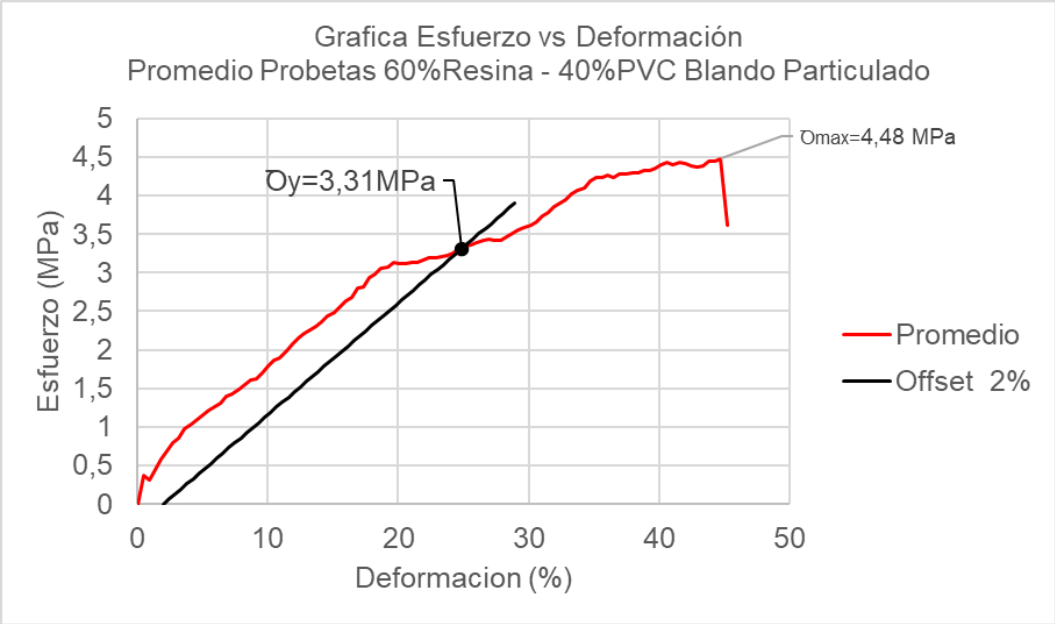
Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 39. Resultados prueba de tracción muestra (60%Resina / 40%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 40. Resultado promedio pruebas de tracción, muestra (60%Resina / 40%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

En comparación con las concentraciones anteriores, se observa una disminución progresiva tanto del esfuerzo máximo como en el esfuerzo de fluencia. Los valores máximos alcanzados oscilan entre 4.23MPa y 5.30MPa, lo cual indica que el aumento en la concentración de PVC blando afecta negativamente la capacidad de resistencia del material.

A partir de los datos obtenidos se generó una curva promedio, representada en la figura 36, con la que se determinaron los siguientes parámetros mecánicos:

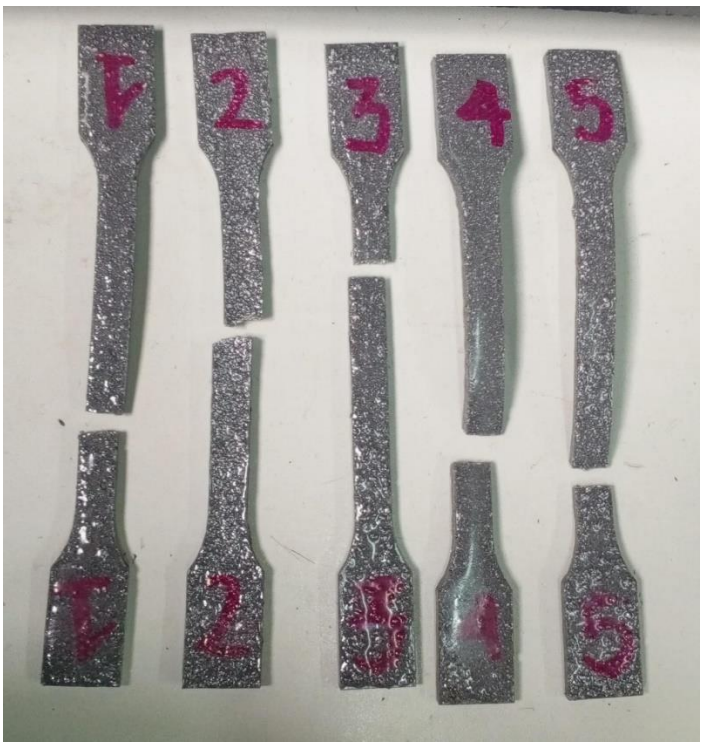
- Esfuerzo máximo promedio = 4.48MPa
- Esfuerzo de fluencia = 3.31 MPa

Utilizando el método de offset del 2%, conforme a lo recomendado por la norma ISO 527-2 para materiales poliméricos sin punto de fluencia definido. La tendencia descendente observada en los resultados conforme que la adición de mayores porcentajes de PVC blando particulado tiende a debilitar mecánicamente la matriz epoxi.

4.1.7.4 Resultados de probetas sometidas a tracción 40% Resina – 60% PVC blando particulado.

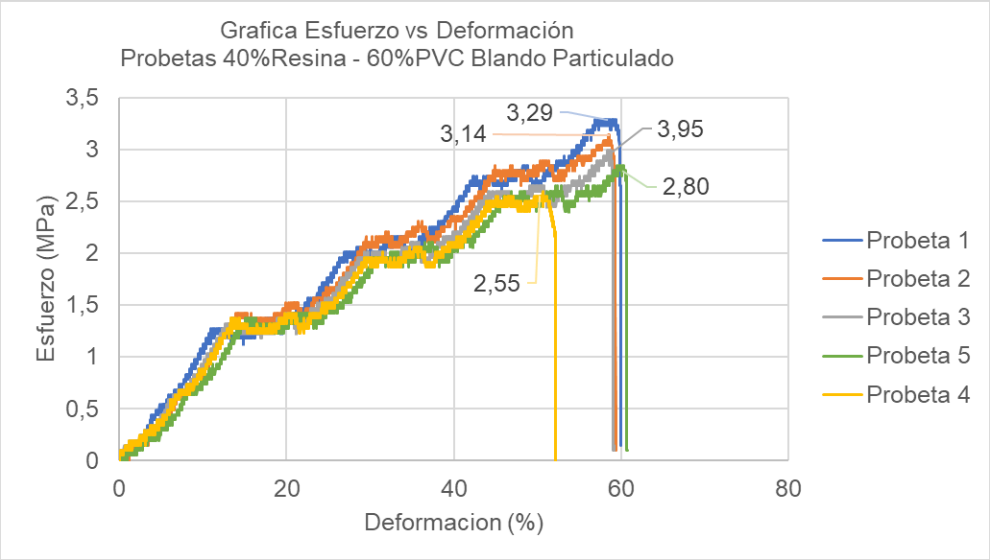
En esta última configuración se evaluaron cinco probetas compuestas por un 40% de resina epoxi y un 60% de PVC blando particulado. Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas se muestran en la figura 38. Se evidencia una tendencia clara de disminución en los valores de esfuerzo respecto a las concentraciones anteriores con menor cantidad de refuerzo.

Figura 41. Probetas Falladas en prueba de tracción, muestra (40%Resina / 60%PVC).



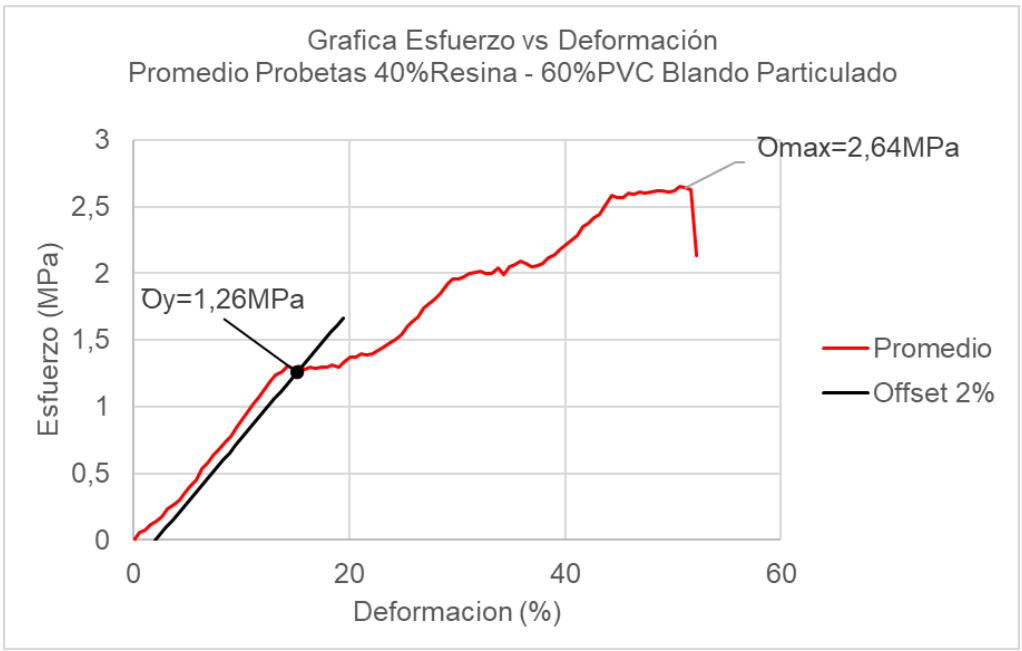
Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 42. Resultados prueba de tracción, muestra (40%Resina / 60%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 43. Resultado promedio pruebas de tracción muestra (40%Resina / 60%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Los esfuerzos máximos obtenidos en las probetas oscilaron entre 2.55MPa y 3.95MPa, lo cual representa una reducción significativa frente a las muestras anteriores. A pesar de la perdida de resistencia, el material mantuvo su capacidad apreciable de deformación antes de fallar, lo cual indica que el PVC blando particulado conserva su influencia en la ductilidad del compuesto.

A partir del promedio de las cinco curvas experimentales, se obtuvo una curva promedio representativa del comportamiento de esta mezcla, como se presenta en la figura 39. Los valores obtenidos fueron:

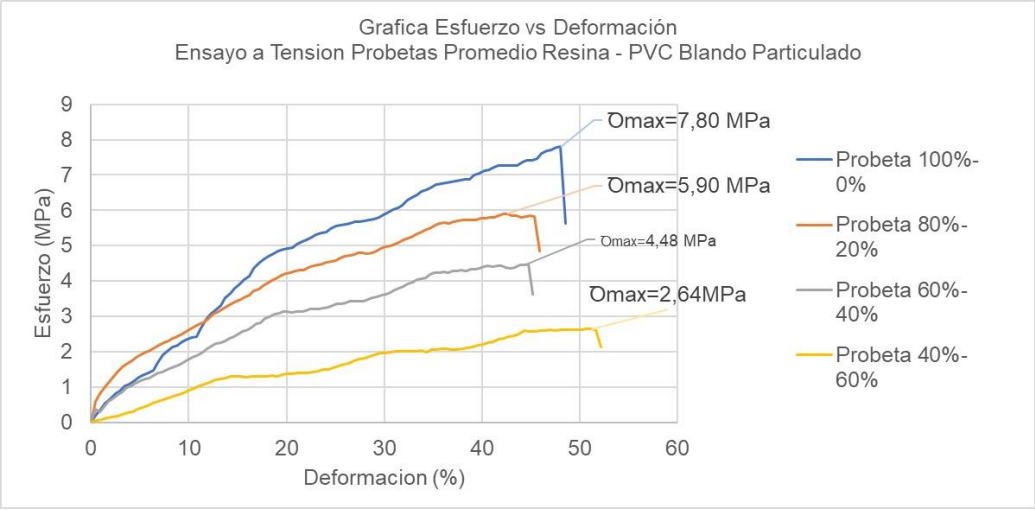
- Esfuerzo máximo = 2.64MPa
- Esfuerzo de fluencia = 1.26 MPa

La disminución de los parámetros mecánicos observada en esta formulación confirma que altas concentraciones de PVC blando particulado afectan negativamente la resistencia del material, aunque permite mantener un cierto grado de ductilidad.

4.1.7.5 Resultado promedio de probetas sometidas a tracción Resina –PVC blando particulado.

La Figura 48 presenta el comportamiento promedio de las probetas sometidas a tracción para las cuatro formulaciones evaluadas. Esta comparación permite observar de manera global el efecto del contenido de PVC blando particulado sobre la resistencia máxima a tracción del material compuesto.

Figura 44. Resultado promedio esfuerzo-deformación pruebas de tracción.



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Los resultados muestran que la matriz pura (100 % resina) presentó el mayor esfuerzo máximo, alcanzando un valor de 7.80 MPa. A medida que se incrementó el porcentaje de refuerzo, se observó una disminución progresiva de la resistencia a tracción, registrando los siguientes valores:

- 80 % resina – 20 % PVC= 5.90 MPa
- 60 % resina – 40 % PVC= 4.48 MPa
- 40 % resina – 60 % PVC= 2.64 MPa

Esta tendencia indica que el incremento en la proporción de PVC blando particulado reduce la resistencia del material compuesto a tracción, debido a la pérdida de homogeneidad y continuidad de la matriz epóxica, lo que genera zonas de concentración de esfuerzo que favorecen la falla prematura bajo cargas axiales.

4.1.8 Realización ensayos a flexión – ISO 178

Para evaluar el comportamiento mecánico del material compuesto elaborado con resina epoxi y refuerzo de PVC blando particulado, se realizaron ensayos de flexión conforme a los lineamientos establecidos en la norma ISO 178, la cual define el procedimiento para determinar las propiedades en flexión de materiales plásticos.

Los ensayos fueron realizados en la maquina universal de ensayos ubicada en la universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad tecnológica. Esta máquina cuenta con celda de carga adecuada para evaluar materiales con bajo rango de resistencia, como es el caso de los polímeros utilizados en este estudio. La velocidad de avance establecida para los ensayos fue de 5 mm/min, siguiendo las recomendaciones de la norma.

Para esta etapa se elaboraron un total de 20 probetas, divididas en cuatro paquetes de cinco probetas cada uno, correspondientes a las siguientes formulaciones en volumen:

- 100% resina epoxi – 0% PVC blando particulado
- 80% resina epoxi – 40% PVC blando particulado
- 60% resina epoxi – 40% PVC blando particulado
- 40% resina epoxi –60% PVC blando particulado

Dado que inicialmente se intentó fabricar probetas siguiendo las dimensiones normalizadas por la ISO 178 (L = 80mm, b = 10mm, e = 4mm), se identificó que la maquina destinada para materiales poliméricos en el laboratorio contaba con un punzón de celda de carga mínima de 10KN, lo que generaba dificultades para

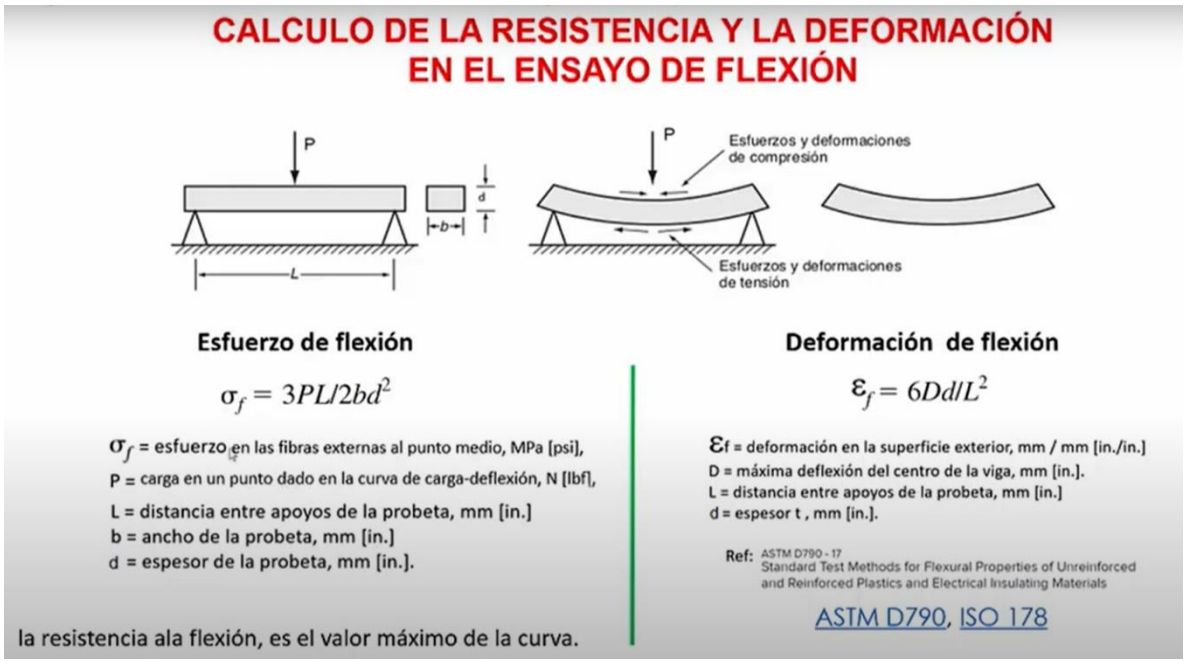
obtener datos precisos. Por tal motivo y siguiendo las recomendaciones del docente, se optó por escalar las dimensiones de las probetas a:

- L = 200mm, b = 25mm, e = 6mm

Se fijo una distancia entre apoyos de 175mm, para garantizar una mejor lectura en la maquina universal de ensayos.

Cada una de las probetas fue colocada cuidadosamente sobre los puntos de apoyo y alineada en el centro del punzón, asegurando condiciones uniformes para la aplicación de la carga. Durante el proceso de ensayo se registraron las curvas Carga vs Deformación, a partir de la cual se calcularon las curvas esfuerzo vs deformación por flexión (MPa vs %) mediante la aplicación de las fórmulas indicadas en la norma ISO 178.

Figura 45. Formulas utilizadas para el análisis de los ensayos a flexión.



Fuente (Elaboración propia, 2025).

4.1.8.1 Resultados de probetas sometidas a flexión 100% Resina – 0% PVC blando particulado.

Para esta primera muestra sometida a flexión, se ensayaron cuatro probetas compuestas exclusivamente de resina epoxi, sin refuerzo de PVC blando particulado. Se realizaron 5 probetas, sin embargo, solo cuatro de ellas fueron

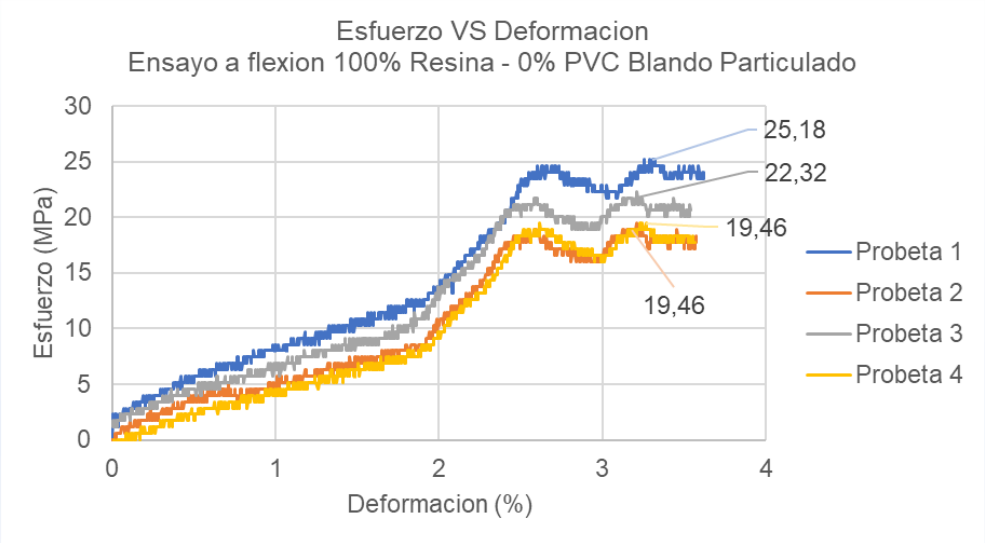
evaluadas, ya que una fue utilizada como muestra de ajuste durante la calibración inicial de la maquina universal de ensayos. Las pruebas se realizaron en la maquina universal de ensayos Shimadzu UH – 50A, siguiendo las directrices de la norma ISO 178 con una velocidad de 5 mm/min y una distancia entre apoyos de 175mm.

Figura 46. Probetas Falladas en prueba de flexión, muestra (100%Resina / 0%PVC).



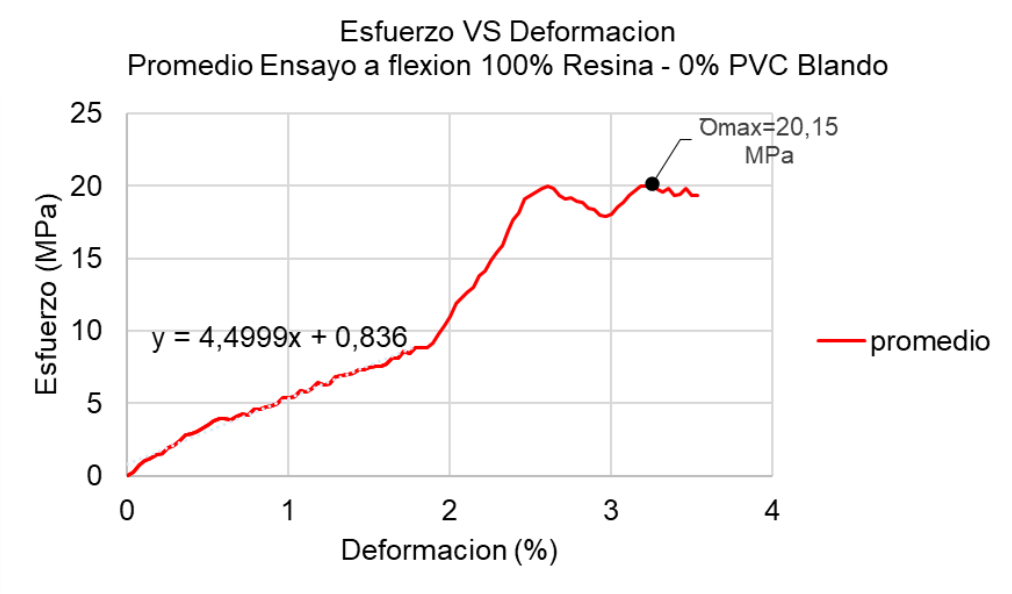
Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 47. Resultados prueba deflexión, muestra (100%Resina / 0%PVC)



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 48. Resultado promedio pruebas de flexión, muestra (100%Resina / 0%PVC)



Fuente (Elaboración propia, 2025).

En la figura 47 se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para cada una de las probetas ensayadas. Los resultados muestran una respuesta mecánica uniforme entre las muestras, con esfuerzos máximos que oscilan entre 19.46MPa y 25.18MPa.

Con el fin de obtener un valor representativo del comportamiento mecánico, se generó una curva promedio (figura 48), a partir de la cual se calcularon dos parámetros clave:

- Esfuerzo máximo = 20.15MPa
- Módulo de elasticidad = 4.50MPa. Este valor se determinó aplicando una línea de tendencia lineal a la región inicial de la curva esfuerzo-deformación, hasta una deformación del 1.75% aproximadamente, siendo este el valor de la pendiente obtenida.

Esta formulación servirá como referencia base para comparar los efectos de la incorporación de materia particulado en concentraciones mayores.

4.1.8.2 Resultados de probetas sometidas a flexión 80% Resina – 20% PVC blando particulado.

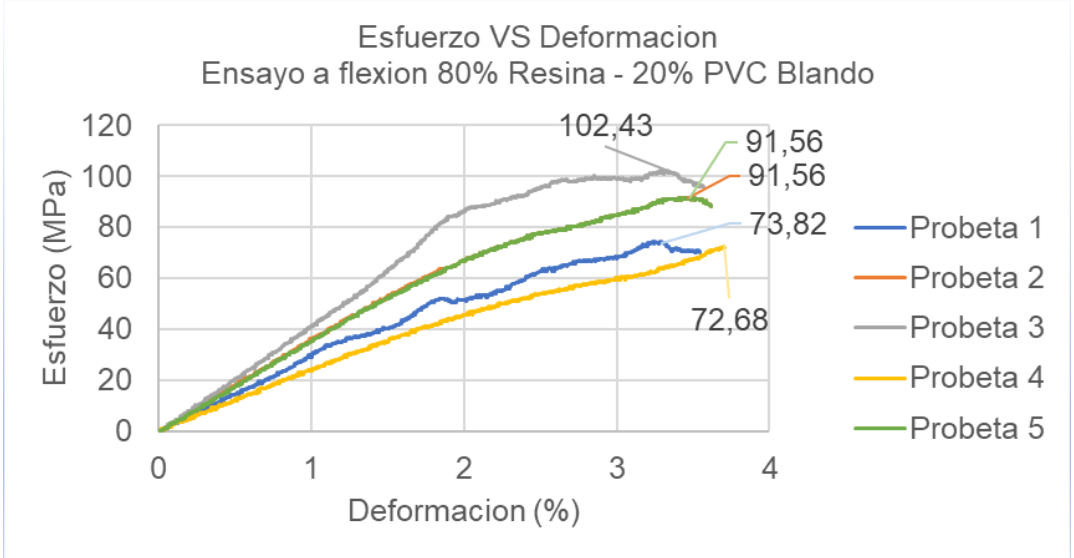
Para esta Formulación, se evaluaron cinco probetas compuestas por un 80% de resina epoxi y un 20% de PVC blando particulado como refuerzo. Las pruebas se realizaron en la maquina universal de ensayos con una velocidad de avance de 5 mm/min y distancia entre puntos de apoyo de 175mm.

Figura 49. Probetas Falladas en prueba de flexión, muestra (80%Resina / 20%PVC).



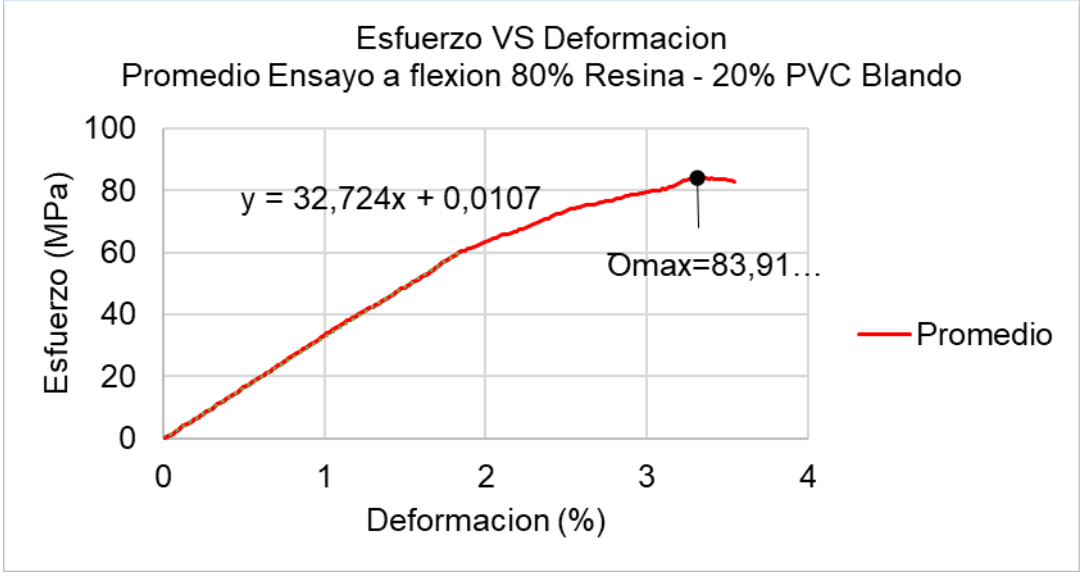
Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 50. Resultados prueba deflexión, muestra (80%Resina / 20%PVC).



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 51. Resultado promedio pruebas de flexión, muestra (80%Resina / 20%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

En la figura 50 se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para las probetas. Se observa un notable aumento en los valores de resistencia a flexión en comparación con la formulación sin refuerzo. Los resultados máximos alcanzados oscilaron entre 72.68MPa y 102.43Mpa, evidenciando una mejora significativa del desempeño mecánico en esta concentración de refuerzo. Cabe aclarar que una de las cinco probetas falló durante el ensayo.

A partir de los datos registrados se generó una curva promedio, sobre la cual se aplicó una línea de tendencia en el tramo elástico inicial, hasta una deformación del 1.85% aproximadamente, obteniendo los siguientes parámetros clave:

- Esfuerzo máximo = 83.91MPa
- Módulo de elasticidad = 32.72MPa.

4.1.8.3 Resultados de probetas sometidas a flexión 60% Resina – 40% PVC blando particulado.

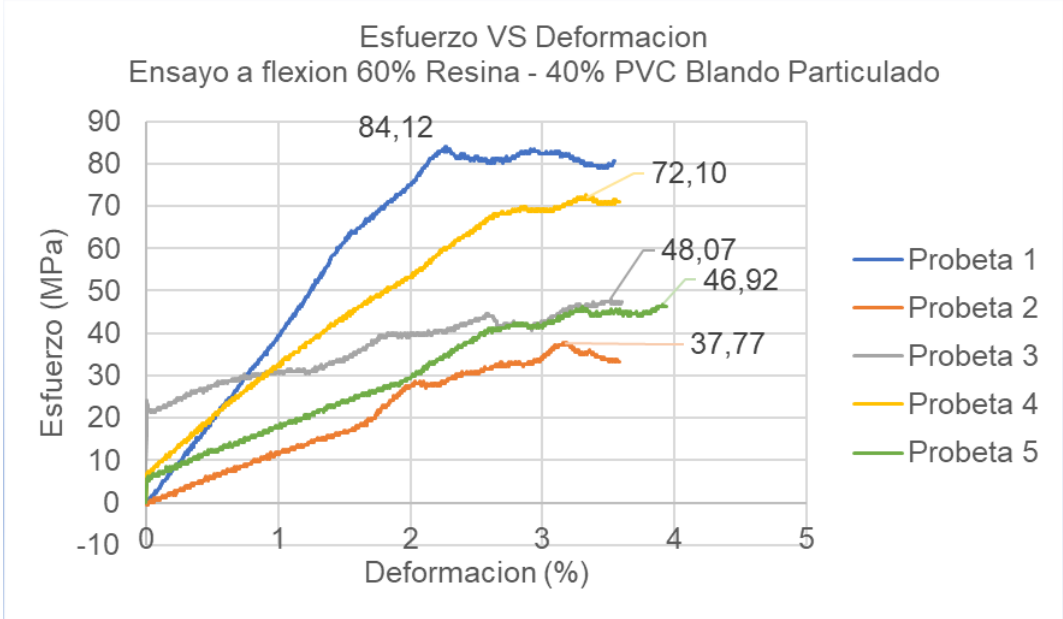
En esta etapa del estudio se evaluaron cinco probetas fabricadas con una mezcla de 60% resina epoxi y 40% de PVC blando particulado. Los ensayos fueron realizados a una velocidad de avance de 5 mm/min en la maquina universal de ensayos.

Figura 52. Probetas Falladas en prueba de flexión, muestra (60%Resina / 40%PVC).



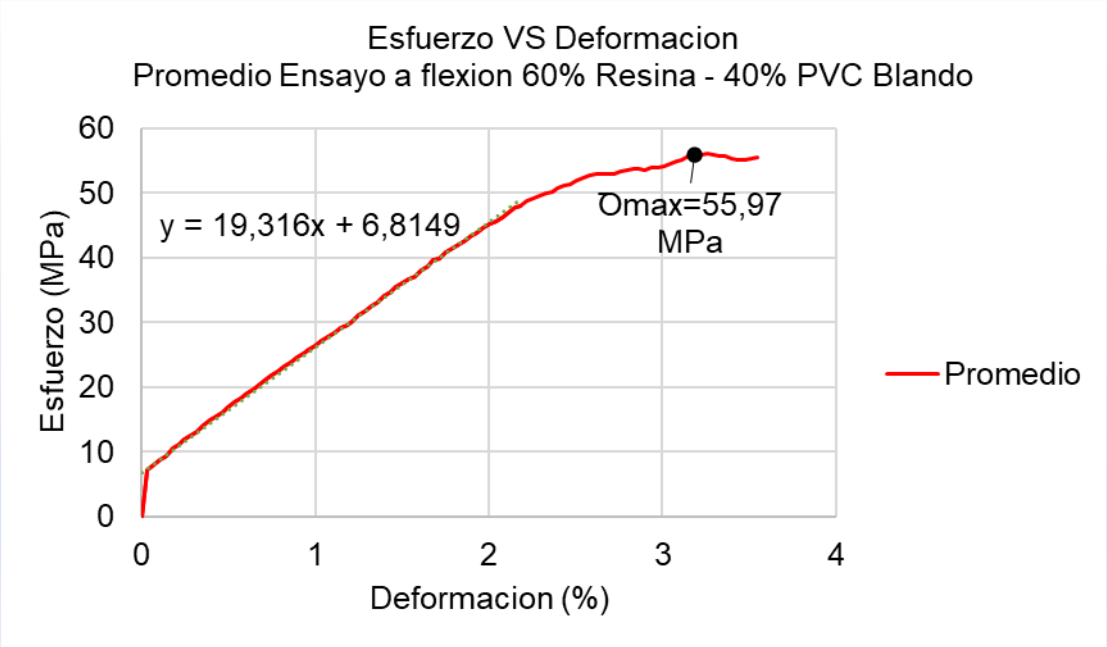
Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 53. Resultados prueba deflexión, muestra (60%Resina / 40%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 54. Resultado promedio pruebas de flexión, muestra (60%Resina / 40%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

En la figura 53 se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para cada una de las cinco probetas. A medida que se incrementa la proporción de material PVC particulado, se observa una disminución generalizada del esfuerzo máximo en comparación con concentraciones menores de refuerzo. Los valores de refuerzo máximos registrados variaron entre 37.77MPa y 84.12MPa, evidenciando una mayor dispersión entre las muestras, posiblemente atribuible a diferencias en la distribución del refuerzo o micro defectos generados durante la fabricación.

Con base en estas curvas, se construyó una curva promedio sobre la cual se aplicó una línea de tendencia en el tramo elástico, desde el origen hasta una deformación aproximada a 2.18%, obteniendo de este modo los siguientes valores clave:

- Esfuerzo máximo = 83.91MPa
- Módulo de elasticidad = 32.72Mpa.

4.1.8.4 Resultado de probetas sometidas a flexión 40% Resina – 60% PVC blando particulado.

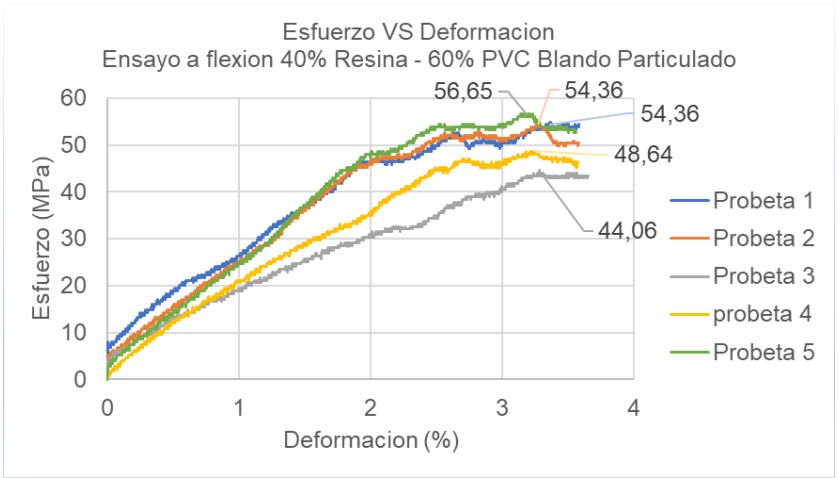
En la última serie de ensayos se evaluaron cinco probetas compuestas por una concentración de 40% resina epoxi y 60% de PVC blando particulado. Las pruebas fueron realizadas bajo las mismas condiciones controladas de las formulaciones anteriores, utilizando la maquina universal de ensayos a una velocidad de avance de 5 mm/min y una distancia entre apoyos de 175mm.

Figura 55. Probetas Falladas en prueba de flexión, muestra (40%Resina / 60%PVC).



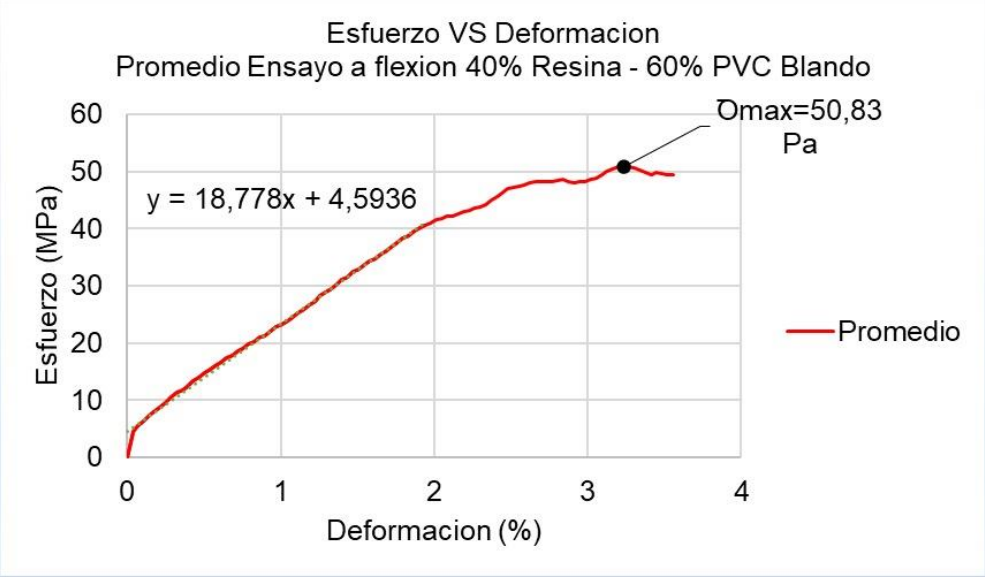
Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 56. Resultados prueba deflexión, muestra (40%Resina / 60%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Figura 57. Resultado promedio pruebas de flexión, muestra (40%Resina / 60%PVC).



Fuente (Elaboración propia, 2025).

La figura 56 muestra las curvas esfuerzo-deformación para cada una de las probetas. Los esfuerzos máximos alcanzados oscilaron entre 44.06MPa y 56.65MPa, valores inferiores a los obtenidos con concentraciones menores de PVC particulado. Esta disminución en la resistencia puede atribuirse a la perdida de continuidad de la matriz epoxica, provocada por el alto contenido de refuerzo particulado, lo que afecta la transferencia de cargas.

Se genero una curva promedio de comportamiento a partir de las cinco muestras. En la región inicial de la curva promedio, hasta una deformación aproximada del 1.90%, se aplicó una línea de tendencia lineal con el fin de determinar el módulo de elasticidad en flexión. De esta manera obtendríamos los siguientes valores:

- Esfuerzo máximo = 50.83MPa
- Módulo de elasticidad = 18.78MPa

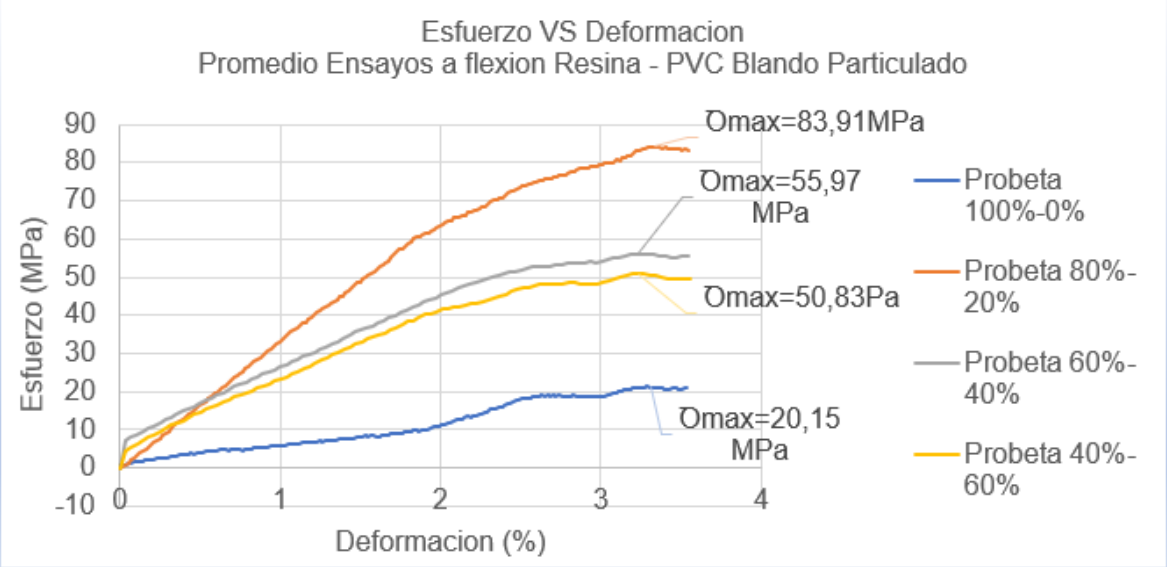
Estos resultados revelan que, aunque el material aún conserva una capacidad mecánica aceptable, el incremento en el contenido de PVC blando provoca una disminución tanto en la rigidez como en la resistencia máxima. Esto indica que existe un límite óptimo para la inclusión de refuerzo particulado, más allá del cual las propiedades estructurales comienzan a degradarse significativamente.

4.1.8.5 Resultado promedio de probetas sometidas a flexión Resina –PVC blando particulado.

Con el objetivo de comparar el comportamiento estructural global de cada formulación sometida a flexión, se construyó una gráfica que agrupa las curvas promedio esfuerzo vs. deformación correspondientes a las siguientes composiciones:

- 100 % Resina – 0 % PVC Blando
- 80 % Resina – 20 % PVC Blando
- 60 % Resina – 40 % PVC Blando
- 40 % Resina – 60 % PVC Blando

Figura 58. Resultado promedio esfuerzo-deformación pruebas de flexión.



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Los resultados reflejan con claridad el efecto del contenido de refuerzo particulado sobre la resistencia del material. La formulación con 80 % resina y 20 % PVC alcanzó el esfuerzo máximo más alto (83.91 MPa), indicando que esta combinación ofrece el mejor desempeño mecánico en flexión. A partir de este punto, se observó una disminución progresiva:

- 60 % resina – 40 % PVC= 55.97 MPa
- 40 % resina – 60 % PVC= 50.83 MPa
- 100 % resina – 0 % PVC= 20.15 MPa

Esta tendencia confirma que la adición de un 20 % de PVC blando particulado representa un punto óptimo de refuerzo, a partir del cual el exceso de material particulado empieza a comprometer la rigidez y la continuidad de la matriz epóxica, afectando negativamente su capacidad de carga.

4.2 Evaluación de los resultados de las propiedades mecánicas del material compuesto en búsqueda de la aplicación del mismo.

Si bien la resina epóxico posee gran resistencia térmica, el PVC no cumple tales requerimientos, sin embargo, estos materiales comparten, por ejemplo, propiedades aislantes de electricidad y anticorrosivas que se pueden conservar en el producto final; es por esta razón que se hace un análisis de tales propiedades con el fin de mitigar las debilidades de la matriz con respecto al refuerzo y viceversa, para así lograr compensar dichas limitaciones.

Con base a los datos obtenidos y analizados en los ensayos de tensión y flexión al material compuesto de resina epóxico (matriz) con refuerzo de PVC blando particulado, podemos suponer algunas aplicaciones haciendo una comparativa con otros materiales como se plantea en las siguientes tablas.

Tabla 8. Resistencia a la tracción y flexión en materiales de construcción más comunes.

Resistencia a la tracción en materiales de construcción más comunes.	
Material	Resistencia [Mpa]
Concreto	2,9 a 5,9
Acero	549,2 a 706
Ladrillo	1,5 a 9,8
Madera Blanda	74,5 a 78,4
Madera Dura	96,1 a 101,2
Guadua	176,5 a 343,2

Resistencia a la flexion en materiales de construccion mas comunes.	
Material	Resistencia [Mpa]
Concreto	0,4 a 5,4

Acero	245 a 441
Ladrillo	1.5
Madera Blanda	27,5 a 32,4
Madera Dura	49 a 54,9
Guadua	36,3 a 54,9

Fuente (IMZA Arquitectura, s.f.)

Evaluación a esfuerzo de tensión

Podemos observar que el material se vuelve más frágil conforme aumenta la concentración de PVC blando en cuanto a resistencia axial se trata, como se puede evidenciar en la figura 44, en la cual se aprecian las curvas promedio para cada concentración (ver figurar 44).

Se logra alcanzar un máximo de 7,8 MPa de resistencia a la tensión, con una fractura dúctil y un porcentaje de elongación del 50% aproximadamente, siendo las probetas con una proporción de 100% de resina epoxi sin adición de PVC blando, en las que se logra obtener el máximo de resistencia nombrado. Materiales como el concreto presentan valores similares en resistencia axial, no obstante, el material compuesto en cuestión es dúctil, permitiendo elongarse considerablemente.

Basado en los resultados se descarta una aplicación estructural del material, sus aplicaciones estarían ligadas mayormente al aislamiento de humedad, electricidad y vibraciones como un recubrimiento o método de unión de piezas, donde no se produzcan cargas considerables y variables; además de proteger de la corrosión del ambiente.

Posibles aplicaciones podrían ser mobiliario urbano y doméstico, restauraciones, prototipado, empaques, topes, apoyos y conexiones de tubos, es importante recalcar que debido a las propiedades termoplásticas del PVC blando no es apropiado para aplicaciones donde haya cambios amplios y bruscos de temperatura.

Evaluación a flexión

En cuanto a la resistencia a la flexión, el material compuesto se comporta de una manera diferente que cuando se somete a un esfuerzo de tensión, no sigue la misma tendencia y se presenta una variación inesperada según su porcentaje de refuerzo de PVC blando, específicamente en concentración de 20% y 80% de resina epoxi, como se evidencia en la figura 58.

Se puede ver que la concentración anteriormente nombrada desarrollo un esfuerzo máximo a la flexión de 83,9 MPa, un valor considerable en algunas aplicaciones estructurales, ya que se desarrolla un esfuerzo mayor a la que soporta una madera (de 28 a 56 Megapascales) ampliamente utilizada a nivel estructural.

Ya que el material ofrece mejor rendimiento a flexión, se podrían suponer aplicaciones con cargas moderadas donde no se experimenten variaciones rápidas de temperatura, como por ejemplo mesas de trabajo para talleres, apoyos para tubería, uniones, repisas, estanterías, mobiliario urbano, domestico y escolar, entre otras aplicaciones que también requieran un aislamiento eléctrico, resistencia a la humedad, fricción y corrosión.

Finalmente se quiere incentivar la exploración y completa caracterización mecánica de este material compuesto, en aras de aplicaciones más específicas que estén respaldadas de un análisis más completo.

5 CONCLUSIONES

- Se logra caracterizar mecánicamente el material compuesto de resina epoxi y PVC blando (en las concentraciones planteadas) por medio de los lineamientos emitidos en las normas ISO 527-1 e ISO 527-2 para ensayos de tracción en polímeros y la norma ISO 178 para ensayos de flexión en plásticos.

- La preparación de las materias primas, aunque con un cierto grado de complejidad, fue satisfactorio pues en el proceso se identificaron factores como la temperatura y humedad del entorno los cuales sino se controlaban en cierta medida no permitirían la correcta preparación de las materias. Además, se propone una medición volumétrica de los compuestos como base para la matriz epódica y las concentraciones de PVC blando (20%, 40% y 60%).

- En cuanto a la fabricación de las probetas según las normas ISO anteriormente mencionadas se opta por adquirir moldes en silicona ya que después de indagar este material no se adhiere con la resina y ofrece una estabilidad dimensional óptima para el proceso de moldeo por colada. Para corroborar las dimensiones de los moldes de silicona se hace una medición con pie de rey en los cuales se obtienen las dimensiones aptas para las probetas a ensayar.

  Respecto a los resultados obtenidos se puede analizar los siguientes resultados

- **Ensayo a Tracción:** El aumento en el contenido de PVC blando particulado genero una reducción progresiva tanto en el esfuerzo máximo como en el esfuerzo de fluencia de las probetas. La formulación de 100% resina presento un esfuerzo de 7.80MPa y un esfuerzo de fluencia (offset 2%) de 5.17MPa, mientras que en la formulación de 60% PVC blando particulado, el esfuerzo máximo fue de 2.64 MPa y la fluencia de 1.26MPa.

  Esta disminución de la resistencia puede explicarse por la pérdida de cohesión entre la matriz epódica y las partículas de refuerzo, generando zonas débiles que facilitan la fractura bajo carga axial. Sin embargo, se observó que incluso con alto contenido de PVC, el material mantiene una capacidad moderada de deformación, lo que lo hace potencialmente útil para aplicaciones no estructurales donde la flexibilidad sea prioritaria.

- **Ensayo a Flexión:** A diferencia de la tracción, los ensayos a flexión evidenciaron una mejora significativa en la resistencia del material al incorporar 20% de PVC blando particulado, alcanzando un esfuerzo máximo

promedio de 83.91MPa, muy superior a los 20,15MPa registrados en la matriz pura (100% resina). Esto sugiere que una proporción moderada de refuerzo contribuye a una mejor distribución de tensiones en la estructura del material.

El módulo de elasticidad en flexión también aumento drásticamente con el 20% de PVC, alcanzando 32.72MPa, comparado con los 4.50MPa de la resina pura. No obstante, a partir de una concentración del 40% se evidencio una disminución progresiva del módulo de elasticidad y del esfuerzo máximo, reflejando una pérdida de rigidez estructural asociada a la sobrecarga del refuerzo.

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se observa que el material no es recomendable para aplicaciones sometidas a cargas axiales pues su resistencia decrece. No obstante los resultados obtenidos en los ensayos de esfuerzo a flexion mostraron una mejoria conforme se agregaba el PVC blando,siendo la proporcion de 80% epoxi - 20% PVC particulado, la que presento un rendimiento superior comparado con la resina epoxica sin refuerzos.
  Los valores obtenidos de resistencia a flexion permiten plantear aplicaciones como paneles, laminas, carcasas, perfiles y otros elementos donde las cargas sean normales a la superfcie, ademas estos compuestos proporcionaran una proteccion contra la corrosion y la humedad asi como buen aislamiento electrico.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

121 Michelle Rose Rubio. (2022, June 28). *Recycling of PVC - Prospects and Challenges | EcoMENA*. EcoMENA. https://www.ecomena.org/recycling-pvc/

122 *Historia y evolución de los materiales compuestos*. (2021, December 13). Iberiacompositech.com. https://iberiacompositech.com/historia-y-evoluci%C3%B3n-de-los-materiales-compuestos

123 *ENSAYO-DE-TRACCION-POLIMEROS - Introduccin El ensayo de traccin para polmeros consiste en someter probetas normalizadas a una velocidad constante y*. (2022). Coursehero.com. https://www.coursehero.com/file/16549939/ENSAYO-DE-TRACCION-POLIMEROS/#:~:text=Introducci%C3%B3nEl%20ensayo%20de%20tracci%C3%B3n,donde%20se%20han%20presentado%20serias

124 *Ensayo de tracción plásticos ISO 527-1 | ISO 527-2*. (2023). Ensayo de Tracción Plásticos ISO 527-1 | ISO 527-2. https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/ensayo-de-traccion-iso-527-1-2/

125 García, G., & Gallo, M. (n.d.). *Sistema de ensayos para la caracterización mecánica de materiales plásticos según la normativa ISO 527. Autor: Tutor*. Retrieved June 7, 2023, from https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/39729/TFG-I-1432.pdf?sequence=1#:~:text=La%20Norma%20ISO%20527%20especifica

126 *Plastics -Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. (n.d.).* https://cdn.standards.iteh.ai/samples/56046/c5c3ec20cc0741289bf6def861e0a40b/ISO-527-2-2012.pdf

127 *Guida definitiva a ISO 178*. (2023). Instron.com. https://www.instron.com/it-it/testing-solutions/iso-standards/the-definitive-guide-to-iso-178-flexure-testing-for-plastics

128 Mariano. (2015). *Materiales compuestos*. Blogspot.com. https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html

129 Stupenengo, F. (2011.). Materiales y materias primas Materiales compuestos https://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf

130 *ELABORACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO POR UNA MATRIZ DE RESINA POLIÉSTER Y FIBRA NATURAL DE COCO PARA SU CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TENSIÓN Y FLEXIÓN. HERNÁN CAMILO FONSECA BALLESTEROS Proyecto integral de grado para optar el título de INGENIERO MECÁNICO*. (n.d.). Retrieved June 7, 2023, from http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8974/1/4171252-2022-2-IM%20.pdf

131 Soto, R., Sanabio-Alves-Borges, L.-M., Valín-Rivera, J.-L., & Batista, D. (2015). Fabricación de compuesto de matriz epoxi reforzado con fibras largas de henequén orientadas aleatoriamente. *Ingeniería Mecánica*, *18*(2), 122–128. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442015000200007

132 Garcia, P., Perez, E,. (2013). Diseño de un programa guía para la eficiencia energética en el sector industrial de la fundición, 22-23. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1035&context=ing_electrica

133 *La innovación y la eficiencia, claves para reducir el impacto ambiental de la metalurgia | Alsimet*. (2021). Alsimet.es. http://alsimet.es/es/noticias/innovacion-eficiencia-impacto-ambiental-metalurgia

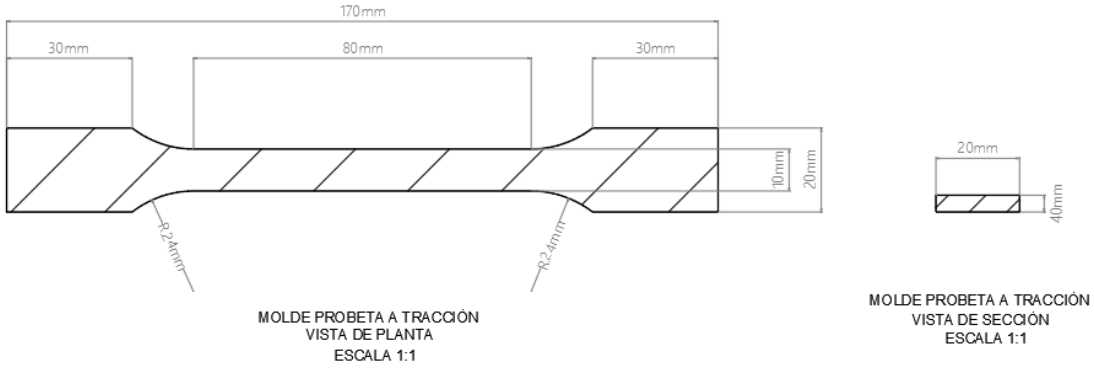
134 ZWICKROELL. *Ensayo de tracción ISO 527-1/2* [en línea]. [s. l.]: ZwickRoell, [s. f.]. [Consulta: 29 de mayo de 2025]. Disponible en: https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/ensayo-de-traccion-iso-527-1-2/

135 CAO, Lauren Y.; SOOD, Apra; TAYLOR, James S. *Hand/Face/Neck Localized Pattern: Sticky Problems—Resins* [en línea]. En: *Dermatologic Clinics*. Volumen 27, número 3, julio de 2009, p. 227-249. [Consulta: 29 de mayo de 2025]. ISSN 0733-8635. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.det.2009.05.012

136IMZA Arquitectura. (s.f.). *Comparativa de resistencia de materiales estructurales*. IMZA Arquitectura. https://www.imzaarquitectura.com/post/comparativa-de-resistencia-de-materiales-estructurales

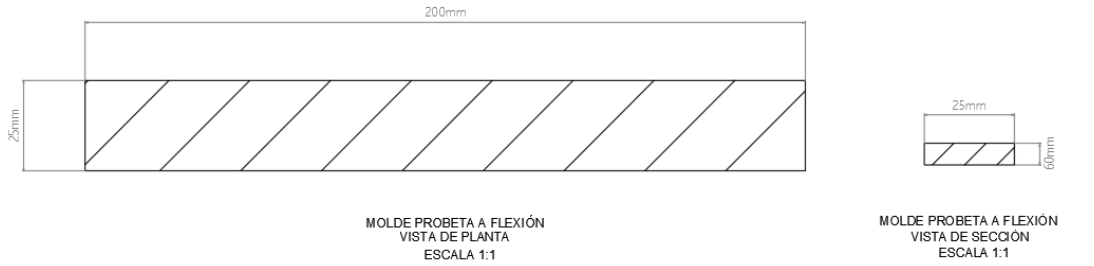
7 ANEXOS

Anexo 1. Plano probeta de tracción.



Fuente (Elaboración propia, 2025).

Anexo 2. Plano probeta de flexión



Fuente (Elaboración propia, 2025).