



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE REFUERZOS NATURALES EN LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE POLÍMEROS TERMOESTABLES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

KAREN PATRICIA ÁGUILA AVILÉS

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO PALMA HILLERNS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PATRICIO JORQUERA ENCINA
HUMBERTO PALZA CORDERO

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA
POR: KAREN PATRICIA ÁGUILA AVILÉS
FECHA: MARZO 2017
PROF. GUÍA: SR. RODRIGO PALMA HILLERNS

EFEECTO DE LA INCORPORACIÓN DE REFUERZOS NATURALES EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE POLÍMEROS TERMOESTABLES

En la actualidad existe un interés a nivel mundial por crear materiales que sean amigables con el medio ambiente. Los refuerzos de orígenes naturales se obtienen a partir de recursos no sintéticos o procesos industriales; lo anterior hace que este tipo de refuerzo se considere que tiene menor impacto ambiental en comparación a fibras sintéticas como las de vidrio o carbono. Esto ha generado el interés en la industria e investigaciones científicas, con el fin de ser utilizados como refuerzos de materiales compuestos; en particular, como refuerzo de materiales poliméricos.

Los compuestos de madera y plástico (WPC, Wood Plastic Composites) corresponden a cualquier material compuesto que contenga madera y algún polímero. Las principales aplicaciones para los compuestos reforzados con madera son las industrias del automóvil y de la construcción, donde se utilizan en aplicaciones estructurales. Los refuerzos derivados de la madera provienen de subproductos de la industria forestal; utilizándolos en la fabricación de materiales compuestos se diversifica su uso y se evita la acumulación o quema en calderas que en general no entrega un mayor valor agregado.

El trabajo de título tiene como objetivo estudiar las propiedades mecánicas de materiales compuestos a base de resina de poliéster reforzado con partículas de aserrín a distintas concentraciones de estas. Como objetivos específicos se encuentra la preparación de probetas del material compuesto con distintas concentraciones de partículas, la realización ensayos, analizar los resultados y por último, encontrar si existe un contenido óptimo de contenido de partículas que maximice las propiedades mecánicas

Las propiedades estudiadas mediante ensayos son la resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad en flexión y resistencia al impacto; además se incluye un análisis morfológico para probetas ensayadas en tracción. Para realizar el trabajo se preparan probetas con distintas concentraciones de refuerzo, luego las probetas son ensayadas para evaluar sus propiedades mecánicas; con lo anterior, se realiza análisis e interpretación de resultados para establecer una relación entre las propiedades mecánicas y el contenido de refuerzo.

Los resultados muestran que la resistencia a la tracción y flexión disminuye con el contenido de aserrín. Propiedades como módulo de elasticidad y resistencia al impacto aumentan. La morfología muestra que a mayor porcentaje de aserrín la superficie pierde homogeneidad y aumenta la aglomeración de aserrín y la presencia de burbujas. Dentro de los compuestos con algún contenido de aserrín estudiados, para concentraciones baja (5 % p/p), destaca la resistencia a la tracción e impacto; a concentraciones mayores (20 % p/p), se aprecian mejores propiedades en flexión.

Say no more

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, gracias a ellos tuve la oportunidad de estudiar y siempre me apoyaron a seguir. A Gonzalo, por enrielar mis ideas. A la Ale, por alentar y celebrar cada pequeño avance del trabajo. A todos, gracias por su cariño y haber estado presente incondicionalmente a lo largo de este proceso.

A los amigos que conocí en la universidad, muchos con los que ni compartimos ramos, pero estaban presentes para dar ánimos. Al Mono, que siempre estaba ahí (o en la cafeta) para compartir una cerveza después de un día de trabajar. A la Violchen, conversando de la vida, los logros, los miedos; apañando en las aventuras o levantando los ánimos. Gracias por todo eso. Al Álvaro, por el café, la música y la compañía en la etapa final del trabajo. A Piña, Nico, Cordero, Edi y Milla, por su preocupación, cariño y buena onda; con sus locuras e historias es imposible aburrirse. Al Mirko, por hacerme reír y acompañarme viendo la teleserie del mediodía. A César, por juntarse a trabajar conmigo y hacer menos tedioso el avance.

Al Madi, que me aportó con sus consejos a lo largo de este trabajo y en toda la carrera. Al Rod, por todos los chichones vividos. A ambos, gracias por todos estos años.

Al Departamento de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción y a Basf Chile por facilitarme los materiales que utilicé en el trabajo. Al Laboratorio de Materiales Poliméricos de IDIEM, por asistirme en la preparación de las muestras y realización de ensayos. Al Laboratorio de Catálisis de Iqbt y especialmente a Sergio Quinteros por su amabilidad. A los profesores, por su buena disposición.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo principal	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances	3
2. Metodología	4
3. Antecedentes	6
3.1. Polímeros	6
3.2. Resinas	7
3.3. Materiales compuestos	9
3.3.1. Componentes	9
3.3.2. Densidad de un compuesto	10
3.4. Compuestos reforzados con partículas	11
3.5. Comportamiento mecánico	12
3.5.1. Módulo elástico	12
3.5.2. Esfuerzo de fluencia	14
3.6. Compuestos de madera y plástico	14

3.7.	Tratamiento térmico para polvos de madera	15
3.8.	Propiedades mecánicas en compuestos de polvo de madera y plástico: Estado del arte	16
3.9.	Fractura	18
3.10.	Ensayo de tracción: Norma ASTM D 638	19
3.11.	Ensayo de Flexión: Norma ASTM D 790	21
3.12.	Ensayo de impacto	23
3.13.	Normas ASTM D 7031 y D 7032	25
3.14.	Microscopía electrónica de barrido	25
4.	Resultados y Discusiones	26
4.1.	Preparación de probetas	26
4.1.1.	Materiales	26
4.1.2.	Preparación del Refuerzo	29
4.1.3.	Preparación del Compuesto	30
4.2.	Ensayos Mecánicos	32
4.2.1.	Ensayo de tracción	32
4.2.2.	Ensayo de flexión de tres puntos	33
4.2.3.	Ensayo de impacto	34
4.3.	Resultados experimentales	35
4.3.1.	Tracción	35
4.3.2.	Flexión	36
4.3.3.	Impacto	38
4.3.4.	Resumen de propiedades mecánicas	39
4.4.	Morfología	40
5.	Conclusiones	45

Bibliografía	46
Apéndices	50
A. Espesor y ancho de probetas para ensayo de tracción	51
B. Diagrama carga-desplazamiento para ensayo de tracción	53
C. Espesor y ancho de probetas para ensayo de flexión	59
D. Diagrama carga-desplazamiento para ensayo de flexión	61
E. Espesor y ancho de probetas para ensayo de impacto	67

Índice de Tablas

3.1. Propiedades en flexión para un compuesto de matriz de poliéster.	16
3.2. Propiedades en tracción para un compuesto de Polipropileno y polvo de madera.	17
3.3. Propiedades en flexión para un compuesto de Polipropileno y polvo de madera.	17
3.4. Dimensiones para probeta bajo ensayo de tracción.	20
4.1. Distribución del tamaño de partículas	28
4.2. Resistencia a la tracción para diferentes concentraciones de aserrín	35
4.3. Propiedades en flexión para diferentes concentraciones de aserrín	37
4.4. Resistencia al impacto para diferentes concentraciones de aserrín	38
4.5. Resumen de propiedades mecánicas	39
A.1. Espesor y ancho de probetas para ensayo de tracción	51
C.1. Espesor y ancho de probetas para ensayo de flexión	59
C.2. Tabla C.1: Espesor y ancho de probetas para ensayo de flexión (continuación)	60
E.1. Espesor y ancho de probetas para ensayo de impacto	67
E.2. Espesor y ancho de probetas para ensayo de impacto	68

Índice de Ilustraciones

2.1. Metodología para el trabajo de Título	4
3.1. Comportamiento esfuerzo-deformación de los polímeros: frágil (curva A), plástico (curva B) y con elevada elasticidad (curva C).	7
3.2. Ácidos saturados	8
3.3. Carga aplicada paralelamente a las fibras	12
3.4. Carga aplicada en dirección perpendicular a las fibras.	13
3.5. Módulo de elasticidad en función de su fracción volumétrica para un material compuesto reforzado con partículas.	14
3.6. Resistencia al impacto en ensayo Izod	18
3.7. Tipos de fractura	19
3.8. Probeta para ensayo de tracción.	20
3.9. Sistema de carga de 3 puntos para ensayo de flexión	21
3.10. Curvas típicas esfuerzo-deformación en flexión	22
3.11. Probeta utilizada para ensayos de impacto de Charpy e Izod. (b) Esquema del aparato para ensayos de impacto y posicionamiento de las probetas para ensayo Charpy e Izod.	24
4.1. (a) Resina de Poliéster insaturado. (b) Catalizador.	27
4.2. Aserrín de Pino Oregón (refuerzo).	27
4.3. Tamices	28
4.4. Curva granulométrica para el aserrín.	29
4.5. Distribución de tamaño para el aserrín.	29

4.6. (a) Cámara de secado. (b) Interior.	30
4.7. Probetas para ensayo de tracción.	31
4.8. Probeta para ensayo de flexión.	31
4.9. Probeta para ensayo de impacto.	31
4.10. Ensayo de flexión	32
4.11. Ensayo de flexión	33
4.12. Ensayo de impacto	34
4.13. Resistencia a la tracción	36
4.14. Módulo de elasticidad en flexión.	37
4.15. Resistencia al impacto	39
4.16. Morfología para el aserrín (a) 30x. (b) 500x.	40
4.17. Fractura de resina en tracción (a) superficie de fractura, 12x; (b) crestas radiales, 30x; (c) fractura intergranular 100x.	41
4.18. Fractura de compuesto con contenido de aserrín de 5 % p/p en tracción (a) superficie de fractura, 12x; (b) detalle de superficie, 500x; (c) zona de arranque, 100x.	42
4.19. Fractura de compuesto con contenido de aserrín de 15 % p/p en tracción (a) superficie de fractura, 12x; (b) detalle de superficie, 500x; (c) zona de arranque, 100x.	43
4.20. Fractura de compuesto con contenido de aserrín de 10 % p/p en tracción (a) superficie de fractura, 12x; (b) detalle de superficie, 500x	44
B.1. Curva carga-desplazamiento para ensayo de tracción. Contenido de aserrín: 0 %	54
B.2. Curva carga-desplazamiento para ensayo de tracción. Contenido de aserrín: 5 %	55
B.3. Curva carga-desplazamiento para ensayo de tracción. Contenido de aserrín: 10 %	56
B.4. Curva carga-desplazamiento para ensayo de tracción. Contenido de aserrín: 15 %	57
B.5. Curva carga-desplazamiento para ensayo de tracción. Contenido de aserrín: 20 %	58
D.1. Curva carga-desplazamiento para ensayo de flexión. Contenido de aserrín: 0 %	62
D.2. Curva carga-desplazamiento para ensayo de flexión. Contenido de aserrín: 5 %	63

- D.3. Curva carga-desplazamiento para ensayo de flexión. Contenido de aserrín: 10 % 64
- D.4. Curva carga-desplazamiento para ensayo de flexión. Contenido de aserrín: 15 % 65
- D.5. Curva carga-desplazamiento para ensayo de flexión. Contenido de aserrín: 20 % 66

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes Generales

Los materiales compuestos se definen como una combinación macroscópica de dos o más materiales. Estos materiales se presentan en diferentes fases y se encuentran adecuadamente dispuestos o distribuidos; entre ellos existe una interfase discreta y reconocible que los separa. La fase continua se denomina matriz, mientras que la fase discontinua se llama refuerzo o relleno. Existen tres elementos que determinan las características de un material compuesto: tipo de matriz, tipo de refuerzo y la interfase entre ellos. La incorporación de refuerzos en la matriz trae como resultado mejoras en las propiedades mecánicas en comparación a su condición original.

En los últimos 20 años [1], la utilización de materiales de origen natural ha crecido en interés, tanto en la industria como en investigaciones científicas, para ser utilizados como refuerzos en la fabricación de compuestos; en particular, como refuerzo de materiales poliméricos. Se obtienen a partir de recursos no sintéticos o procesos industriales; entre las fuentes para obtenerlas se encuentran plantas o incluso, animales. Son biodegradables, reciclables y renovables; por lo tanto, se consideran amigables con el medio ambiente [2]. Además, presentan ventajas sobre materiales reforzados con fibras sintéticas en términos de baja densidad y menor costo [3]. A menudo estos materiales reemplazan parte del volumen del polímero (de mayor costo), lo que reduce el coste del producto final.

Dentro de estos materiales se encuentran los compuestos de madera y plástico, que corresponden a cualquier material compuesto que contenga madera (ya sea en forma de partículas o fibra) y algún polímero [1]. Las principales aplicaciones para los compuestos reforzados con madera son las industrias del automóvil y de la construcción, donde se utilizan en aplicaciones estructurales como vallas, cubiertas, muebles de jardín, piezas para ventanas, productos de línea de techo, paneles de las puertas, etc. [4].

1.1.1. Motivación

La industria forestal chilena en la última década ha experimentado un importante crecimiento en todas las actividades productivas que utilizan madera en trozas como materia prima. El sector forestal ocupa el tercer lugar en exportaciones chilenas. En 2015, las exportaciones del sector forestal correspondieron a \$5.439 millones de dólares, representando un 8,7% de las exportaciones totales del país [5]. Sin embargo, la utilización de los subproductos forestales aun tiene un alto grado de desaprovechamiento. El aserrín, viruta, despuntes, entre otros, se almacena en grandes cerros o se quema en calderas sin poseer un mayor valor agregado o alcanzar una eficiencia energética mayor. Estos residuos llegan a constituir un 20% del total de la troza [6].

Es por lo anterior que el estudio del empleo de aserrín como refuerzo de materiales poliméricos permitiría dar otra perspectiva en el uso de este subproducto de la madera. Para esto es necesario estudiar las propiedades mecánicas del material compuesto en función de la concentración de aserrín, donde además se busca aquel que tenga las mejores propiedades a la menor densidad posible.

1.2. Objetivos

A continuación se presenta el objetivo principal y objetivos específicos de este trabajo.

1.2.1. Objetivo principal

El objetivo principal del trabajo de título es estudiar las propiedades mecánicas de un material compuesto termoestable reforzado con partículas de origen natural a distintas concentración de partículas.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- Seleccionar criterios de elección - tal como la disponibilidad - y aplicarlos a la selección del tipo de matriz, refuerzo y condiciones de fabricación del material compuesto.
- Desarrollar metodología para la construcción de probetas.
- Estudiar experimentalmente el efecto de la concentración de refuerzo en el material compuesto sobre sus propiedades mecánicas.
- Contrastar los resultados con otros estudios y/o modelos teóricos y analizar sus eventuales diferencias.
- Determinar si existe un contenido óptimo de refuerzo que maximice las propiedades estudiadas.

1.3. Alcances

En este trabajo se utiliza una resina de poliéster ortoftálico como matriz y como refuerzo aserrín de Pino Oregón.

Se estudian propiedades mecánicas determinadas por ensayos de tracción, flexión e impacto. Además se emplea microscopía SEM para caracterizar morfológicamente probetas ensayadas en tracción.

Capítulo 2

Metodología

Se fabrican probetas con diferentes concentraciones de partículas de aserrín (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % p/p) que son sometidas a ensayos de tracción, flexión e impacto. Las propiedades estudiadas corresponden a la resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, módulo de flexión y resistencia al impacto. Además, las probetas traccionadas son estudiadas por medio de microscopía SEM. Con los resultados obtenidos, se determinan relaciones entre las propiedades evaluadas y el contenido de refuerzo del material compuesto.

La metodología señalada es presentada esquemáticamente en el diagrama de la Figura 2.1.

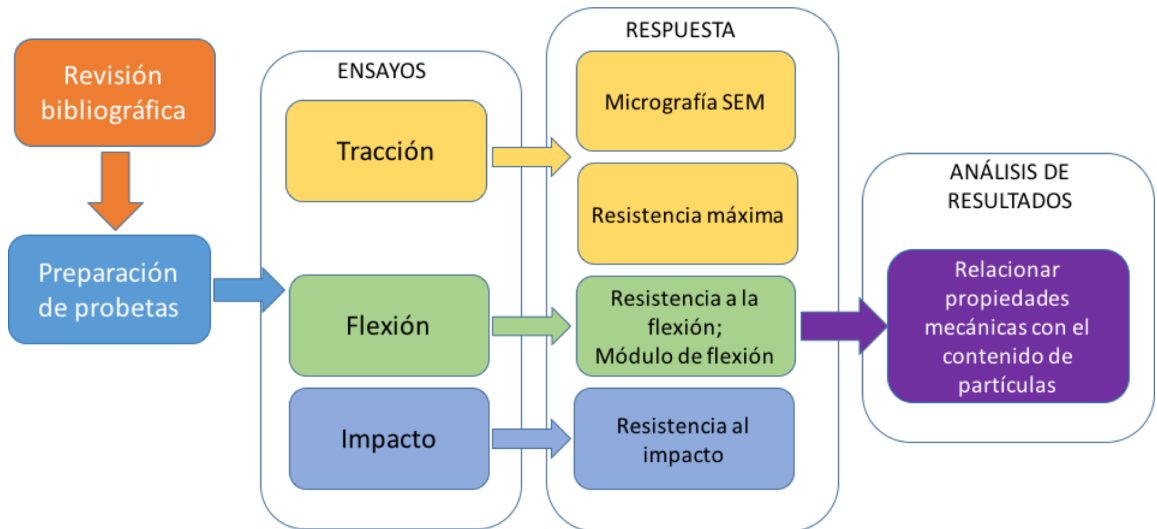


Figura 2.1: Metodología para el trabajo de Título. Fuente: Elaboración propia.

Recursos

A continuación se detallan los equipos y materiales que se utilizan para la preparación del material compuesto y la realización de los ensayos.

Equipos

- Cámara de secado y calentamiento Binder Serie FD para realizar el tratamiento térmico al refuerzo perteneciente al Laboratorio de Fluidodinámica.
- Máquinas de tracción perteneciente al Laboratorio de Materiales Poliméricos de IDIEM.
- Máquina de flexión perteneciente al Laboratorio de Materiales Poliméricos de IDIEM.
- Máquina de ensayo de impacto perteneciente al Departamento de Ciencia de los Materiales.
- Microscopio SEM perteneciente al Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido de la facultad de Odontología.
- Software ImageJ.

Materiales

- Resina de Poliéster ortoftálico Palatal 53-46-B suministrado por Basf Chile.
- Catalizador de Peróxido de Metiletilcetona (MEK), Butanox M-50 suministrado por Basf Chile.
- Aserrín de Pino Oregón suministrado por el Departamento de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción.

Capítulo 3

Antecedentes

3.1. Polímeros

Los polímeros pueden clasificarse en termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos son polímeros con la particularidad de ser moldeables o deformables al fundir y son capaces de recuperar sus propiedades al enfriar; de ellos los más comúnmente utilizados como matriz son polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y poli(cloruro de vinilo) (PVC). Por otra parte, los polímeros termoestables pueden definirse como polímeros altamente entrecruzados que curan mediante calor o, usando calor y presión. Entre los termoestables más empleados como matriz se encuentra las resinas de viniléster, poliéster insaturado (UP) y resinas epóxicas [7].

Comportamiento Mecánico: Esfuerzo-Deformación

En múltiples materiales poliméricos se emplea el ensayo de esfuerzo-deformación para caracterizar sus propiedades mecánicas (ver Sección 3.4). Los materiales poliméricos presentan tres tipos distintos de comportamiento en cuanto a esfuerzo-deformación según se observa en la Figura 3.1. La curva *A* corresponde al comportamiento esfuerzo-deformación de un polímero frágil, que se fractura al deformarse elásticamente. El comportamiento de la curva *B* muestra una deformación elástica inicial, el material fluye y luego se deforma plásticamente. El comportamiento de la curva *C* corresponde a un material elastomérico.

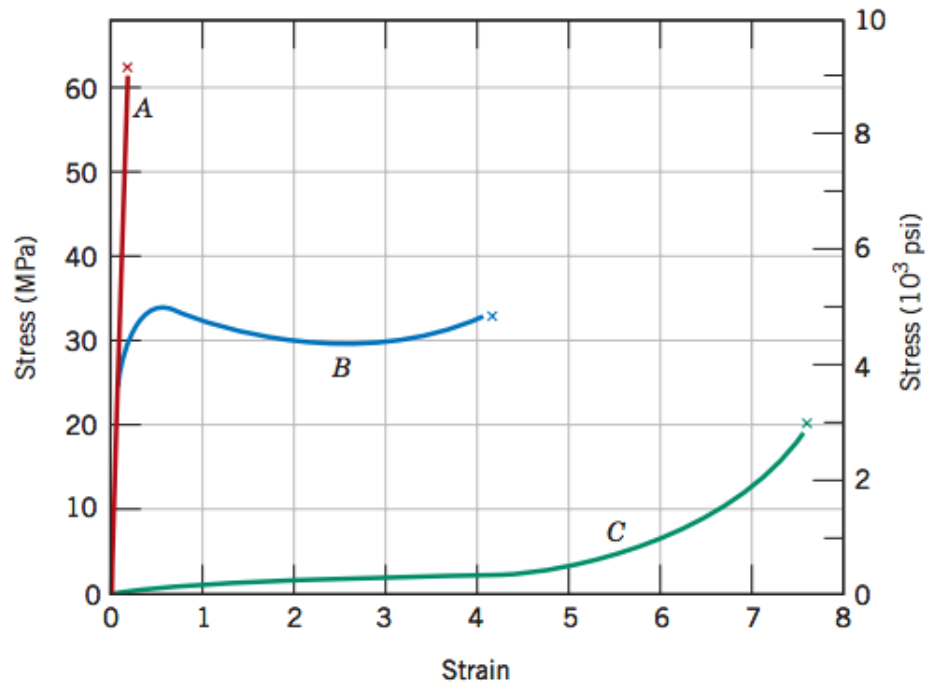


Figura 3.1: Comportamiento esfuerzo-deformación de los polímeros: frágil (curva A), plástico (curva B) y con elevada elasticidad (curva C). Fuente: [8].

3.2. Resinas

Las resinas son un tipo de polímero termoestable. Entre los distintos tipos se pueden distinguir resinas de poliéster, vinilester y epóxicas. Las resinas son líquidas y se procesan al adicionar catalizadores y acelerantes, transformándolas en sólidos a temperatura ambiente. La transformación al estado sólido se conoce como polimerización o curado. Luego de activadas, las resinas permanecen sin alteración durante algunos minutos (5, 10, 15 o más, dependiendo de la cantidad de catalizador, acelerador y condiciones ambientales), pasando luego por una fase de gel antes de endurecer.

El tiempo transcurrido entre la adición de agentes promotores de la polimerización y el inicio de la etapa de gel es conocido como tiempo de gel o "gel time". Transcurrido el tiempo de gel, el proceso de curado prosigue con una reacción exotérmica hasta que la resina presente características físicas de un sólido rígido (proceso irreversible). Para la fabricación de materiales compuestos, el refuerzo debe incorporarse a la resina mientras la resina permanece líquida, inmediatamente después de la adición del catalizador [9].

Resinas de Poliéster

Las resinas poliéster están formadas por una mezcla homogénea de una cadena polimérica central en base a poliéster y que se encuentra disuelta en monómeros de estireno, el cual, además de ser usado como diluyente de la resina, cumple una función estructural dentro del curado de esta.

La cadena polimérica en base a poliéster es la unidad fundamental de la resina y, dependiendo de los monómeros que componen dicha cadena, van a ser las características propias que la resina pueda tener. Esta cadena está formada por distintos tipos de:

Glicoles: Moléculas que tienen en su estructura dos grupos hidroxilo (-OH).

Ácidos saturados: Moléculas que en su estructura tienen grupos carboxilo (COOH). Los más utilizados en las resinas de poliéster son el i) ortoftálico (en forma de anhídrido) y el ii) ácido isoftálico (ver Figura 3.2).

Ácidos insaturados: Moléculas que además de un grupo carboxilo (COOH) tienen en su estructura insaturaciones, las cuales se presentan como uniones dobles entre carbono y carbono (C=C). Estas uniones dobles son las que luego se unen el monómero de estireno para producir la solidificación de la resina.



Figura 3.2: Ácidos saturados. Fuente: Adaptado de [9].

i) Resinas de Poliéster isoftálicas

Son resinas de alta reactividad y resistentes a compuestos químicos y al calor (moderado). Sus características principales son:

- Buena resistencia química
- Baja absorción de agua.

Las propiedades mencionadas hacen a este tipo de resinas aptas para la fabricación de moldes y herramientas.

ii) Resinas de Poliéster ortoftálicas

Son resinas de uso general y de formulación más simple; por lo tanto, las más económicas de todas. La primera razón para usar ácido ortoftálico en la síntesis de poliésteres fue reducir problemas de cristalización que impedían la obtención de resinas transparentes; además de esto, las resinas modificadas con este ácido fueron menos quebradizas y mucho más compatibles con el monómero de estireno. Entre sus propiedades se tiene:

- Buena resistencia mecánica
- Buena impregnación de refuerzos.
- Rápido desmolde.
- Translúcida.
- Adecuado tiempo de gel.

Las características señaladas hacen que este tipo de resinas sea conveniente de utilizar en la fabricación de materiales compuestos.

3.3. Materiales compuestos

Los materiales compuestos se definen como una combinación macroscópica de dos o más materiales, adecuadamente dispuestos o distribuidos. Poseen una interfase discreta y reconocible que los separa. La finalidad es obtener un nuevo material cuyas propiedades sean una combinación de las propiedades individuales.

3.3.1. Componentes

En los materiales compuestos, se pueden distinguir dos componentes: i) la matriz y el ii) refuerzo o fase discontinua.

i) Matriz

Corresponde a la fase continua y que rodea al refuerzo. Las funciones principales de la matriz son:

- Definir las propiedades físicas y químicas del material compuesto.
- Transmitir cargas al material de refuerzo.
- Proteger el material de refuerzo y brindarle cohesión.

Según el tipo de matriz utilizada los materiales compuestos pueden clasificarse como: (i) compuestos de matriz polimérica, (ii) compuestos de matriz metálica, y (iii) compuestos de matriz cerámica.

ii) Refuerzo

El refuerzo o fase discontinua (o dispersa) es el material que, agregado a la matriz, le confiere al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee. En general, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y la rigidez mecánica, pero también se pueden emplear para mejorar el comportamiento a altas temperaturas, mejorar la resistencia a la abrasión disminuir la densidad (relación resistencia-peso).

De acuerdo a la forma que posea el refuerzo, es posible clasificar a los materiales compuestos de la siguiente manera:

- Materiales compuestos reforzados con partículas.
- Materiales compuestos reforzados con fibras.

3.3.2. Densidad de un compuesto

La densidad de un compuesto de composición conocida puede calcularse según la regla de las mezclas lineal como:

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m (1 - v_f) \quad (3.1)$$

donde v_f : fracción volumétrica de refuerzo ρ_f : densidad del material de refuerzo y ρ_m : densidad de la matriz

La fracción volumétrica corresponde a la razón de volumen de refuerzo en el volumen total del compuesto, esto es:

$$v_f = \frac{V_f}{V_f + V_m} = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad (3.2)$$

Por otro lado, la fracción másica corresponde a la razón entre la masa del refuerzo y la masa total del compuesto, es decir:

$$m_f = \frac{M_f}{M_f + M_m} \quad (3.3)$$

De esta ecuación es posible despejar M_f y reemplazarlo en la ecuación 3.2, con el fin de obtener la fracción volumétrica en función de la fracción másica, esto es:

$$v_f = \frac{m_f}{m_f + (1 - m_f) \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (3.4)$$

Reemplazando la ecuación 3.4 en 3.1 se obtiene la densidad del compuesto en función de la fracción másica del refuerzo:

$$\rho_c = \frac{\rho_f \rho_m}{\rho_m m_f + \rho_f (1 - m_f)} \quad (3.5)$$

3.4. Compuestos reforzados con partículas

Los materiales compuestos reforzados con partículas pueden clasificarse en (i) endurecidos por dispersión y (ii) reforzados con partículas grandes.

(i) Compuestos endurecidos por dispersión

Para materiales compuestos endurecidos por dispersión, las partículas son normalmente muy pequeñas, con diámetros entre 0,01 y 0,1 μm (10 y 100 nm). Las interacciones matriz-partícula se producen a nivel atómico o molecular. La matriz tiene la mayor porción de una carga aplicada, mientras que las pequeñas partículas obstaculizan o impiden el movimiento de las dislocaciones. La deformación plástica está restringido de tal manera que la resistencia a la tracción, así como la dureza, mejoran.

(ii) Compuestos reforzados con partículas grandes

En los compuestos reforzados con partículas grandes las interacciones partículas-matriz no son tratadas a nivel atómico o molecular. En la mayoría de este tipo de material compuesto, la fase discontinua (refuerzo) es más dura y rígida que la matriz. Las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la fase de matriz en la proximidad de cada partícula; la matriz transfiere algo de la tensión aplicada a las partículas, que llevan una fracción de la carga. El grado de refuerzo o mejora del comportamiento mecánico depende de una fuerte unión en la interfase matriz-partícula.

Las partículas pueden tener geometría variable, pero se busca que tengan una dimensión similar en todas las direcciones (equiaxial). Para que el refuerzo se considere eficaz, las partículas deben ser pequeñas y encontrarse distribuidas de manera uniforme por toda la matriz.

Para el caso de polímeros, estos refuerzos se añaden para mejorar resistencia a la tracción y a compresión, dureza, estabilidad dimensional y térmica; entre otras propiedades. Entre los materiales utilizados como relleno particulado está el polvo de madera (aserrín fino), polvo de sílice y arena, vidrio, arcilla, talco, piedra caliza e incluso algunos polímeros sintéticos. A menudo, estos materiales de relleno (que son de bajo costo) reemplazan parte del volumen del polímero (que tiene un costo mayor), lo que reduce el coste del producto final.

Entre las ventajas de utilizar partículas como refuerzo está el menor costo y menores dificultades técnicas al momento de fabricación en comparación a reforzar con fibras, y son potenciales candidatos cuando las propiedades bajo impacto son importantes [10].

3.5. Comportamiento mecánico

3.5.1. Módulo elástico

El comportamiento mecánico del compuesto está influenciado por la fracción volumétrica de las dos fases; las propiedades mecánicas mejoran al aumentar el contenido de partículas, aunque muchas veces este comportamiento tiene un carácter anisotrópico.

Fibras:

Para el caso de compuestos reforzados con una cantidad en volumen de fibra (v_f), si un esfuerzo (σ) es aplicado en dirección paralela a las fibras (ver Figura 3.3), la deformación (ϵ_n) tanto para la fibra como la matriz es igual. Teniendo en cuenta que $\sigma = E\epsilon_n$ (con E : Módulo de Young del compuesto), el esfuerzo viene dado por

$$\sigma = E_f v_f \epsilon_n + E_m (1 - v_f) \epsilon_n \quad (3.6)$$

donde E_f : módulo de elasticidad de la fibra y E_m : módulo de elasticidad de la matriz.

Reescribiendo la ecuación 3.6 se obtiene

$$E = \sigma / \epsilon_n = E_m v_f + E_m (1 - v_f) \quad (3.7)$$

La ecuación 3.7 corresponde al módulo de elasticidad para un compuesto sometido a esfuerzos en dirección paralela a las fibras y corresponde al máximo valor que puede tener en un compuesto.

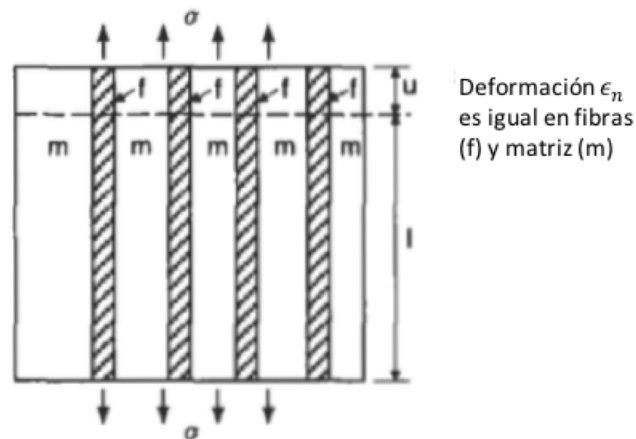


Figura 3.3: Carga aplicada paralelamente a las fibras. Fuente: Adaptado de [11].

Para el caso en que el compuesto es sometido a una carga en dirección perpendicular a las fibras (Figura 3.4), se tiene que los esfuerzos son iguales tanto para matriz como la fibra. Asumiendo esto, se tiene que

$$\varepsilon_n = \frac{v_f}{E_f} \sigma + \frac{(1 - v_f)}{E_m} \sigma \quad (3.8)$$

Teniendo en cuenta que $E = \sigma / \varepsilon_n$, se tiene

$$E = \frac{1}{\frac{v_f}{E_f} + \frac{(1 - v_f)}{E_m}} \quad (3.9)$$

La ecuación 3.9 corresponde al módulo de elasticidad para un compuesto sometido a esfuerzos en dirección perpendicular a las fibras y corresponde al mínimo valor que este módulo puede tener en un compuesto.

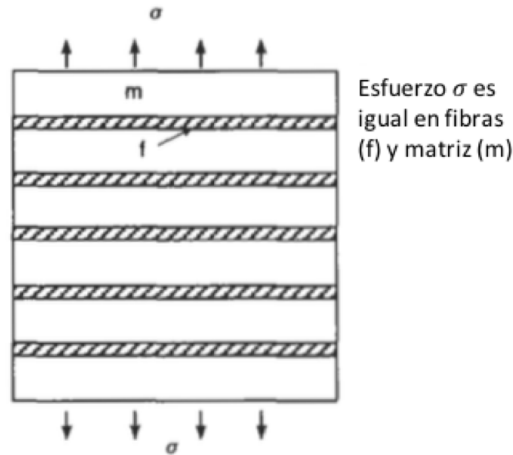


Figura 3.4: Carga aplicada en dirección perpendicular a las fibras. Fuente: Adaptado de [11].

Partículas

Para el caso de compuestos reforzados con partículas el módulo elástico se encuentra entre los delimitados mediante las ecuaciones 3.7 y 3.9, tal como se muestra en la Figura 3.5; aunque más cercano al valor mínimo del módulo (ecuación 3.9) [8]. Una ventaja de reforzar es que el compuesto tendrá un comportamiento mecánico isotrópico.

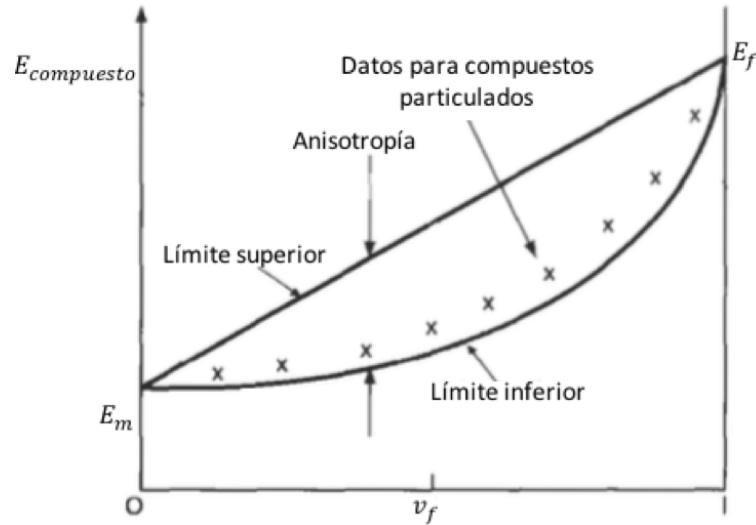


Figura 3.5: Módulo de elasticidad en función de su fracción volumétrica para un material compuesto reforzado con partículas. Fuente: Adaptado de [11].

3.5.2. Esfuerzo de fluencia

Para el caso de polímeros reforzados con partículas, Pukánszky et al. [12] proponen un modelo donde se asume que el esfuerzo de fluencia (σ_y) está determinado por el decrecimiento de la carga efectiva en la sección transversal (debido a la presencia de relleno) y la interacción entre polímero y relleno. Según lo anterior, el trabajo propone la siguiente ecuación:

$$\sigma_y = \sigma_m \frac{1 - v_f}{1 + Av_f} \exp(Bv_f) \quad (3.10)$$

donde σ_m corresponde al esfuerzo para la matriz; B un parámetro que caracteriza la interacción interfacial y A un parámetro de forma relacionado a la distribución de los rellenos.

Luego, las propiedades de polímeros reforzados con partículas son consecuencia de las características de los materiales que lo componen, la fracción másica de las partes, la interacción entre ambas y la estructura del polímero.

3.6. Compuestos de madera y plástico

Los compuestos de madera y plástico (WPC, Wood Plastic Composites) corresponden a cualquier material compuesto que contenga madera (en forma de partículas o fibra) y algún polímero [1]. En los últimos 20 años se ha visto un rápido crecimiento en la industria de los WPCs. Algunas razones para su éxito comercial son su bajo costo y la capacidad que tiene como refuerzo de la madera, que proporcionan nuevas oportunidades para la fabricación de materiales compuestos. Las principales aplicaciones para los compuestos reforzados con

madera son las industrias del automóvil y de la construcción, donde se utilizan en aplicaciones estructurales como vallas, cubiertas, muebles de jardín, piezas para ventanas, productos de línea de techo, paneles de las puertas, etc. [4].

Algunas ventajas del uso de refuerzos de origen natural (como la madera) son:

- Son biodegradables, reciclables y renovables; por lo tanto, se consideran amigables con el medio ambiente [2].
- Al provenir de recursos renovables su producción requiere de menos energía y existe menos absorción de CO_2 ; por lo tanto son menos costosas que sintéticas. Por ejemplo, el costo comercial por kg de fibra ronda los 3,50 UDS, mientras que fibras naturales llegan a tener costos inferiores a 1 USD [13]. En el caso particular del aserrín este tiene un costo aproximado de 0,3 USD/kg.
- La densidad de los refuerzos naturales bordea los $1,25 \text{ g/cm}^3$; para el caso del aserrín este tiene densidad aproximada de $0,5 \text{ g/cm}^3$. Estos valores son inferiores a fibras de vidrio ($2,54 \text{ g/cm}^3$) y de carbono ($1,95 \text{ g/cm}^3$). Lo anterior permite que los compuestos reforzados naturalmente tenga una densidad menor [2].
- No irritan la piel y tienen menor riesgo a la salud [14].
- La incineración durante el final del ciclo de vida se traduce en recuperación de energía [15].

Aunque los compuestos con refuerzos de origen natural presentan ciertas ventajas en comparación con las fibras sintéticas, existen aspectos que los proveedores de estas deben superar para la fabricación de fibras naturales a alta escala y así ser más competitivas a nivel industrial; por ejemplo, la forma, tamaño y propiedades mecánicas de estos materiales pueden variar dependiendo del ambiente de cultivo, la procedencia geográfica, la madurez de la planta, y el proceso de fabricación de materiales compuestos. Otras limitaciones son su bajo punto de fusión y alta absorción de humedad [16]; esto implica que a temperaturas sobre los 200°C , los refuerzos naturales comienzan a degradarse, lo que produce decoloración, olor y deterioro de las propiedades mecánicas del plástico reforzado [2].

3.7. Tratamiento térmico para polvos de madera

El contenido de humedad de la madera y otras fibras naturales puede resultar perjudicial al momento de fabricación del compuesto, debido a que el polímero (matriz) presenta un carácter hidrofóbico; esto produce que el refuerzo tenga tendencia a formar agregados dentro de la matriz [16].

Para el caso de refuerzos derivados de la madera, el tratamiento que más comúnmente se realiza para disminuir su contenido de humedad es el secado en hornos. Las temperaturas del horno se encuentran entre los 60°C [17] y 104°C [18]; el tiempo máximo de secado es de 24 h.

3.8. Propiedades mecánicas en compuestos de polvo de madera y plástico: Estado del arte

Marcovich et al. [19] estudiaron el efecto en las propiedades mecánicas en flexión y compresión para una resina de poliéster insaturado utilizando como relleno fibras cortas de sisal y polvos de madera. Los polvos de madera fueron secados en un horno a 70 °C. Parte de ellos recibieron un tratamiento a base de una solución de anhídrido maleico (MAN) durante 4 h para modificar la superficie. Todas las muestras fueron preparadas con una concentración de fibras de un 40 % p/p. Además se preparó un compuesto híbrido con una composición de 20 % aserrín y 20 % de fibras de sisal. El ensayo de flexión se desarrolló según la norma ASTM D 790.

Se encontró que los módulos de flexión de los materiales compuestos son más altos que los medidos para el termoestable puro; esto como consecuencia del uso de partículas que son más rígidas que la matriz polimérica. Al mismo tiempo, la resistencia a la flexión y la deformación última disminuyen considerablemente en comparación con las del material sin carga, debido al efecto sobre la deformación máxima producto de la presencia de partículas rígidas, que limitan la deformación de la matriz. Por otra parte, el uso de fibras de sisal no presenta ninguna mejora significativa en comparación con la adición de polvos de madera. El uso de tratamientos superficiales en fibras de sisal y aserrín no provocó variación en el módulo de flexión para los diferentes compuestos fabricados. En la Tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos según los distintos refuerzos estudiados para el módulo de flexión (MOE) y resistencia a la flexión (MOR).

Tabla 3.1: Propiedades en flexión para un compuesto de matriz de poliéster.

Refuerzo	MOE (GPa)	MOR (MPa)
Sin refuerzo	2,9	93,5
Polvo de madera	5,4	54,1
Polvo de madera/Sisal	5,5	59,4
Sisal	5,4	51,3
Sisal tratada con MAN	5,3	53,4

Fuente: Adaptado de [19].

Núñez et al. [20] realizaron una caracterización mecánica para un compuesto de poli-propileno (PP) y polvos de madera. En el trabajo se realizaron tres tipos de mezclas de resina/aserrín: (1) compuestos donde los polvos de madera se incorporan sin tratamiento, (WC); (2) compuestos donde los polvos de madera fueron pretatados con anhídrido maleico (MAN), (MC) y (3) compuestos fabricados con aserrín sin tratamiento y un 5 % de (respecto del contenido en peso de aserrín) de PPMAN, (PPMC). Los ensayos realizados corresponden a tracción (norma ASTM D 638), flexión (ASTM D 790) e impacto (ASTM D 256, izod).

En tracción se encontró que para todos los casos el módulo (E) aumenta con el contenido de aserrín, pero el incremento fue mayor para WC, excepto para grandes concentraciones

(sobre 40 % p/p) (ver Tabla 3.2). La tensión de fluencia disminuye debido al aumento de agregados conforme aumenta el contenido de aserrín que debilitan los enlaces físicos entre matriz y fibra, lo que hace más fácil la ruptura al aplicar cargas de tracción.

Tabla 3.2: Propiedades en tracción para un compuesto de Polipropileno y polvo de madera.

Material	%p/p	E (GPa)	σ_y (MPa)
PP	0	1,22	36,87
	10	1,58	28,98
WC	26	2,17	23,88
	50	2,01	11,88
MC	10	1,61	26,24
	26	1,86	18,98
PPMC	50	2,33	11,33
	50	2,52	16,82

Fuente: Adaptado de [20]

En flexión el comportamiento fue similar, el módulo en flexión (MOE) aumentó con el porcentaje en peso de relleno y el incremento fue mayor en MC y PPMC, explicado por una mejor compatibilidad matriz-relleno (ver Tabla 3.3). La resistencia a la flexión (MOR) en tanto disminuye en función del contenido de relleno.

Tabla 3.3: Propiedades en flexión para un compuesto de Polipropileno y polvo de madera.

Material	%p/p	MOR (MPa)	MOE (GPa)
PP	0	54,43	1,22
	10	45,32	1,28
WC	26	43,63	1,60
	50	37,2	2,43
MC	10	48,92	1,55
	26	42,55	2,13
PPMC	50	31,44	2,72
	50	35,04	3,04

Fuente: Adaptado de [20]

En tanto, en el ensayo de impacto Izod, la adición de aserrín al PP inicialmente incrementa la resistencia al impacto debido a nuevos mecanismos de deformación activos durante la fractura (ver Figura 3.6). Luego el material se vuelve más rígido y la energía absorbida al impacto disminuye.

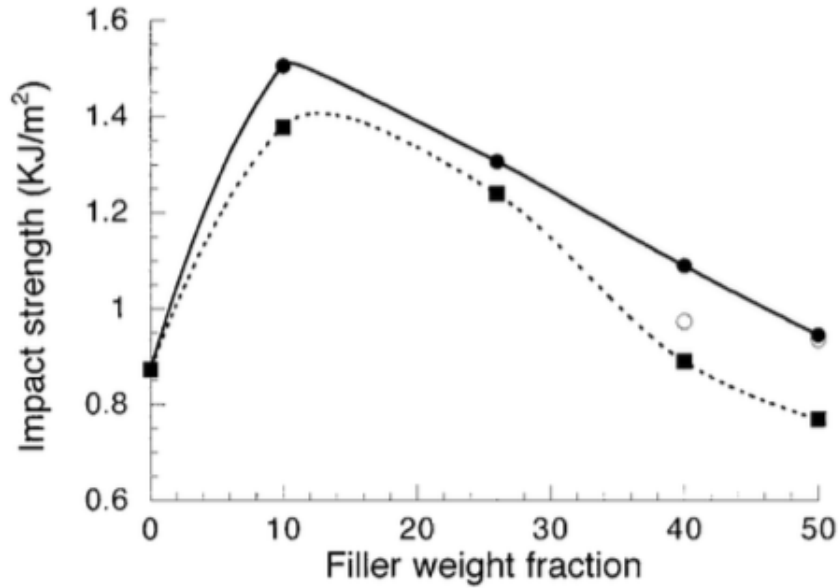


Figura 3.6: Resistencia al impacto en ensayo Izod. Fuente: [20].

3.9. Fractura

Fractura es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a una tensión estática aplicada y a temperaturas bajas en comparación a la temperatura de fusión del material. La tensión aplicada puede ser de tracción, compresión, cizalladura o torsión.

Para los materiales de ingeniería existen dos tipos de fractura: dúctil y frágil. Esta clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica.

Fractura dúctil

Los materiales dúctiles presentan una deformación plástica con una gran absorción de energía antes de la fractura. El proceso ocurre normalmente en múltiples etapas y se caracteriza por la existencia de una gran deformación plástica en la vecindad de la grieta que avanza.

Fractura Frágil

La fractura frágil exhibe poca o ninguna deformación plástica, con poca absorción de energía y una rápida propagación de la grieta que, una vez iniciada, continúa espontáneamente sin un aumento de la tensión aplicada. La dirección de propagación de la grieta es casi perpendicular a la dirección de la tensión aplicada y produce una superficie de fractura relativamente plana.

La Figura 3.7 muestra una representación esquemática de los tipos de perfiles macroscópicos en una fractura; donde la Figura 3.17 (a) corresponde a una fractura dúctil en la cual la probeta estiricciona hasta llegar a un punto, la Figura 3.17 (b) una fractura moderadamente dúctil con cierta estirricción y la Figura 3.17 (c) una fractura frágil sin deformación plástica.

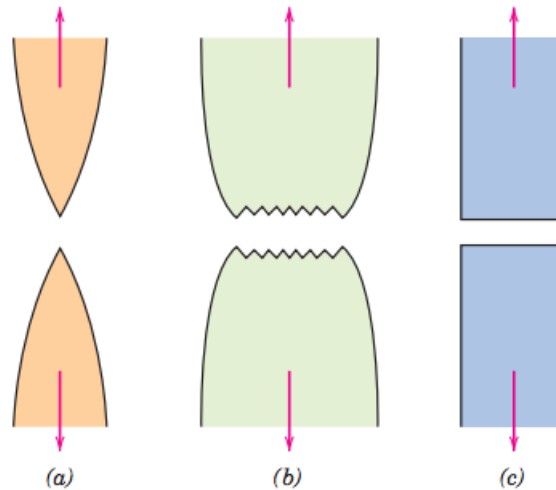


Figura 3.7: Tipos de fractura (a) Fractura dúctil. (b) Fractura moderadamente dúctil. (c) Fractura frágil. Fuente: [8].

Para el caso de los materiales compuestos la apariencia y mecanismo de fractura dependerá de las características de fractura que presenten la matriz y el refuerzo y de la efectividad de la unión de ambos materiales [21].

3.10. Ensayo de tracción: Norma ASTM D 638

El ensayo de tracción consiste en la deformación de una probeta a través de un estiramiento uniaxial hasta su ruptura, con una carga de tracción aumentando gradualmente; proceso que se realiza a velocidad constante. Durante el transcurso del ensayo la máquina registra la deformación frente a la tensión aplicada. Durante el ensayo la deformación está concentrada en la región estrecha de la probeta, la cual tiene una sección uniforme a lo largo de su longitud [8]. Es un ensayo de tipo destructivo; por lo tanto, la probeta es deformada de manera permanente o hasta su ruptura.

La norma ASTM D 638 describe el método estándar para determinar propiedades en tracción para plásticos. Este método aplica tanto para plásticos no reforzado como para plásticos reforzados [22]. Los resultados obtenidos a partir de este método son apropiados para el uso en diseño de ingeniería. Las probetas estándar de ensayo tienen forma plana y sección rectangular (ver Figura 3.8). Para plásticos reforzados se emplean las dimensiones mostradas en la Tabla 3.4.

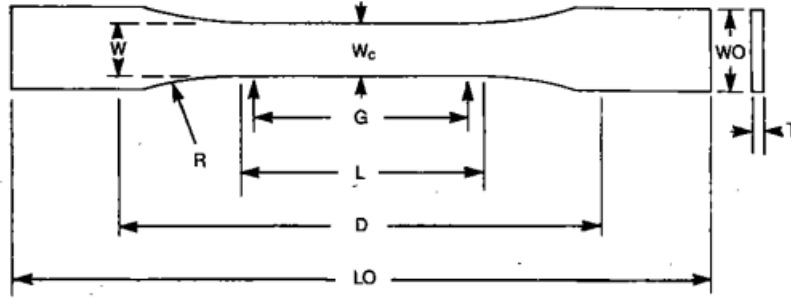


Figura 3.8: Probeta para ensayo de tracción. Fuente: Adaptado de [22].

Tabla 3.4: Dimensiones para probeta bajo ensayo de tracción.

Dimensiones [mm]	
W - Ancho de sección estrecha	13
L - Longitud de la sección reducida	57
WO - Ancho total	19
LO - Largo total	165
G - Longitud cuello	50
D - Distancia entre mordazas	115
R - Radio de filete	76
T - Espesor	7 o menos

Fuente: Adaptado de [22].

Resistencia a la tracción última

La resistencia a la tracción última (UTS) corresponde al máximo esfuerzo sostenido por una muestra durante el ensayo de tracción. Es un parámetro de ingeniería frecuentemente utilizado para el diseño de elementos frágiles, debido a que estos materiales generalmente casi no presentan deformación plástica. La fractura ocurre cerca del final de la curva lineal-elástica. La resistencia a la tracción nominal se define mediante la relación:

$$\sigma_{UTS} = \frac{F}{A_0} \quad (3.11)$$

donde:

σ_{UTS} : Resistencia a la tracción última (MPa).

F: Carga máxima aplicada perpendicularmente a la sección de la probeta (N).

A_0 : Área de la sección original de la probeta antes de aplicar la carga (mm^2).

3.11. Ensayo de Flexión: Norma ASTM D 790

El ensayo de flexión corresponde a la deformación que experimenta una probeta en forma de barra con sección rectangular o circular en dirección perpendicular a su eje longitudinal. La aplicación de carga puede ser de tres o cuatro puntos. En el punto de aplicación de la carga, la superficie superior está sometida a un estado de compresión, mientras la superficie inferior está sometida a tracción con un eje neutro sin deformación en el centro de la viga.

La norma ASTM D 790 describe métodos de ensayo para la determinación de propiedades en flexión para plásticos no reforzados y reforzados en barras rectangulares [23]. Los métodos de ensayo incluyen sistemas de tres y cuatro puntos de aplicación de carga. En el sistema de carga de tres puntos para una viga simplemente apoyada (ver Figura 3.9), la carga se aplica a mitad de los soportes. La tensión se calcula a partir del espesor de la probeta, el momento de flexión y el momento de inercia de la sección (ver Ecuación 3.12). Las propiedades determinadas por este ensayo son utilizadas para realizar control de calidad y especificaciones. Los resultados de esta prueba describen el comportamiento de un material a través de un diagrama esfuerzo-deformación, al igual que en la prueba de tracción (ver Figura 3.10).

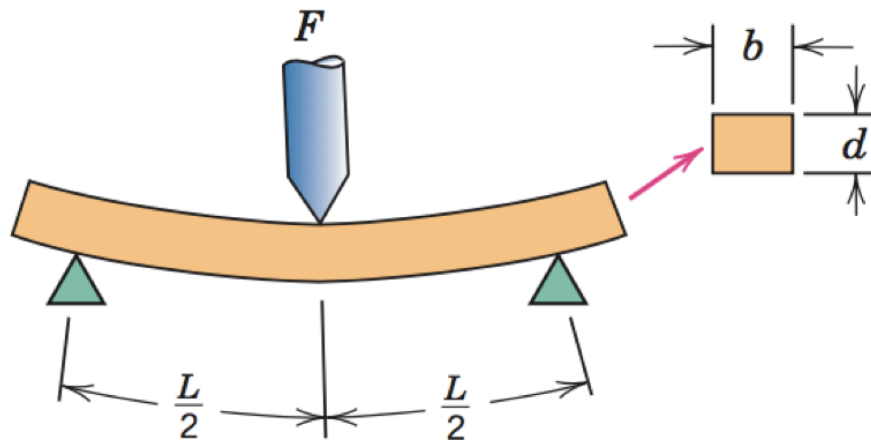


Figura 3.9: Sistema de carga de 3 puntos para ensayo de flexión. Fuente: Adaptado de [8].

$$\sigma_f = \frac{Mc}{I} \quad (3.12)$$

donde:

σ_f : Tensión (MPa).

M: Momento de flexión máximo (Nmm).

c: distancia desde el centro de la probeta a las fibras externas (mm).

I: Momento de inercia de la sección (mm^4).

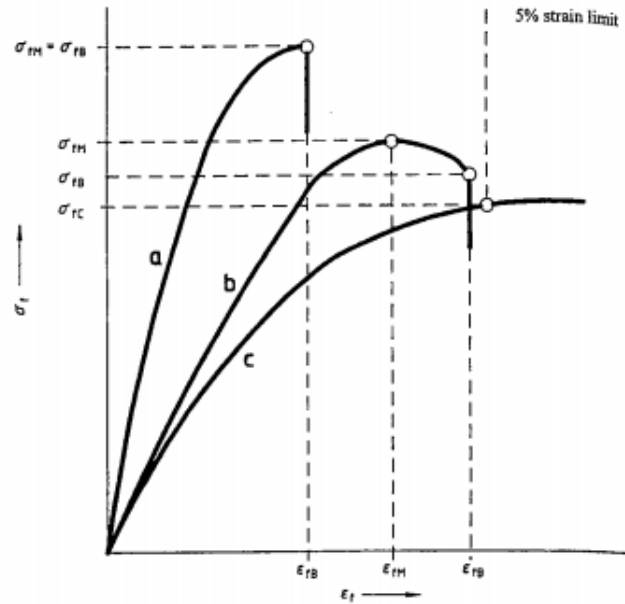


Figura 3.10: Curvas típicas esfuerzo-deformación en flexión. Curva a: Muestra que se rompe antes de la fluencia. Curva b: Muestra que presenta fluencia y luego rompe antes del 5% del límite de deformación. Curva c: Muestra que no presenta fluencia ni rompe antes del 5% del límite de deformación. Fuente: [23].

Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión o módulo de rotura (MOR) es el máximo esfuerzo en sostenido por una muestra durante un ensayo de flexión. Para el caso de probetas de sección rectangular es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.13)$$

donde:

σ_f : esfuerzo en la parte externa al punto medio, (MPa).

P: carga en el punto máximo en la curva carga-deflexión, (N).

b: ancho de la probeta ensayada, (mm).

d: espesor de la probeta ensayada, (mm).

L: distancia entre soportes o luz, (mm).

Módulo de elasticidad en flexión

Corresponde a la medida de resistencia a la deformación axial de la probeta cuando se la somete a una carga de dirección paralela a las fibras de la madera. Se determina como la pendiente de la zona lineal del gráfico carga-deformación por debajo del límite elástico.

$$E_f = \frac{PL^3}{4\delta bd^3} \quad (3.14)$$

donde:

E_f : Módulo de elasticidad en flexión, (GPa).

P: carga en el punto máximo en la curva carga-deflexión, (N).

δ : deflexión de la probeta a la carga P, (mm)

b: ancho de la probeta ensayada, (mm).

d: espesor de la probeta ensayada, (mm).

L: distancia entre soportes o luz, (mm)

3.12. Ensayo de impacto

Los ensayos de impacto se utilizan para caracterizar la fractura de los materiales ya que los ensayos de tracción muchas veces no pueden predecir el comportamiento a la fractura.

Para medir la energía de impacto (o tenacidad de entalla) se emplean los ensayos normalizados Charpy e Izod. En ambos la probeta tiene forma de barra de sección cuadrada, en la cual se mecaniza una entalla en forma de V (ver Figura 3.11(a)). La carga se aplica en forma de golpe con un péndulo que se deja caer desde una posición fija preestablecida de altura h . La probeta se coloca en la base. Al dejar caer el péndulo, este golpea y fractura la probeta a lo largo de la entalla, que actúa como un punto de concentración de tensiones. El péndulo continúa su oscilación, hasta una altura h' , menor que h (ver Figura 3.11). La pérdida de energía, es calculada a partir de la diferencia entre h y h' , representa la energía absorbida en el impacto y se calcula mediante la Ecuación 3.15. La diferencia entre ambos ensayos se encuentra en la manera en que se coloca la probeta (ver Figura 3.11(b)).

$$\tau = P(h - h') = Pl(\cos \beta - \cos \alpha)g \quad (3.15)$$

donde:

τ : energía empleada en la rotura (J).

P: masa del péndulo en (kg).

g: gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$)

h: altura inicial del péndulo (m)

h': altura final del péndulo (m)

l: es la longitud del péndulo (m).

α y β : ángulos que forma el péndulo con la vertical antes y después de soltarlo, respectivamente.

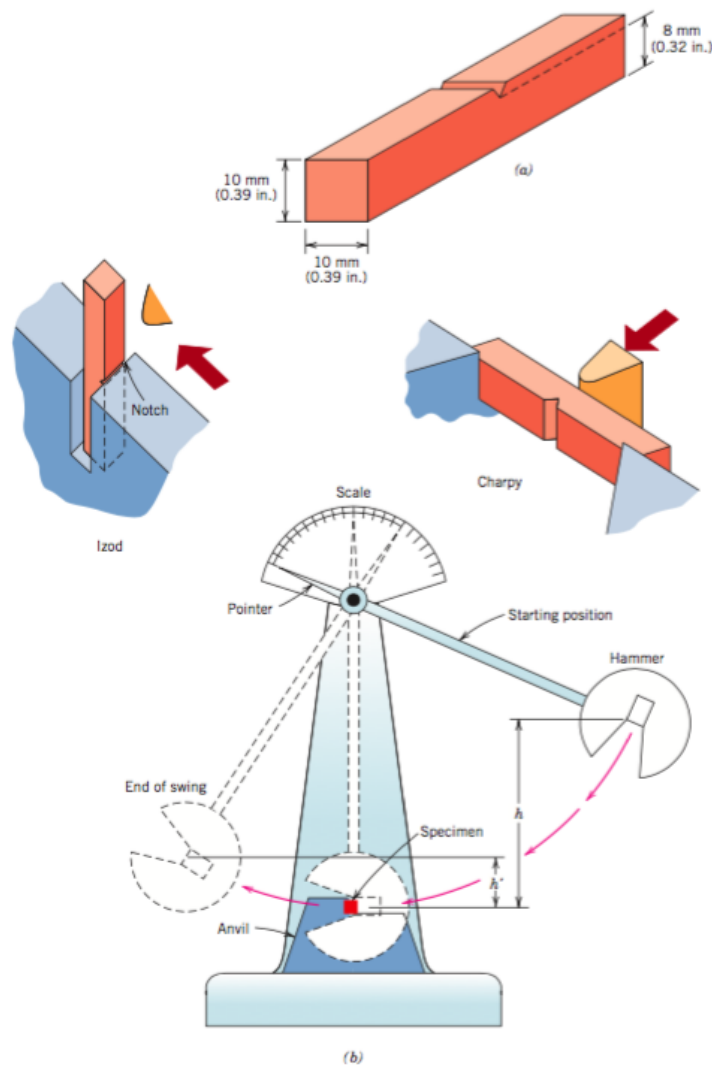


Figura 3.11: (a) Probeta utilizada para ensayos de impacto de Charpy e Izod. (b) Esquema del aparato para ensayos de impacto y posicionamiento de las probetas para ensayo Charpy e Izod. Fuente: [8].

3.13. Normas ASTM D 7031 y D 7032

La norma ASTM D 7031 [24] establece estándares para evaluar propiedades mecánicas y físicas para materiales compuestos de madera y plástico. Los WPCs están diseñados para utilizarse tanto en aplicaciones estructurales como no estructurales. Los métodos de ensayo que describe la norma ASTM D 7031 están dirigidos a productos fabricados a partir de madera virgen o reciclada y termoplásticos. Estos métodos proporcionan una referencia para la evaluación de varias propiedades mecánicas y físicas importantes para usos estructurales y no estructurales.

La norma ASTM D 7032 [25] en tanto describe estándares de especificación para calificar el desempeño de tableros, escalones y pasamanos fabricados con WPCs. El propósito de esta especificación es establecer las bases para el reconocimiento de estos productos o sistemas de aplicaciones exteriores. Las muestras a ensayar se seleccionarán de varias series de producción de un artículo determinado. Los productos serán muestreados en el sitio de fabricación por una agencia de inspección o laboratorio de pruebas acreditado. Las excepciones al muestreo en el lugar de fabricación, como en un almacén o centro de distribución, deben ser documentadas.

Para ambos casos las muestras a ensayar deben ser representativas dentro de la población a evaluar y dentro de las posibles variaciones debidas a cambios en las materias primas y las variables del proceso a lo largo del tiempo. El tamaño de una muestra depende de la propiedad a estimar, de la variación real en la propiedad que se produce en la población y de la precisión con la que se va a estimar la propiedad. Entre las propiedades consideradas se encuentran: contenido de humedad, gravedad específica, expansión térmica, biodegradación, módulo de rotura, módulo de elasticidad, degradación por rayos ultravioleta (UV); entre otras.

3.14. Microscopía electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un instrumento que permite obtener información procedente de la superficie de la muestra. El procedimiento consiste en barrer un haz de electrones acelerados sobre alguna el área que se desee caracterizar. Este haz se focaliza sobre la superficie de la muestra realizando el barrido de la misma siguiendo una trayectoria de líneas paralelas. La región atacada dependerá del aumento que se le entregue.

De la interacción del haz incidente y la muestra, las más significativas corresponden a las de electrones retrodispersados y secundarios. Los primeros son electrones del haz incidente que colisionaron átomos de la muestra y han sido reflejados. Los electrones secundarios se producen como resultado de interacciones entre electrones de elevada energía del haz (primarios) y los electrones de la banda de conducción del sólido, dando lugar a la expulsión de estos electrones con energías de unos pocos electronvolts. Los electrones secundarios son los que se utilizan comúnmente en la formación de imágenes SEM. La intensidad de ambas emisiones varía en función del ángulo que forma el haz incidente con la superficie del material. Estas interacciones son captadas por un detector que amplifica la señal y luego genera la imagen.

Capítulo 4

Resultados y Discusiones

La sección de resultados incluye la procedimiento de preparación de las probetas, la realización de ensayos mecánicos. La preparación de las probetas abarca desde la selección de los materiales hasta la construcción de las mismas. Tanto para el ensayo de tracción, flexión e impacto se ensaya un número de 5 probetas por cada concentración de aserrín estudiada.

Luego de la realización de los ensayos se procede al estudio de las propiedades mecánicas determinadas a partir de estos, con el fin de encontrar relaciones entre las propiedades y el contenido de relleno en la matriz.

4.1. Preparación de probetas

La preparación de las probetas consta del proceso de selección de los materiales a utilizar, el tratamiento del refuerzo (previo a la fabricación del compuesto), la preparación del material compuesto y por último, la fabricación de las probetas.

4.1.1. Materiales

Polímero

Se utiliza una resina de poliéster insaturado (UP) de tipo ortoftálica, Palatal 53-46-B, preacelerada con 1 [mL] Octoato de Cobalto (1% de Co) en estireno (CoB1), adicionados por 100 [g] de resina. El material es suministrado por Basf Chile. Como catalizador se utiliza un Peróxido de Metiletilcetona (MEK), Butanox M-50. La dosificación utilizada para el catalizador es de 6 [g] de MEK por cada 1.000 [g] de resina, dosificación correspondiente para una temperatura de 25 [°C]; con esto se espera un tiempo de gel de aproximadamente 25 [min]. Los materiales proporcionados de muestran en la Figura 4.1.

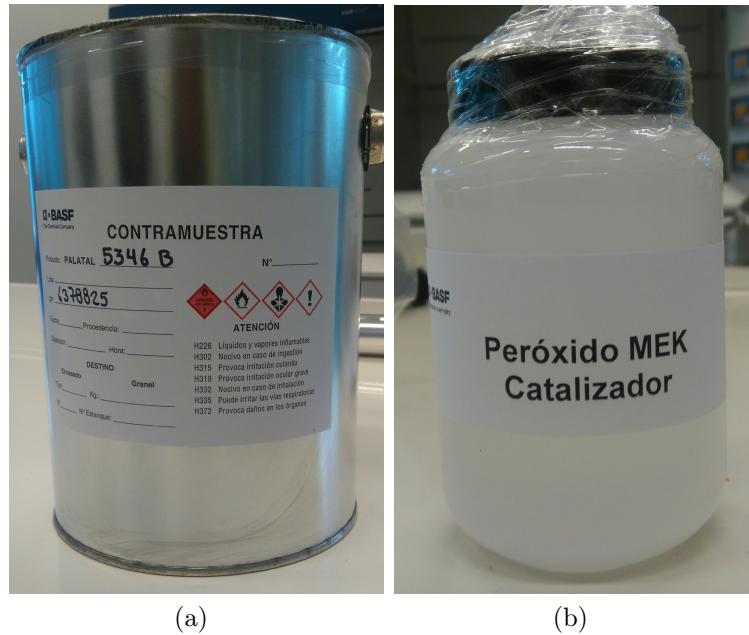


Figura 4.1: (a) Resina de Poliéster insaturado. (b) Catalizador. Fuente: Elaboración propia.

Refuerzo

Se emplea aserrín de Pino Oregón de densidad $0,42 \text{ g/cm}^3$ [26]. El refuerzo es suministrado por el Departamento de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción. En la Figura 4.2 se muestra parte del material entregado.



Figura 4.2: Aserrín de Pino Oregón (refuerzo). Fuente: Elaboración propia.

Para caracterizar el material de refuerzo se utiliza la técnica de tamizaje, la cual fue realizada en el laboratorio de Catálisis del Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. El procedimiento consiste pasar una cantidad de aserrín, mediante agitación manual, a través de una serie de tamices de distintos tamaños (ver Figura 4.3), colocados unos sobre otros. Los tamices son ordenados partiendo con el de mayor abertura y en la base se coloca el de abertura menor.



Figura 4.3: Tamices. Fuente: Elaboración propia.

La agitación se realiza por un tiempo de 5 [min]. Luego de esto se realiza un pesaje de las partículas retenidas en cada fracción de tamaño (f_a). Con esto se determina el porcentaje acumulado sobre la malla para cada tamiz (F_u), que corresponde a la cantidad de material que atraviesa la malla.

Los resultados obtenidos mediante tamizaje se presentan en la Tabla 4.1. La caracterización del aserrín se representa mediante la curva granulométrica (Figura 4.4) y la curva de distribución sobre tamaño (Figura 4.5), que representan el porcentaje acumulado en cada malla y la fracción retenida en cada tamaño, respectivamente.

Tabla 4.1: Distribución del tamaño de partículas

Malla (μm)	f_a (g)	F_u (g)	F_u (%)
600	0	3,051	100
500	0,439	2,612	86
425	0,399	2,213	73
200	1,540	0,673	22
75	0,523	0,15	5
53	0,150	0	0

Fuente: Elaboración propia

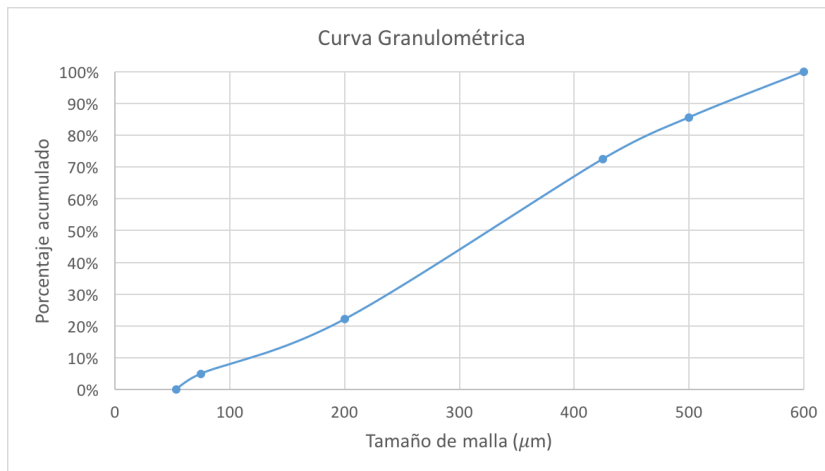


Figura 4.4: Curva granulométrica para el aserrín. Fuente: Elaboración propia.

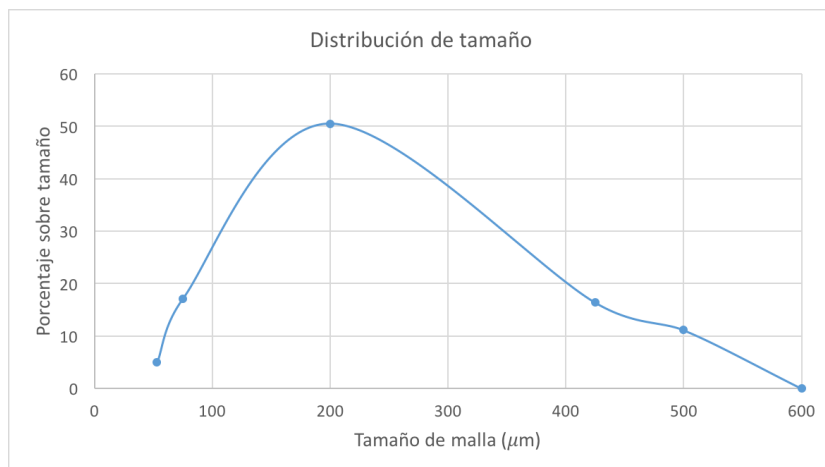


Figura 4.5: Distribución de tamaño para el aserrín. Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados del tamizaje se determina que el 80% de las partículas se encuentra sobre los 200 μm ; es más, el 50% de las partículas se encuentra concentrada en un tamaño sobre los 200 μm y bajo los 425 μm , que se considera su tamaño representativo.

4.1.2. Preparación del Refuerzo

Previo a la fabricación del material compuesto, el aserrín es sometido a un tratamiento térmico con el propósito de disminuir su contenido humedad. El tratamiento consiste en secar el aserrín en un horno a una temperatura de 80 °C por 24 [h] (ver Figura 4.6). El material luego es guardado en un envase hermético. El equipo utilizado corresponde a una cámara de secado marca Binder Serie FD perteneciente al Laboratorio de Fluidodinámica.

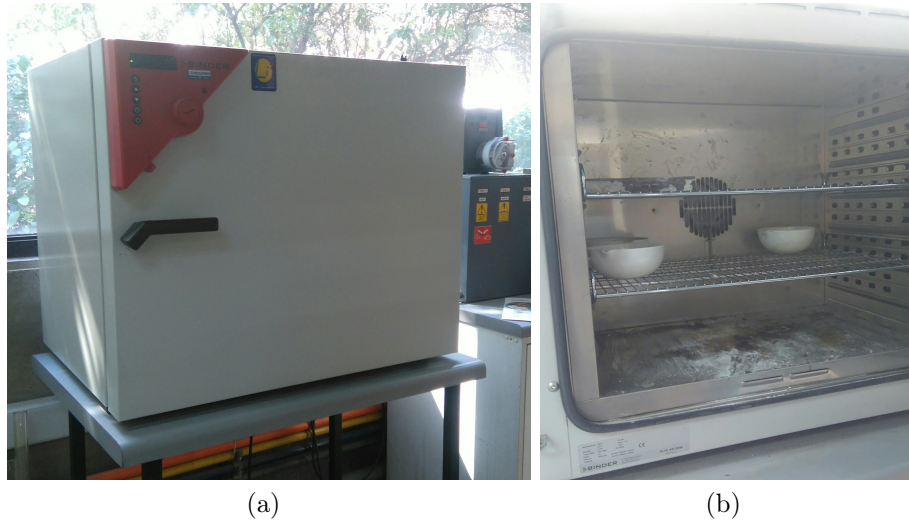


Figura 4.6: (a) Cámara de secado. (b) Interior. Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Preparación del Compuesto

Las probetas se fabrican con concentraciones en porcentaje peso-peso [% p/p] de 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % respecto al contenido de refuerzo. Esto se realiza en el Laboratorio de Materiales Poliméricos de IDIEM. Son preparadas en moldes de caucho y su dimensionamiento se realiza según las normas ASTM D-638, para tracción (ver sección 3.10) y ASTM D-790, para flexión (ver sección 3.11).

El método de preparación sigue los siguientes pasos:

1. Con una balanza se determina la cantidad de aserrín.
2. Del mismo modo, se determina la cantidad de resina y catalizador a utilizar.
3. Ambos materiales son mezclados en un envase y luego el contenido es vaciado al molde.
4. Transcurrido el tiempo de gel, las probetas son desprendidas de los moldes.
5. Las probetas se dejan curar a temperatura ambiente por 24 h.

La forma de las probetas para el ensayo de tracción se muestran en la Figura 4.7, las probetas para el ensayo de flexión se muestran en la Figura 4.8 y las probetas para el ensayo de impacto en la Figura 4.9.

El máximo porcentaje de aserrín queda fijado en 20 % p/p ya que a concentraciones mayores no fue posible realizar el proceso de mezclado; posiblemente el compuesto alcanza su concentración crítica y comienza a comportarse como un fluido no newtoniano.

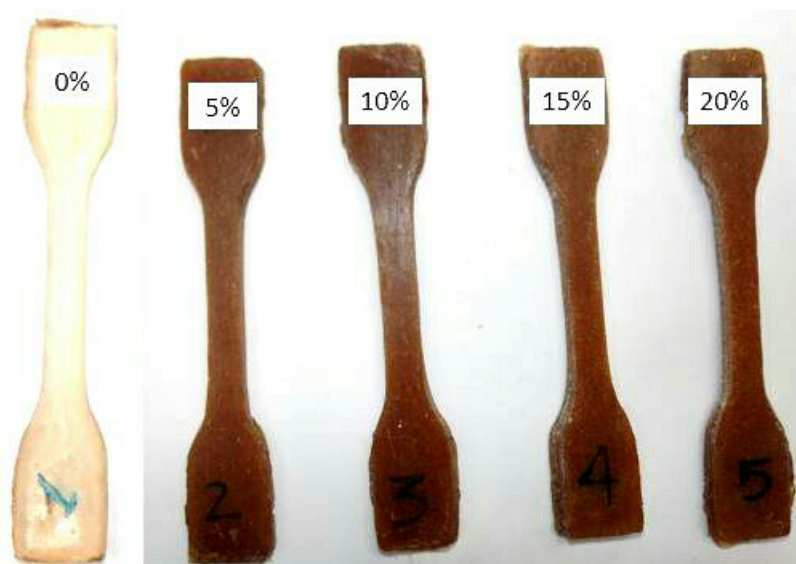


Figura 4.7: Probetas para ensayo de tracción. Fuente: Elaboración propia.

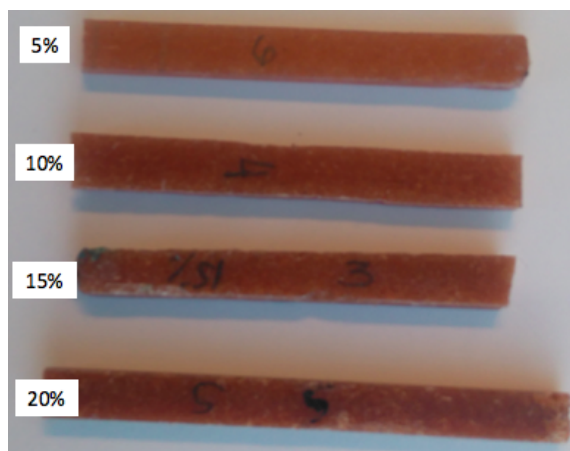


Figura 4.8: Probeta para ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.

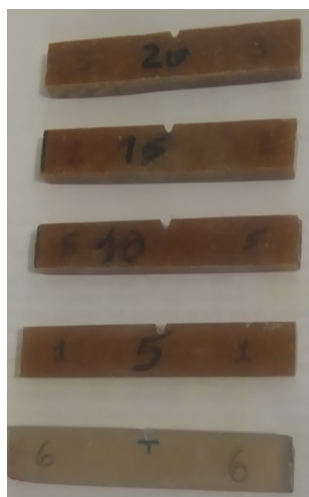


Figura 4.9: Probeta para ensayo de impacto. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Ensayos Mecánicos

4.2.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en la deformación de una probeta a través de un estiramiento uniaxial hasta su ruptura, proceso que se realiza a velocidad constante. Durante el transcurso del ensayo la máquina registra la deformación frente a la tensión aplicada. En este trabajo el ensayo de tracción se realiza de acuerdo a la norma ASTM D-638 (ver sección 3.10).

El procedimiento para la realización del ensayo es el siguiente:

1. Se mide el ancho y espesor de la probeta con un pie de metro en diferentes puntos a lo largo de su sección. Como medidas se escogen las de menor valor.
2. Se coloca la probeta en la máquina de ensayo y se sujeta con las mordazas (ver Figura 4.10a).
3. Los datos de espesor y ancho se introducen en el computador que controla el equipo.
4. Se selecciona la velocidad de ensayo. De acuerdo con la norma ASTM D-638, esta velocidad corresponde a 5 [mm/min].
5. Se da comienzo al ensayo: La mordaza superior avanza según la velocidad indicada, provocando la deformación de la probeta hasta romperse (ver Figura 4.10b).

Las dimensiones de las probetas ensayadas se indican en el Apéndice A.

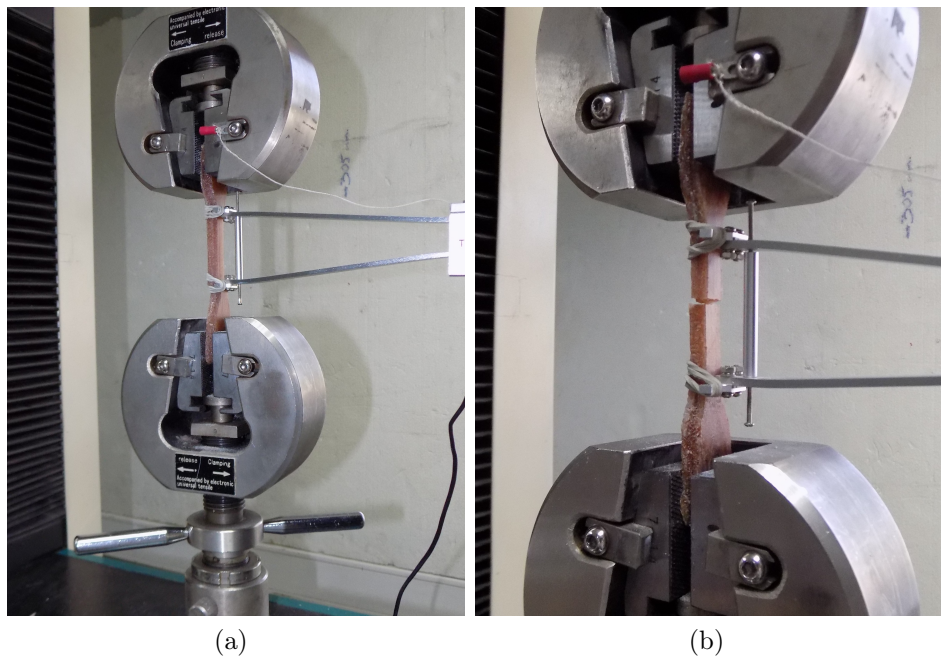


Figura 4.10: Ensayo de tracción. Fuente: Elaboración propia.

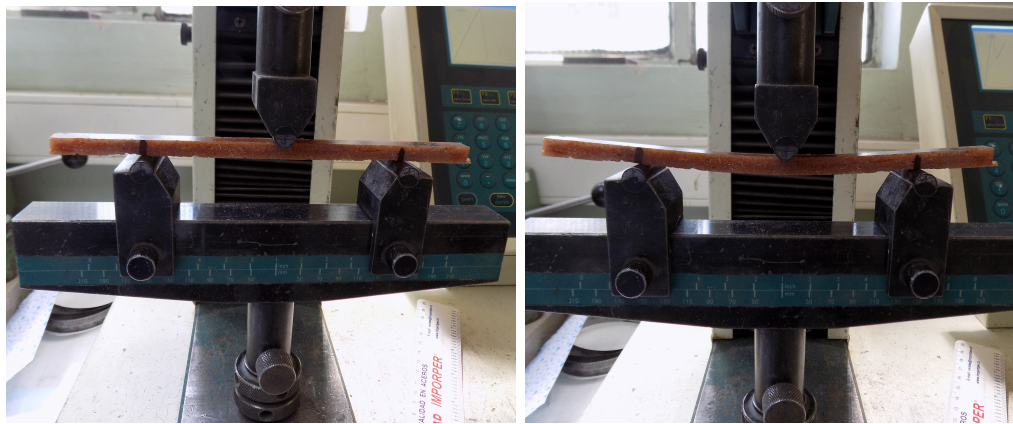
4.2.2. Ensayo de flexión de tres puntos

El ensayo de flexión corresponde a la deformación que experimenta una probeta en dirección perpendicular a su eje longitudinal. Los resultados de esta prueba describen el comportamiento de un material a través de un diagrama esfuerzo-deformación, al igual que en la prueba de tracción. Para este trabajo el ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM D-790 (ver sección 4.8).

El procedimiento para realizar el ensayo es el siguiente:

1. Se mide el espesor y ancho de la probeta con un pie de metro.
2. Se ajusta la separación de los soportes según dada por la luz de la probeta. Según la norma ASTM D-790 la luz corresponde a 16 veces el espesor de la muestra.
3. Se posiciona la probeta sobre los apoyos.
4. Se ajusta la carga para quedar apenas tocando la probeta (ver Figura 4.11a).
5. Se ingresa la velocidad de ensayo. En este caso 2,5 [mm/min].
6. Se comienza el ensayo: La carga avanza según la velocidad indicada perpendicularmente a la longitud de la probeta hasta su ruptura (ver Figura 4.11b).

Las dimensiones de las probetas ensayadas en flexión se indican en el Apéndice C.



(a)

(b)

Figura 4.11: Ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Ensayo de impacto

El ensayo de impacto se utiliza para caracterizar la fractura de los materiales a partir de sus mecanismos de absorción de energía durante este. Para este trabajo el ensayo las probetas se realizan de acuerdo a la norma ASTM D-256 [27].

Antes de todo experimento con las probetas se mide el blanco, es decir, la energía disipada por el péndulo producto del roce con el aire. El procedimiento para realizar el ensayo es el siguiente:

1. Se mide el espesor y ancho de la probeta con un pie de metro.
2. Se posiciona la probeta sobre los apoyos.
3. Se corrobora la separación de los soportes ajustando la muesca a la mitad de la luz de la probeta. Para las probetas utilizadas, la luz corresponde a 40 mm (ver Figura 4.12a).
4. Se ajusta el péndulo hasta su posición inicial (ver Figura 4.12b).
5. Se suelta el péndulo para que impacte la probeta y luego se aplica el freno.
6. La máquina indica inmediatamente la energía absorbida en el impacto (J).

Las dimensiones de las probetas ensayadas se presentan en el Apéndice E.

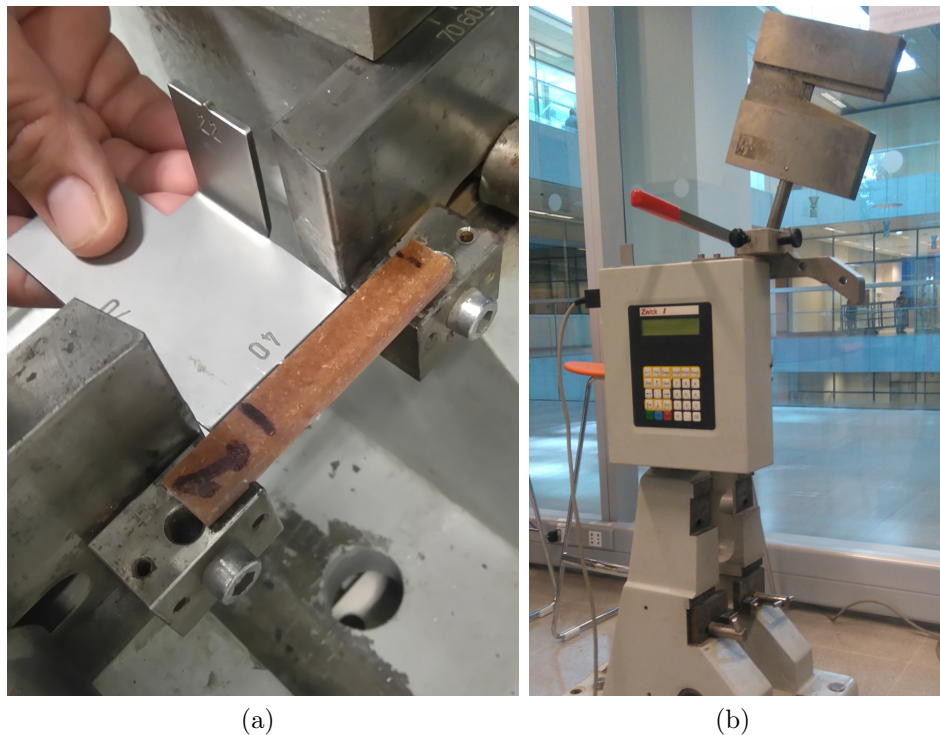


Figura 4.12: Ensayo de impacto. Fuente: Elaboración propia

4.3. Resultados experimentales

En esta sección se describen las propiedades mecánicas obtenidas partir de los ensayos de tracción, flexión e impacto para las muestras fabricadas a partir de resina de poliéster y aserrín. Estos resultados son discutidos y comparados con la literatura pertinente.

4.3.1. Tracción

La Tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos de probetas en tracción a distintas concentraciones de aserrín. En primer lugar, se observa que la resistencia a la tracción es mayor para las muestras fabricadas solo con resina que para el caso de los compuestos. Una explicación para esto es que, durante la polimerización, la resina forma una red tridimensional de enlaces covalentes que le dan estabilidad; luego, al estar entrelazados por medio de enlaces covalentes, estos materiales tienen resistencias relativamente altas, módulos elásticos y rigidez para materiales plásticos [21].

Tabla 4.2: Resistencia a la tracción para diferentes concentraciones de aserrín

Contenido de aserrín [% p/p]	Resistencia a la tracción [MPa]
Resina sola - 0	$30,08 \pm 0,69$
5	$23,28 \pm 0,83$
10	$14,65 \pm 0,57$
15	$17,66 \pm 0,25$
20	$14,99 \pm 0,99$

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los materiales compuestos, la resistencia disminuye con el contenido de aserrín. El máximo valor se obtiene para un 5 % p/p de relleno. Las probetas con un contenido de 10 % p/p tienen un valor inferior a la tendencia mostrada por las otras probetas; esto puede ser indicio de una mala adhesión entre la matriz y el refuerzo producto de una mala preparación de las muestras.

Los resultados obtenidos para la resistencia a la tracción se presentan gráficamente en la Figura 4.13; donde, se descarta utilizar el promedio hallado para una probeta de 10 % p/p de aserrín, puesto que no sigue la tendencia de las otras probetas. Recordando lo señalado por Pukanszky et al. [12], existen dos factores que influyen en el comportamiento del compuesto: (i) el decrecimiento de carga efectiva en la sección transversal y (ii) la interacción entre polímero y refuerzo. A partir de esto, plantea un modelo de tipo exponencial para el comportamiento en tracción, presentado en la ecuación 3.10. En la Figura 4.13 se realiza una regresión de tipo exponencial, tal como propone Pukanszky en su modelo. La regresión entrega un coeficiente R^2 de 0,87, indicando que los datos tienen un comportamiento semejante al modelo señalado por Pukanszky.

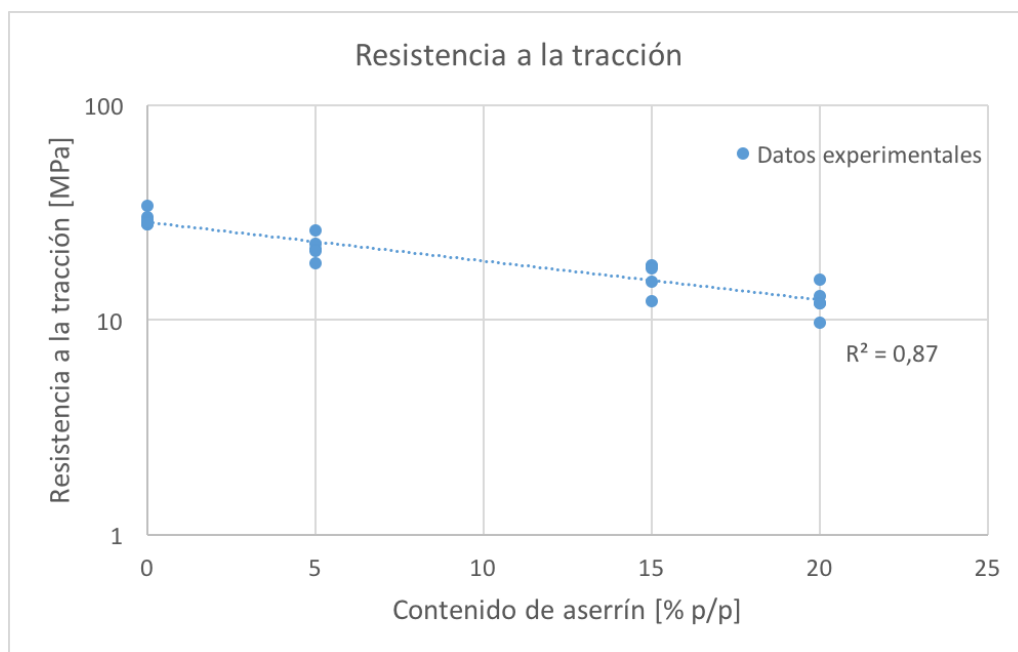


Figura 4.13: Resistencia a la tracción Fuente: Elaboración propia

La resistencia a la tracción depende principalmente de las fuerzas de adhesión interfacial. Al aumentar el contenido de aserrín en las muestras, el refuerzo tiende a formar agregados dentro de la matriz. Estos enlaces físicos entre partículas son débiles, lo que hace más fácil la ruptura de la probeta durante el ensayo de tracción. Además, los rellenos de forma irregular, como el aserrín, tienen menor capacidad para soportar tensiones, siendo estas transferidas a la matriz. Luego, la resistencia a la tracción disminuye conforme aumenta el contenido de aserrín.

4.3.2. Flexión

Durante el ensayo de flexión para materiales compuestos, existen tres factores que determinan la resistencia a la flexión: (i) La resistencia a la flexión de la matriz, (ii) la adhesión entre rellenos y la matriz y (iii) la adherencia del relleno con sí mismo, que depende del tipo y forma del relleno [21]. Los dos últimos factores afectan la resistencia original de la matriz y actúan distribuyendo la fuerza aplicada sobre el área de la sección transversal del compuesto ensayado.

La Tabla 4.3 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de flexión para la resistencia a la flexión (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE). Similar a la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión disminuye para todas las concentraciones de aserrín; en este caso se obtienen resultados inferiores al 50 % inferior en comparación al material sin relleno. Entre las probetas con algún contenido de aserrín, la máxima resistencia a la tracción se obtuvo para un 5 % p/p con un valor de 31,26 MPa; sin embargo, la diferencia porcentual entre las muestras con aserrín es de un 1 % y el valor medio de cada una de ellas se encuentra dentro del margen de las mismas, por lo tanto, no se observa una variación significativa del MOR

para las probetas con aserrín. Una posible causa es que la interferencia entre las partículas de aserrín es tan alta que no se ven varianzas entre las concentraciones y que contenidos mayores no interfieren en este comportamiento.

Tabla 4.3: Propiedades en flexión para diferentes concentraciones de aserrín

Contenido de aserrín [% p/p]	MOR [MPa]	MOE [GPa]
0 (Resina sola)	74,64 ± 2,1	2,33 ± 0,07
5	31,26 ± 1,9	2,37 ± 0,06
10	27,22 ± 1,2	2,38 ± 0,08
15	30,11 ± 1,7	2,25 ± 0,04
20	30,06 ± 1,3	2,71 ± 0,03

Fuente: Elaboración propia

En el caso del módulo de elasticidad, se observa que, para todos los casos con contenido de aserrín, el MOE aumenta en comparación al caso sin refuerzo; comportamiento que también es reportado en la literatura [28]. El máximo valor para el MOE se obtiene para un contenido de aserrín de 20 % p/p con un valor de 2,71 GPa, que alcanza un 16 % sobre el valor de la resina pura. En los contenidos inferiores a este, el aumento respecto al caso base es cercano a un 3 %; indicando que la rigidez no presenta cambios importantes hasta contenidos de 20 % p/p.

El comportamiento experimental del módulo de elasticidad es comparado con los resultados experimentales de Núñez et al. [20] y se presentan en la Figura 4.14.

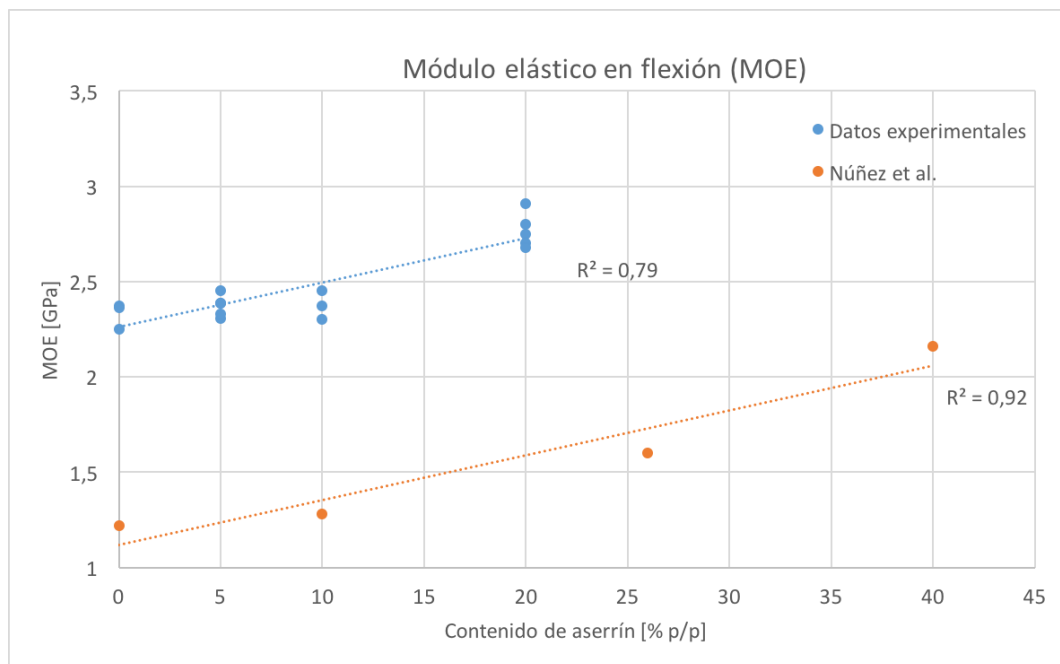


Figura 4.14: Módulo de elasticidad en flexión. Fuente: Elaboración propia

Se observa que los resultados muestran una tendencia similar al estudio realizado por Núñez et al. para PP y aserrín; donde el módulo elástico en flexión aumenta con el contenido de aserrín. La razón para este comportamiento es que, como las partículas de relleno utilizadas son más rígidas que la matriz polimérica, un mayor contenido de aserrín aumenta la rigidez en el material compuesto.

4.3.3. Impacto

Los resultados de las pruebas de impacto para distintas concentraciones de aserrín se presentan en la Tabla 4.4, donde se observa que, en todos casos, la resistencia al impacto aumenta con respecto al caso de resina pura. Una explicación para esto es la presencia de mecanismos de absorción de energía adicionales que dificultan la propagación de la grieta. El valor máximo se obtuvo para un contenido de aserrín de un 5 % p/p, alcanzando un de $4,01 \text{ kJ}/m^2$; alcanzado el máximo, el material se vuelve más rígido y la resistencia al impacto disminuye.

Tabla 4.4: Resistencia al impacto para diferentes concentraciones de aserrín

Contenido de aserrín [% p/p]	Resistencia al impacto [kJ/m^2]
Resina sola - 0	$1,96 \pm 0,26$
5	$4,01 \pm 0,11$
10	$2,48 \pm 0,21$
15	$1,83 \pm 0,08$
20	$2,15 \pm 0,18$

Fuente: Elaboración propia

Los resultados se presentan gráficamente en la Figura 4.15, donde se observa que resultado presenta un similar al mostrado en la Figura 3.6 de la sección de Antecedentes. La resistencia máxima al impacto alcanzada es probablemente el resultado de la combinación de diferentes procesos de deformación que compiten entre sí, influenciados por interacciones entre polímero-relleno y partícula-partícula [29].

La literatura además [20] indica dos posibles causas de la disminución en la resistencia al impacto alcanzado el máximo: una indica que, considerando las partículas como pequeñas fibras, a mayor concentración de relleno, la cantidad de extremos de fibras aumenta, lo que podría causar iniciación de grietas (ya que los extremos soportan menos carga), lo que provocaría la fractura; otra razón puede ser la aglomeración de partículas para altos contenidos de aserrín, que crea regiones con concentración de esfuerzos que requieren menos energía para iniciar la propagación de la grieta.

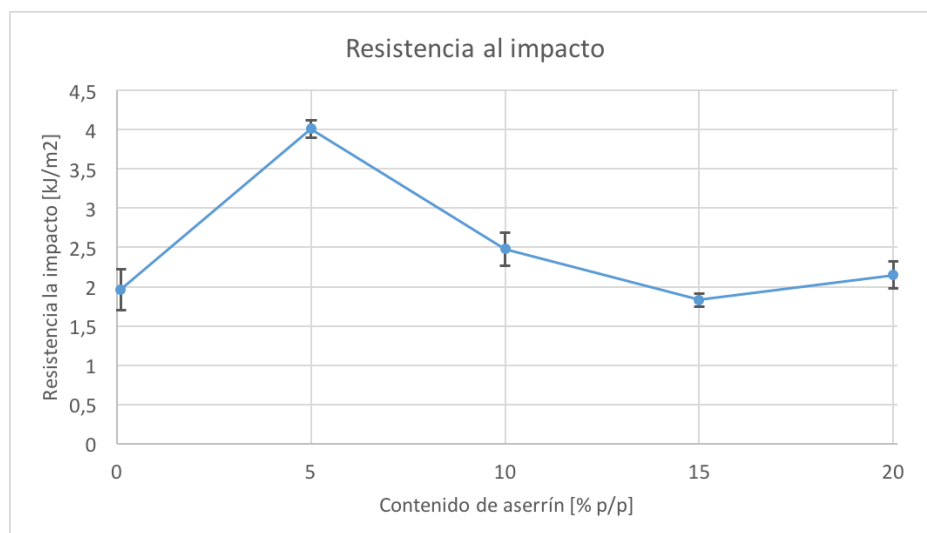


Figura 4.15: Resistencia al impacto. Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Resumen de propiedades mecánicas

En la Tabla 4.5 se presentan los valores promedios obtenidos en las distintas pruebas a las que fueron sometidas las probetas, donde las propiedades son normalizadas al dividir por la densidad de cada muestra. En general la búsqueda de materiales tiene como objetivo encontrar el material con mejor propiedad a la menor densidad posible. Las densidades son calculadas utilizando la ecuación 3.5. Los resultados muestran que la probeta con una concentración de 5 % p/p presenta las mejores respuestas a los ensayos de tracción y al impacto; mientras que la probeta a una concentración de 20 % p/p muestra la mejor respuesta al ensayo de flexión.

Tabla 4.5: Resumen de propiedades mecánicas

% p/p	Tracción	Flexión		Impacto
	Resistencia a la tracción [MPa/ ρ]	MOR [MPa/ ρ]	MOE [GPa/ ρ]	Resistencia al impacto [kJ/m ² / ρ]
0	27,34	67,85	2,12	1,79
5	22,88	31,49	2,33	3,94
10	15,47	27,44	2,51	2,62
15	19,96	33,75	2,54	2,07
20	18,04	36,18	3,26	2,59

Fuente: Elaboración propia.

Si bien los resultados de la Tabla 4.5 no son del todo diferentes a lo concluido en tablas anteriores (Tabla 4.2, 4.3 y 4.4), sí se puede señalar lo siguiente: para lograr un material compuesto que tenga mejor respuesta a la tracción e impacto, debería prepararse con bajos contenidos de aserrín (5 % p/p); mientras que, para elaborar un material con mejor respuesta a la flexión, debería considerarse una mayor concentración de aserrín (20 % p/p) en su fabricación.

4.4. Morfología

En esta sección se presenta la morfología para el aserrín y la superficie de fractura en tracción para muestras representativas del ensayo, las cuales corresponden a: resina pura, un compuesto con contenido de aserrín de 5 % p/p y otra con contenido de 15 % p/p; estos casos son observados con un microscopio SEM de la Facultad de Odontología. Además, se incluye el caso de una muestra con contenido de aserrín de 10 %, muestras que fueron descartadas en el análisis de resultados en tracción puesto que se desviaba de la tendencia.

La Figura 4.16 muestra la micrografía SEM de la superficie del aserrín utilizado. Es posible determinar que se trata de un material heterogéneo formado por partículas anisotrópicas, (Figura 4.16a) y rugosas. Con un aumento mayor se aprecia que el aserrín está formado por capas laminares (Figura 4.16b).

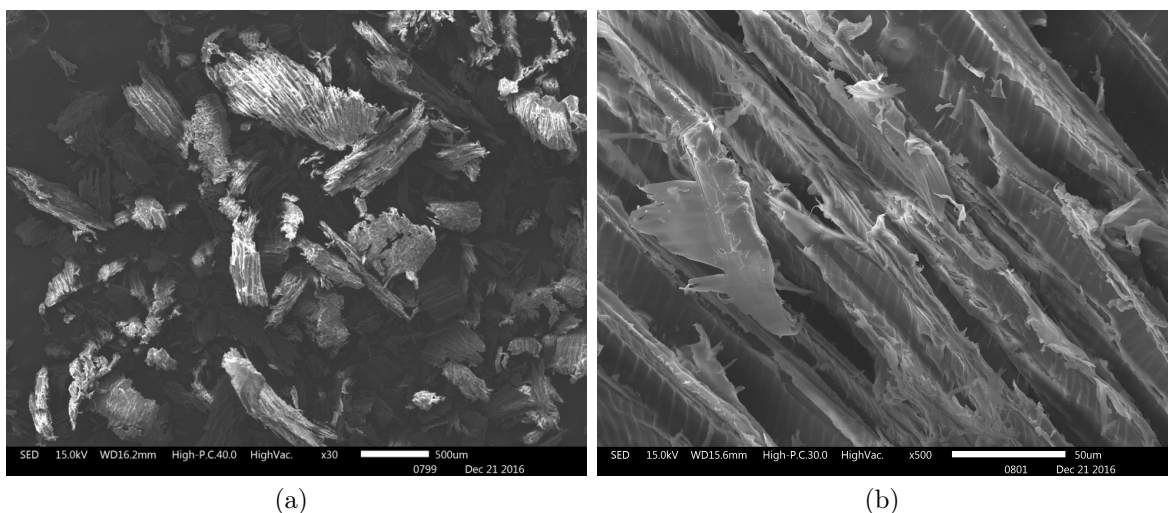


Figura 4.16: Morfología para el aserrín (a) 30x. (b) 500x. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.17 muestra la morfología de la superficie de fractura para una probeta de resina ensayada a tracción. En ella se observa un material homogéneo y uniforme (Figura 4.17a), con un comportamiento característico y esperado para polímeros frágiles; por ejemplo, la presencia del inicio alrededor de una zona con crestas radiales (Figura 4.17b), producto del crecimiento rápido de la grieta y que se propagan en el plano original de su crecimiento [30] y que comienzan a bifurcar en los distintos planos cristalográficos (Figura 4.17c) con una fractura transgranular de baja deformación plástica.

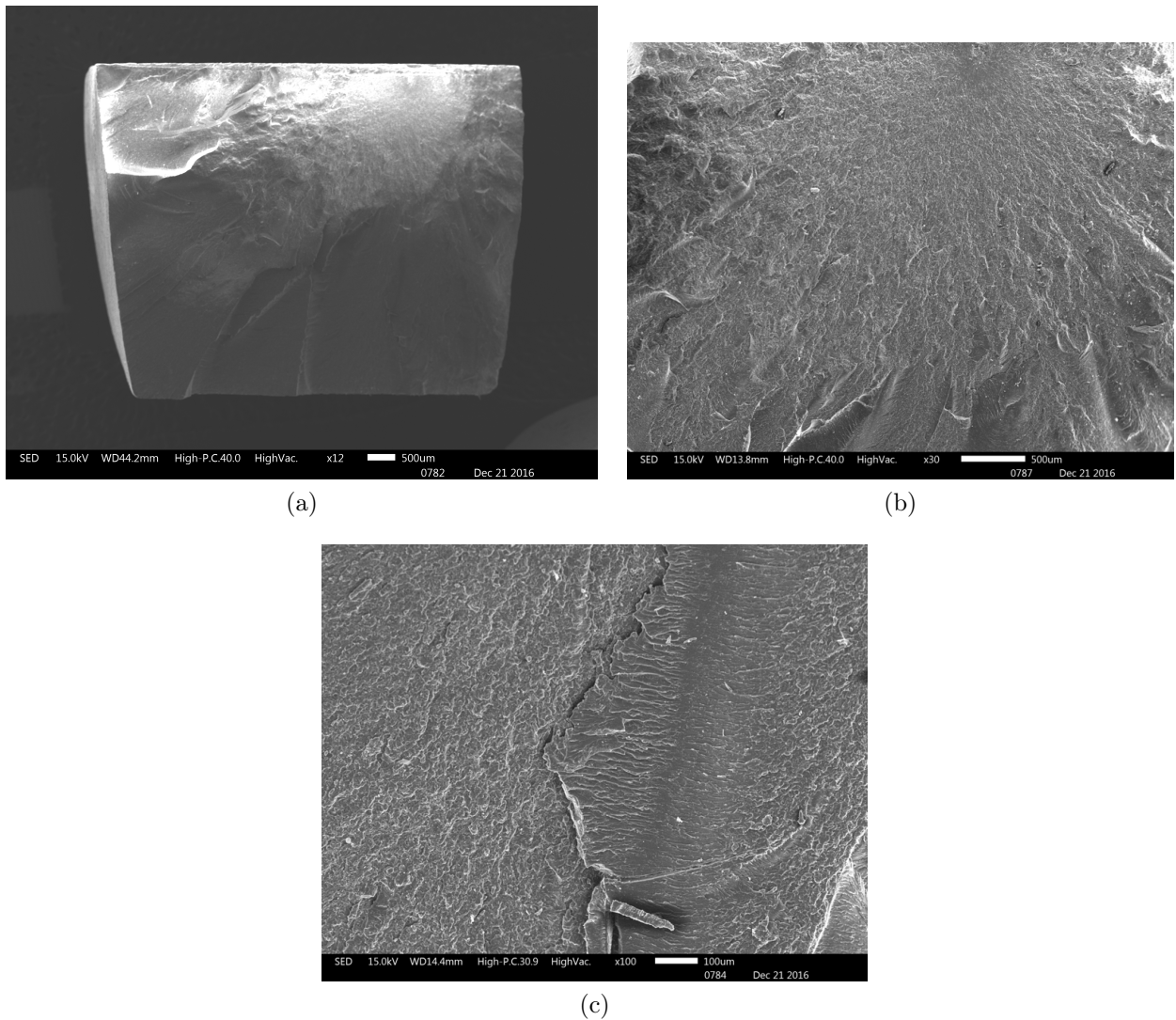


Figura 4.17: Fractura de resina en tracción (a) superficie de fractura, 12x; (b) bifurcación de grietas, 30x; (c) fractura transgranular 100x. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.18 presenta la morfología de la superficie de fractura para una probeta con contenido de aserrín de 5 % p/p ensayada en tracción. En ella también se presenta una fractura frágil y se hacen evidentes algunos defectos, zonas con pequeñas burbujas producto del mezclado (Figura 4.18a) y se observa una pérdida de homogeneidad en la superficie producto de la adición del refuerzo (ver Figura 4.18b). El análisis de la cantidad de burbujas mediante el software Imagej indica que estas representan un 1 % de la superficie total. Junto a lo anterior, se aprecia arrancamiento de aserrín (Figura 4.18c). La literatura indica que el aserrín puede tener tendencia a aglomerarse en zonas, con aparición de espacios en la interfase entre ambos materiales producto de una escasa adherencia de la matriz y el refuerzo [31].

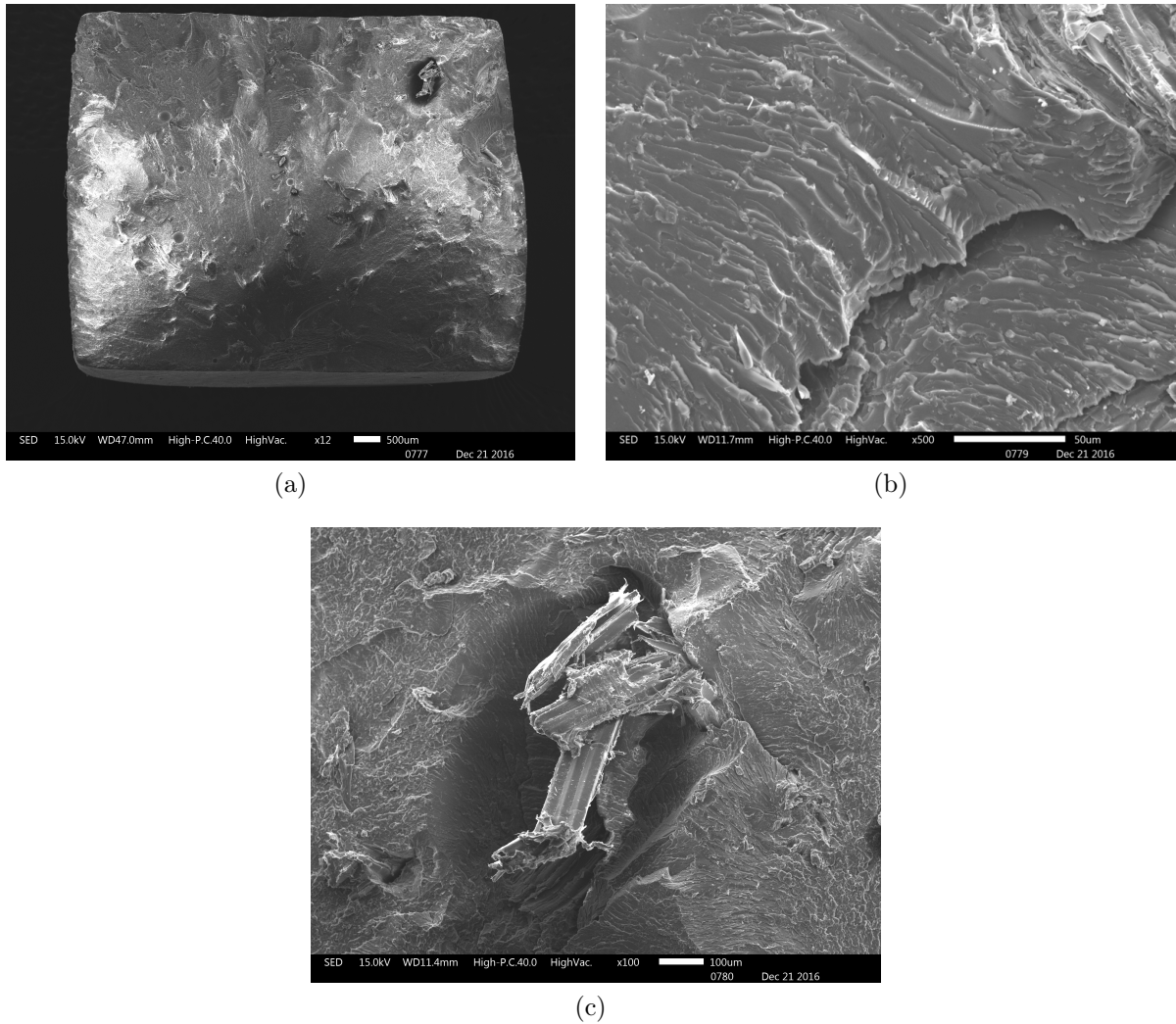


Figura 4.18: Fractura de compuesto con contenido de aserrín de 5 % p/p en tracción (a) superficie de fractura, 12x; (b) detalle de superficie, 500x; (c) zona de arranque, 100x.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.19 presenta la superficie de fractura para una probeta con contenido de aserrín de 15 % p/p. En esta muestra los defectos ya encontrados, tales como burbujas, agujeros y falta de homogeneidad en la superficie del material aumentan en comparación con la muestra de 5 % p/p. En la Figura 4.19b se observan burbujas y agujeros de distinto tamaño y zonas con acumulación de aserrín. Utilizando el software Imagej, la cantidad de burbujas representan cerca de un 10 % de la superficie total, lo cual se traduce en una pérdida del área efectiva durante la tracción. También se hacen presente zonas con arranque de aserrín (Figura 4.19c), al igual que en el caso anterior.

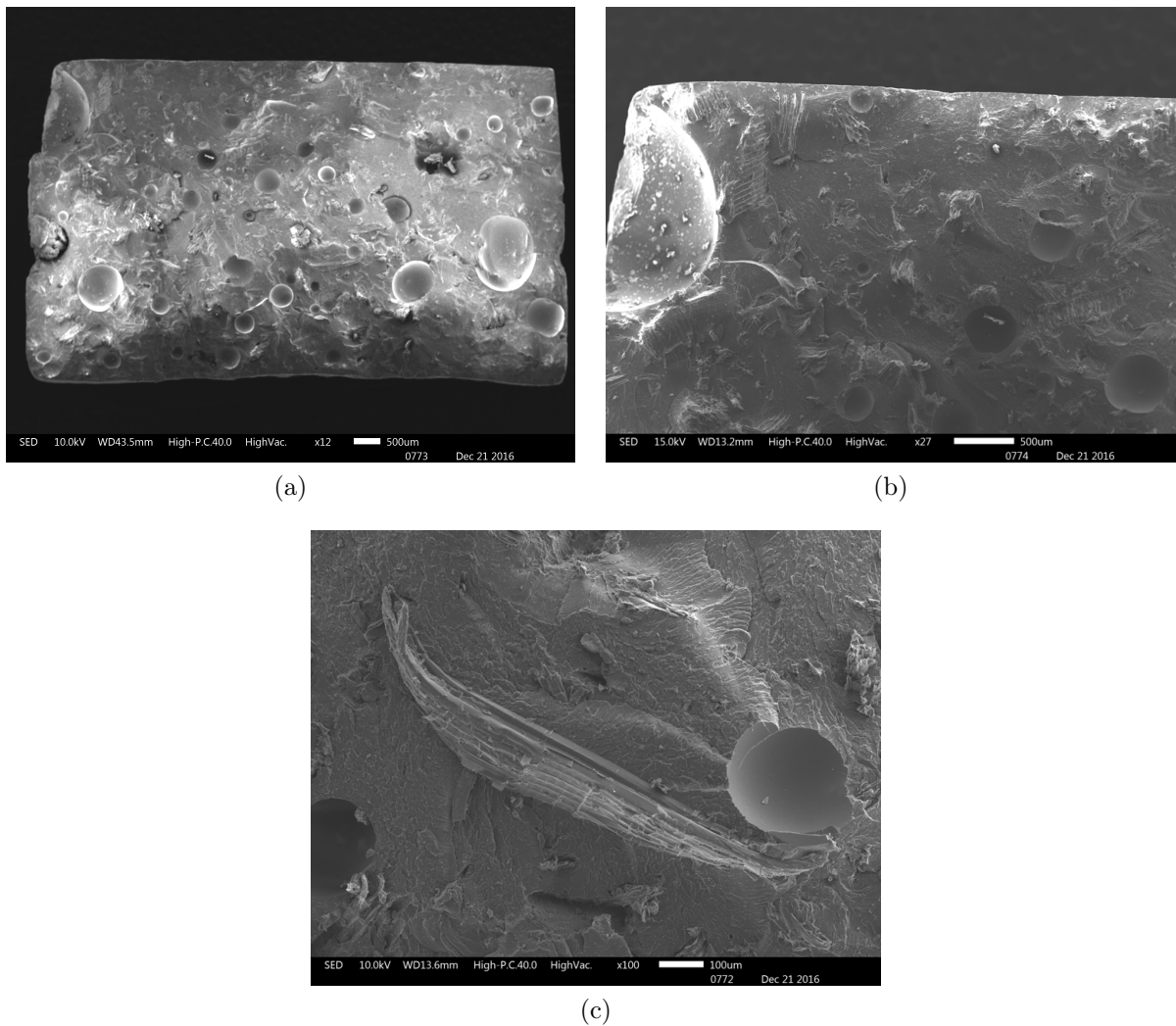


Figura 4.19: Fractura de compuesto con contenido de aserrín de 15 % p/p en tracción (a) superficie de fractura, 12x; (b) detalle de superficie, 27x; (c) zona de arranque, 100x.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se incluye la Figura 4.20 muestra una probeta de 10 % p/p de aserrín, considerado un caso especial ya que estas probetas se desviaron de la tendencia dentro del ensayo de tracción, en comparación al resto de concentraciones de aserrín estudiadas. Claramente se observa una probeta con mayores imperfecciones que las mostradas en los casos anteriores. Se encuentran un mayor número de agujeros y burbujas en comparación al caso con 15 % p/p (Figura 4.19a) de aserrín, llegando a representar un 15 % de la superficie. Además la discontinuidad del material es más notoria, presentando mayores zonas con concentración de aserrín (Figura 4.20b). Las deficiencias mostradas complementan el hecho de que la resistencia a la tracción en efecto fue menor a la tendencia esperada en comparación al resto y da sustento a la elección de eliminarlo del análisis.

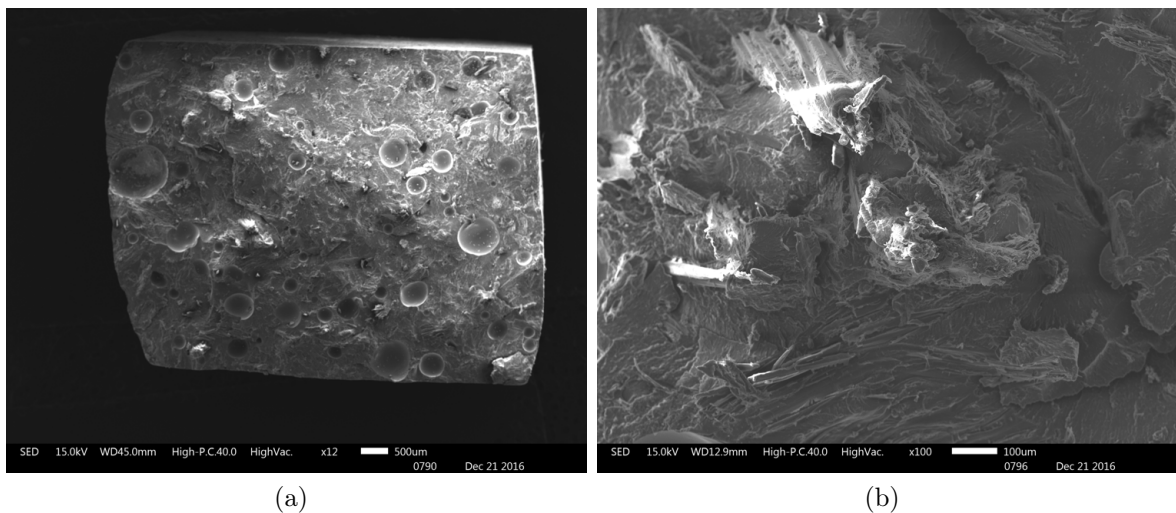


Figura 4.20: Fractura de compuesto con contenido de aserrín de 10 % p/p en tracción (a) superficie de fractura, 12x; (b) detalle de superficie, 100x; Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5

Conclusiones

A partir del ensayo de tracción se determina la resistencia a la tracción a distintas concentraciones. Los resultados muestran que a mayor contenido de aserrín la resistencia a la tracción disminuye en comparación a las probetas fabricadas solamente con resina, debido a la disminución del área efectiva y de la adhesión entre matriz-refuerzo. La máxima resistencia a la tracción para probetas con contenido de aserrín se obtiene para una concentración de 5 % p/p con una resistencia máxima de 23,28 MPa, que llega a ser un 20 % superior al resto de las concentraciones de aserrín estudiadas.

En flexión se estudia la resistencia a la flexión (o módulo de rotura) y el módulo de elasticidad en flexión. La resistencia disminuye para todas las concentraciones en comparación al caso de resina pura. La mayor resistencia a la flexión con contenido de aserrín se obtuvo para una concentración de 5 % p/p con un valor de 31,26 MPa. El módulo de elasticidad aumenta en comparación al caso de resina pura y este se incrementa conforme aumenta el contenido de aserrín en las probetas, indicando que el material se vuelve más rígido. El máximo módulo en este caso se obtiene para una concentración de 20 % p/p con un valor de 2,71 MPa.

En los ensayos de impacto se obtuvo que la resistencia al impacto es superior en todos los casos en comparación al caso de probetas fabricadas solo con resina, indicando que la presencia de aserrín aumenta la capacidad del material para absorber energía. La máxima resistencia al impacto se obtiene para un contenido de aserrín de un 5 % p/p, con un valor de 4,01 kJ/m².

Las propiedades estudiadas fueron comparadas con la literatura y, en todos los casos, se tiene que una tendencia similar a lo reportado en otros estudios.

Considerando todas las propiedades estudiadas, se encuentra que, dentro de los compuestos con algún contenido de aserrín, existen dos contenidos a considerar en la fabricación dependiendo de la propiedad que se quiera mejorar: para un concentración baja (5 % p/p), destaca la resistencia a la tracción e impacto; además, la morfología muestra una superficie más homogénea y con poca presencia de burbujas. Por otro lado, a concentraciones mayores (20 % p/p), se aprecian mejores propiedades en flexión.

Los resultados del análisis de la superficie de fractura muestran que la adición de partículas a la resina produce una pérdida de homogeneidad en la matriz. El aserrín tiende a aglomerarse y puede producir zonas de arranque al momento de traccionar el material. El aumento del contenido de aserrín fomenta la aglomeración de este y también la formación de burbujas; estas últimas producto de la dificultad del mezclado a contenidos de aserrín superiores. La mayor presencia de imperfecciones cuanto mayor es el contenido de aserrín, sostiene el hecho de que la resistencia a la tracción haya disminuido.

Si bien todas las probetas son preparadas utilizando la misma metodología, aún así existe la posibilidad de que se obtengan probetas irregulares. Se hace necesario independizar la fabricación, con el fin de minimizar errores y poder llevar la fabricación a nivel industrial. Una opción para esto es utilizar equipos mezcladores y compresores que presen las muestras con el fin de eliminar burbujas y agujeros, como se presenta en la literatura [21].

Finalmente, este trabajo corresponde a una exploración del comportamiento de un material compuesto a distintas concentraciones de partículas; se puede utilizar como punto de partida para posteriormente realizar un estudio técnico y económico, con el fin obtener un contenido adecuado de concentración que permita ser utilizado como material en distintos proyectos.

Bibliografía

- [1] R. Rowell, *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, Second Edition*. CRC Press, sep 2012.
- [2] P. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition (Mechanical Engineering)*. CRC Press, 2007.
- [3] D. U. Shah, “Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts,” *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 62, pp. 21–31, 2014.
- [4] N. S. Ali and B. M. Fahad, “Effect of Particle Size of Sawdust on Behaviour of Sawdust / UPE Composites in Water,” *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 59–65, 2015.
- [5] CORMA, Corporación Chilena de la Madera, “Producción y Consumo,” 2015. [Online]. Available: <http://www.corma.cl/perfil-del-sector/productos/produccion-y-consumo>
- [6] G. Soto and M. Núñez, “Fabricación de pellets de Carbonilla, usando aserrín de Pinus radiata (D. Don), como material aglomerante,” *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 10, no. 2, pp. 129–137, 2008.
- [7] L. Mohammed, M. N. M. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, and M. S. Islam, “A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications,” *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, pp. 1–15, 2015.
- [8] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering : an introduction*. Reverté, 2006.
- [9] Plástiquímica, “Resinas de Poliéster y Viniléster.” [Online]. Available: <http://www.plastiquimica.cl/pdf/Resinas{ }Poliester{ }y{ }Vinilester.pdf>
- [10] S. K. Mital, P. L. Murthy, and R. K. Goldberg, “Micromechanics for particulate-reinforced composites,” *Mechanics Of Composite Materials And Structures An International Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 251–266, 1997.
- [11] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, *Engineering materials 1 : An introduction to properties, applications, and design*. Butterworth-Heinemann, 2005.
- [12] B. Pukansky, F. Tudos, J. Jancar, and J. Kolarik, “The possible mechanisms of polymer-filler interaction in polypropylene-CaCO₃ composites,” *Journal of Materials Science Let-*

- ters, vol. 8, pp. 1040–1042, 1989.
- [13] S. N. Monteiro, F. P. D. Lopes, A. S. Ferreira, and D. C. O. Nascimento, “Natural-fiber polymer-matrix composites: Cheaper, tougher, and environmentally friendly,” *JOM*, vol. 61, no. 1, pp. 17–22, jan 2009.
 - [14] K. Pickering, M. A. Efendy, and T. Le, “A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83, pp. 98–112, 2016.
 - [15] S. Joshi, L. Drzal, A. Mohanty, and S. Arora, “Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 3, pp. 371–376, 2004.
 - [16] M. Y. Hashim, M. N. Roslan, A. M. Amin, A. Mujahid, and A. Zaidi, “Mercerization Treatment Parameter Effect on Natural Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite : A Brief Review,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 6, no. 8, pp. 1638–1644, 2012.
 - [17] E. Trombetta, T. Flores-Sahagun, and K. G. Satyanarayana, “Evaluation of polypropylene/saw dust composites prepared with maleated polypropylene (mapp) produced by reactive extrusion,” *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 15, no. 2, pp. 309–318, 2010.
 - [18] K.-S. Rahman, M. Islam, M. Rahman, and M. Hannan, “Flat-pressed wood plastic composites from sawdust and recycled polyethylene terephthalate (PET): physical and mechanical properties,” *SpringerPlus*, vol. 2, no. 1, p. 629, 2013.
 - [19] N. E. Marcovich, A. N. Ostrovsky, M. I. Aranguren, and M. M. Reboredo, “Resin-Sisal and Wood Flour Composites Made from Unsaturated Polyester Thermosets,” *Composite Interfaces*, vol. 16, no. 7-9, pp. 639–657, 2009.
 - [20] A. J. Nuñez, P. C. Sturm, J. M. Kenny, M. I. Aranguren, N. E. Marcovich, and M. M. Reboredo, “Mechanical characterization of polypropylene-wood flour composites,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 88, no. 6, pp. 1420–1428, 2003.
 - [21] A. J. F. Al-omairi, “Investigation of Some Mechanical Properties of Sawdust and Chopped Reeds / UPE Composites,” Ph.D. dissertation, University of Baghdad, 2011.
 - [22] ASTM International, “ASTM D 638 - 03: Standard test method for tensile properties of plastics,” pp. 46–58, 2003.
 - [23] ASTM, “ASTM D 790 - 02: Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials,” pp. 146–154, 2002.
 - [24] ASTM International, “ASTM D 7031 - 11: Standard Guide for Evaluating Mechanical and Physical Properties of Wood- Plastic Composite Products,” pp. 1–8, 2011.
 - [25] ASTM, “ASTM D 7031 - 05: Standard Specification for Establishing Performance Ratings for Wood-Plastic Composite Deck Boards and Guardrail Systems (Guards or Han-

- drails),” pp. 1–10, 2005.
- [26] J. Díaz-Vaz, H. Cuevas, A. Fernandez, and L. Inzunza, “Características tecnológicas de pseudotsuga menziesii creciendo en valdivia,” *Bosque*, vol. 9, no. 2, pp. 97–101, 1988.
- [27] ASTM, “ASTM D256 - 04: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics,” pp. 1–20, 2004.
- [28] R. Rotheron, *Particulate-filled polymer composites*. iSmithers Rapra Publishing, 2003.
- [29] B. Pukánszky, “Particulate filled polypropylene: structure and properties,” in *Polypropylene Structure, blends and Composites*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1995, pp. 1–70.
- [30] J. Gao, J. Li, B. C. Benicewicz, S. Zhao, H. Hillborg, and L. S. Schadler, “The mechanical properties of epoxy composites filled with rubbery copolymer grafted SiO₂,” *Polymers*, vol. 4, no. 1, pp. 187–210, 2012.
- [31] W. Fu, X. Xu, and H. Wu, “Mechanical and biodegradable properties of L-lactide-grafted sisal fiber reinforced polylactide composites,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 33, no. 22, pp. 2034–2045, 2014.

Apéndice

Apéndice A

Espesor y ancho de probetas para ensayo de tracción

Tabla A.1: Espesor y ancho de probetas para ensayo de tracción

N°	Espesor [mm]	Ancho [mm]
Contenido de aserrín: 0 %		
1	6,17	10,82
2	6,57	9,38
3	7,24	9,40
4	6,80	8,34
5	6,74	9,99
Contenido de aserrín: 5 %		
1	6,75	9,58
2	6,71	8,60
3	7,36	9,77
4	7,34	9,62
5	6,88	9,30
Contenido de aserrín: 10 %		
1	6,94	10,33
2	6,53	10,39
3	6,68	10,79
4	7,44	10,66
5	6,95	10,90

Fuente: Elaboración propia.

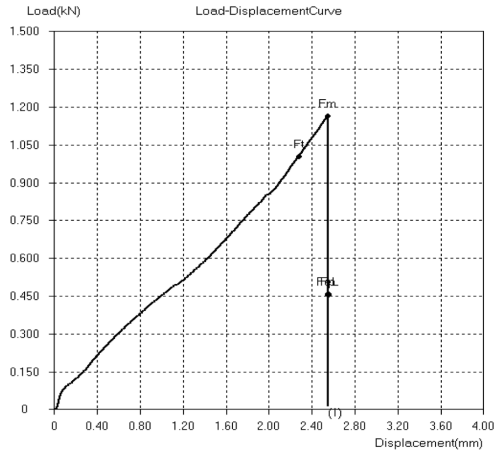
Tabla A.1: Espesor y ancho de probetas para ensayo de tracción (continuación)

Nº	Espesor [mm]	Ancho [mm]
Contenido de aserrín: 15 %		
1	7,02	8,86
2	6,81	9,73
3	7,17	9,71
4	6,67	9,87
5	6,30	8,07
Contenido de aserrín: 20 %		
1	6,02	9,90
2	6,30	8,88
3	6,21	9,11
4	6,98	9,49
5	6,57	9,72

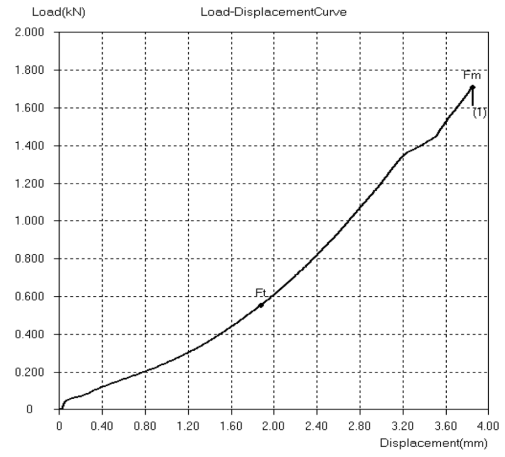
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice B

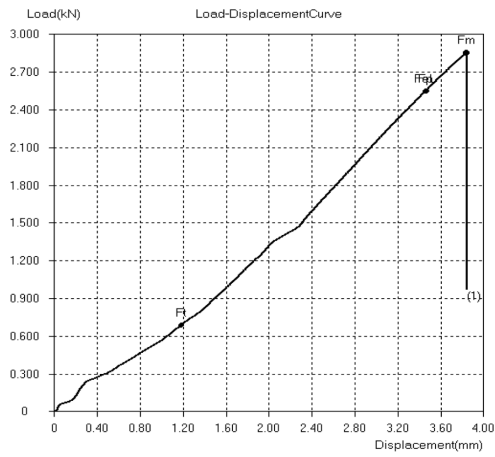
Diagrama carga-desplazamiento para ensayo de tracción



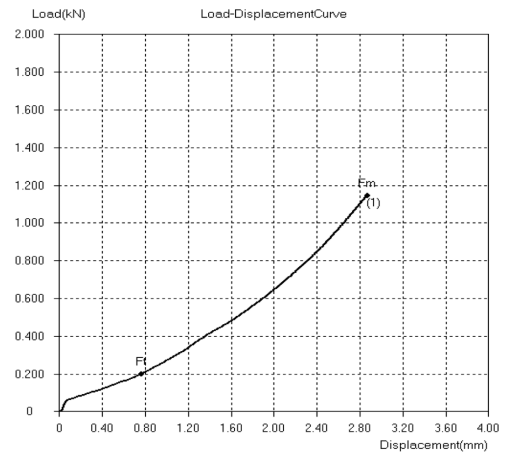
(a)



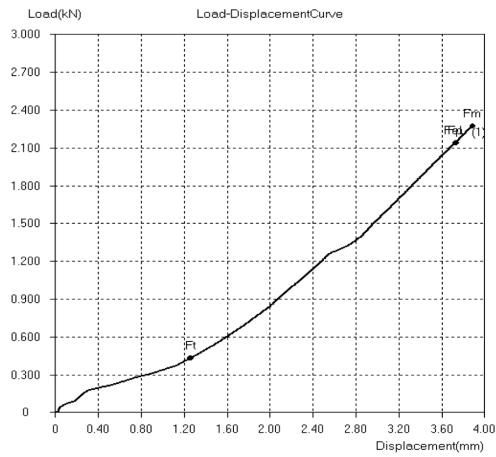
(b)



(c)

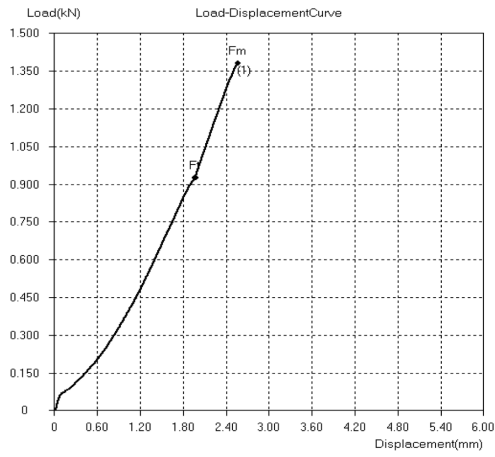


(d)

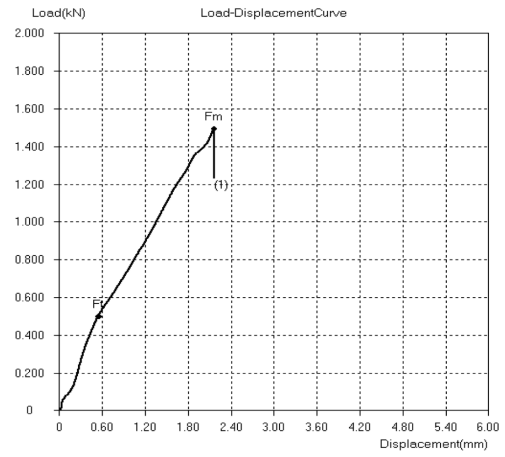


(e)

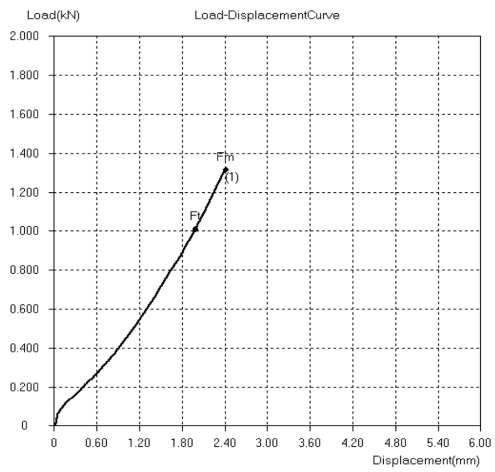
Figura B.1: Curva carga-desplazamiento para ensayo de tracción. Contenido de aserrín: 0%.
Fuente: Elaboración propia.



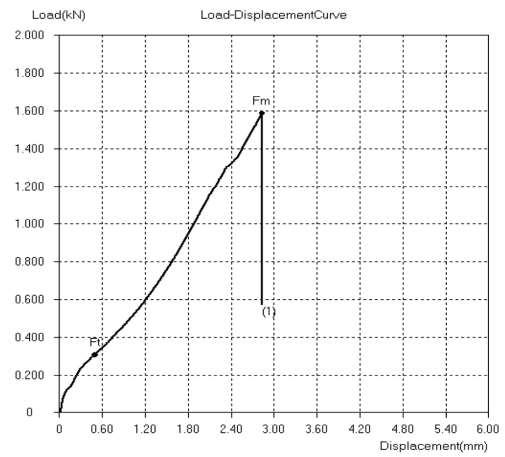
(a)



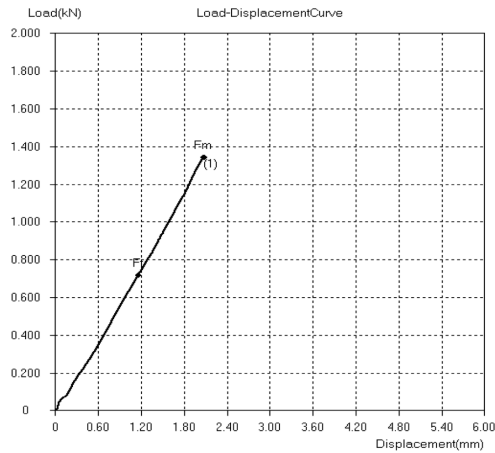
(b)



(c)

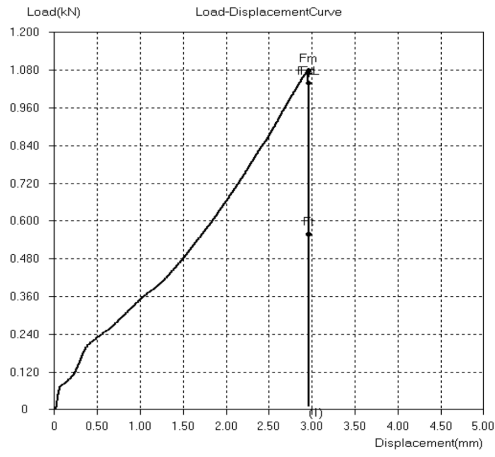


(d)

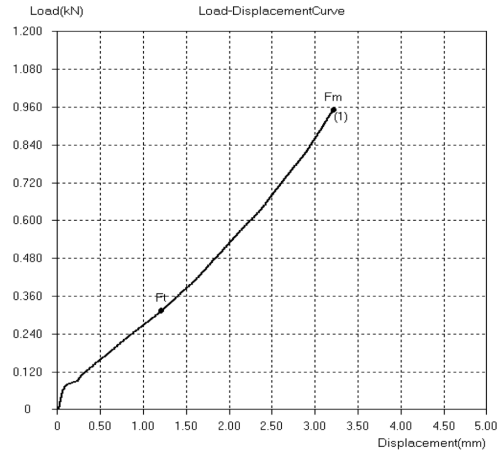


(e)

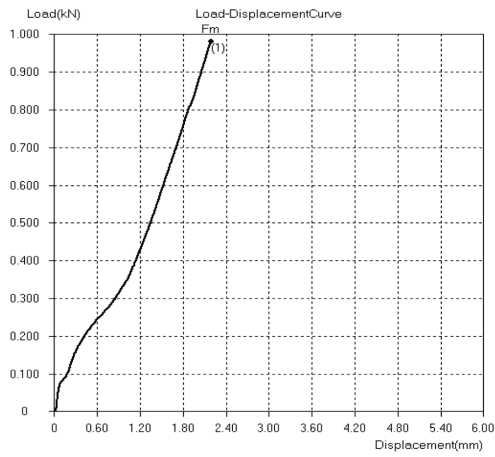
Figura B.2: Curva carga-desplazamiento para ensayo de tracción. Contenido de aserrín: 5%.
Fuente: Elaboración propia.



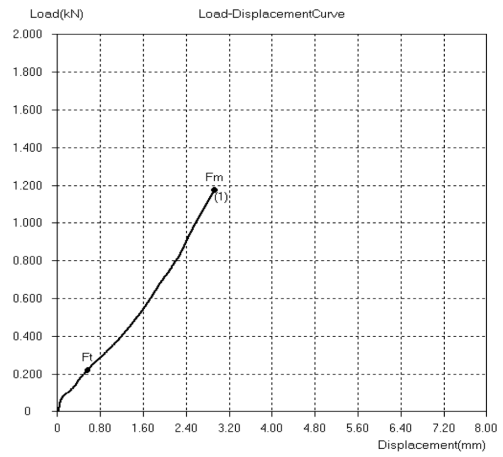
(a)



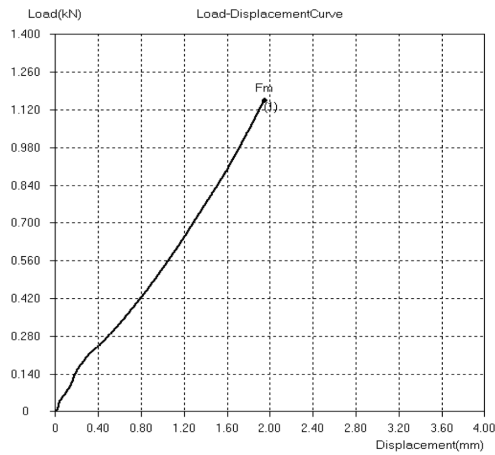
(b)



(c)

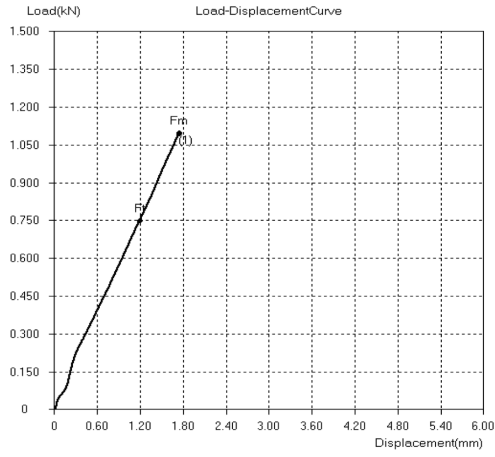


(d)

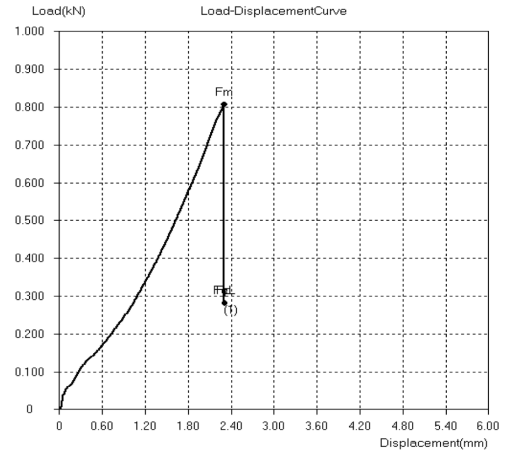


(e)

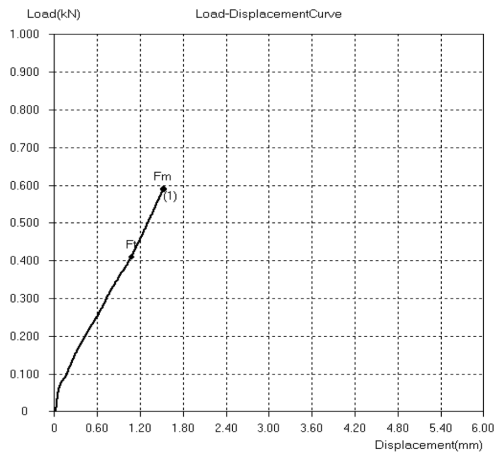
Figura B.3: Curva carga-desplazamiento para ensayo de tracción. Contenido de aserrín: 10%. Fuente: Elaboración propia.



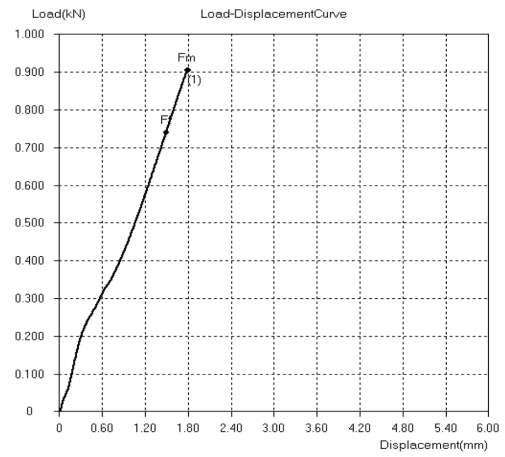
(a)



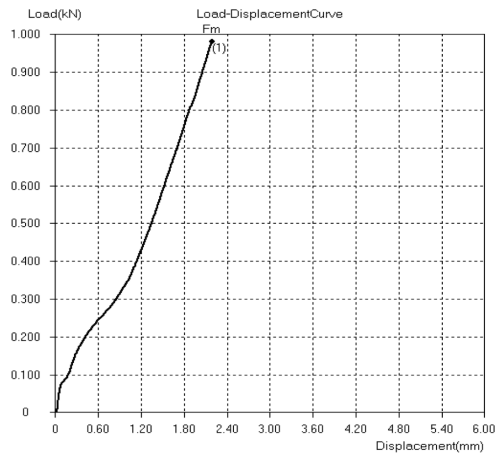
(b)



(c)

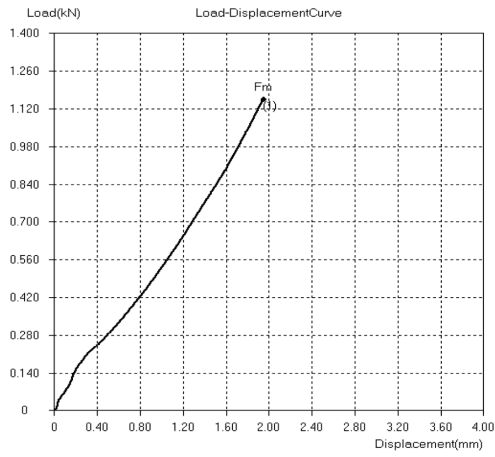


(d)

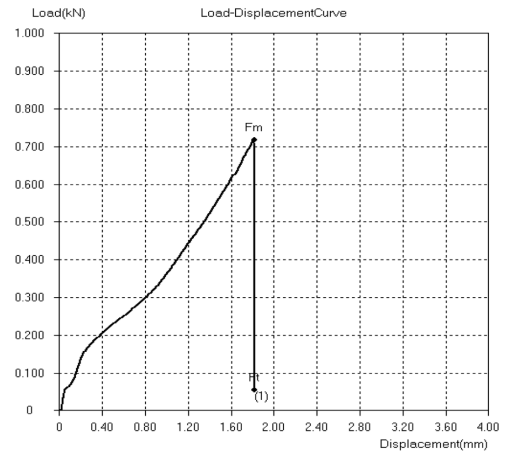


(e)

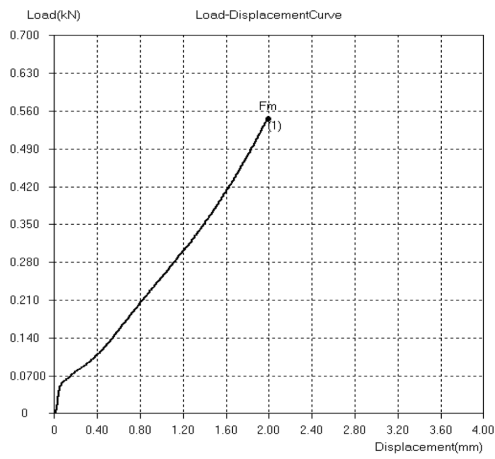
Figura B.4: Curva carga-desplazamiento para ensayo de tracción. Contenido de aserrín: 15%. Fuente: Elaboración propia.



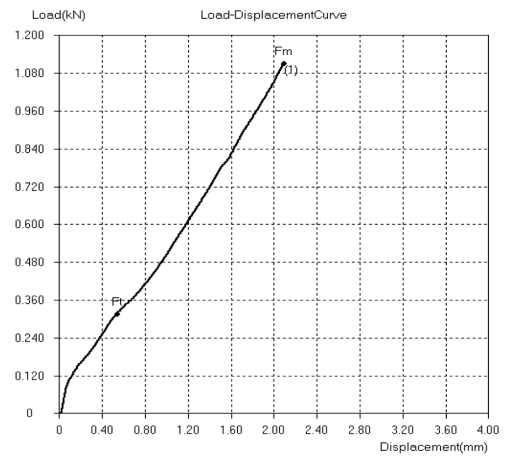
(a)



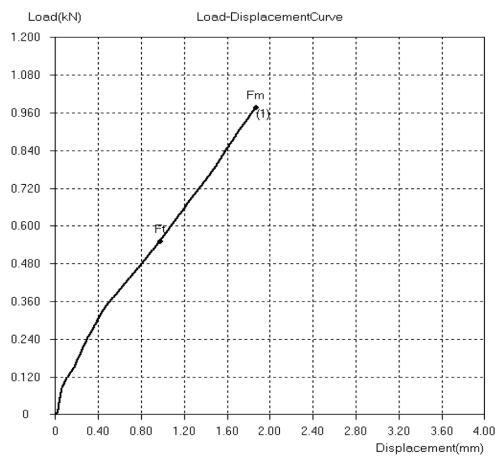
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura B.5: Curva carga-desplazamiento para ensayo de tracción. Contenido de aserrín: 20%. Fuente: Elaboración propia.

Apéndice C

Espesor y ancho de probetas para ensayo de flexión

Tabla C.1: Espesor y ancho de probetas para ensayo de flexión

N°	Espesor [mm]	Ancho [mm]
Contenido de aserrín: 0 %		
1	5,38	11,02
2	5,83	11,35
3	5,28	10,02
4	5,78	10,21
5	6,45	10,35
Contenido de aserrín: 5 %		
1	6,00	9,73
2	6,04	9,99
3	6,73	10,30
4	6,18	10,38
5	6,05	10,20
Contenido de aserrín: 10 %		
1	6,40	10,00
2	6,00	9,80
3	5,30	10,9
4	6,00	11,11
5	6,30	10,80

Fuente: Elaboración propia.

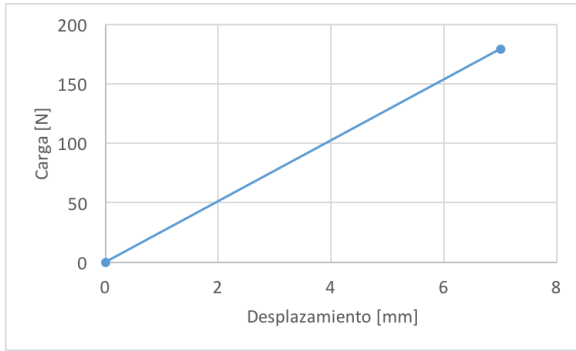
Tabla C.2: Tabla C.1: Espesor y ancho de probetas para ensayo de flexión (continuación)

Nº	Espesor [mm]	Ancho [mm]
Contenido de aserrín: 15 %		
1	6,63	10,47
2	6,42	10,63
3	7,23	10,70
4	7,68	11,26
5	6,64	9,41
Contenido de aserrín: 20 %		
1	6,00	11,00
2	6,60	10,10
3	6,80	10,00
4	6,40	10,60
5	7,40	10,00

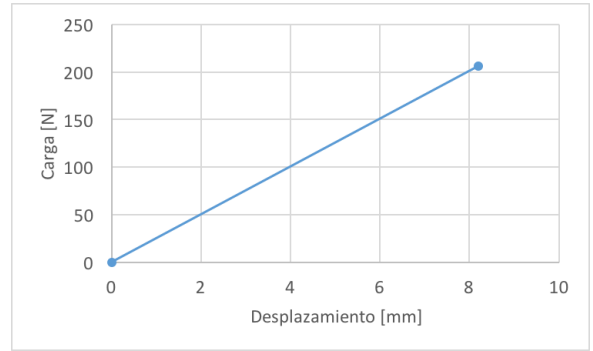
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice D

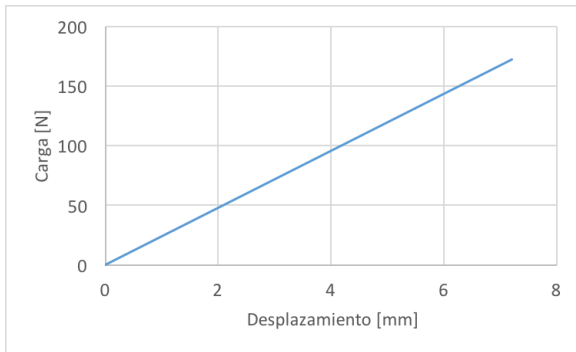
Diagrama carga-desplazamiento para ensayo de flexión



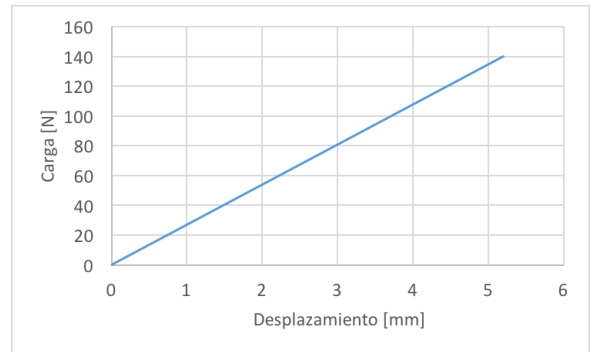
(a)



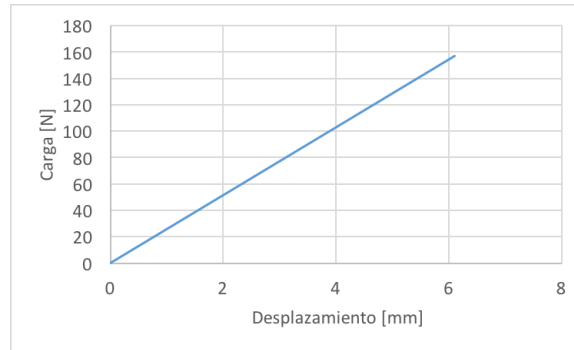
(b)



(c)

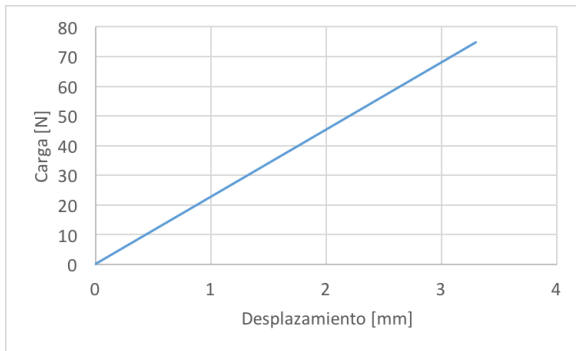


(d)

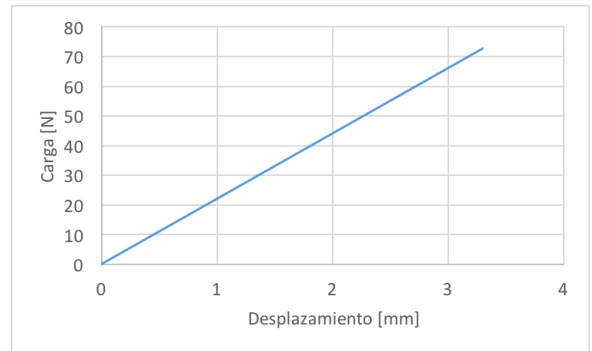


(e)

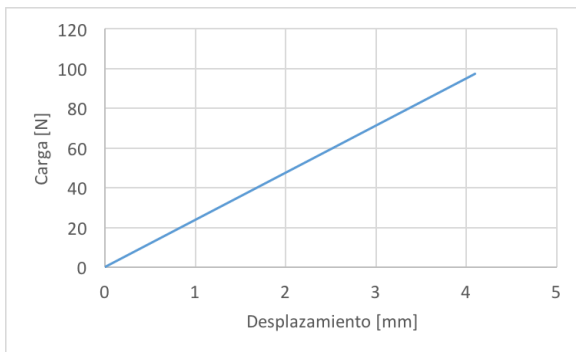
Figura D.1: Curva carga-desplazamiento para ensayo de flexión. Contenido de aserrín: 0%.
Fuente: Elaboración propia.



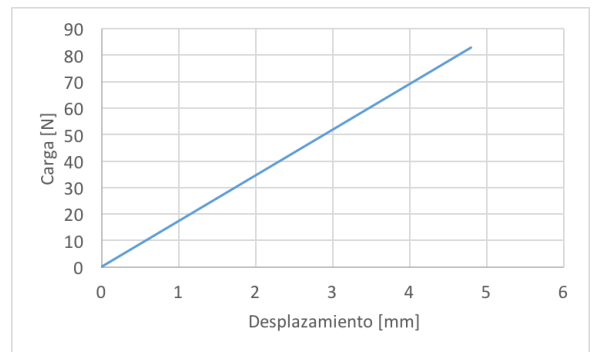
(a)



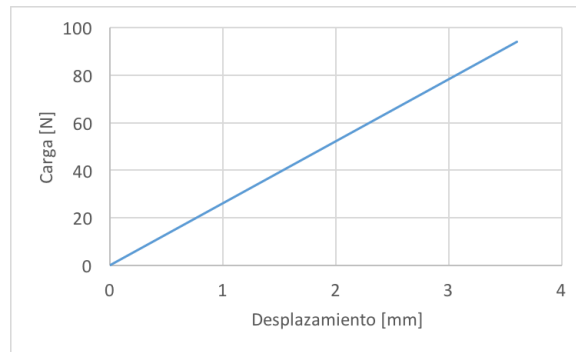
(b)



(c)

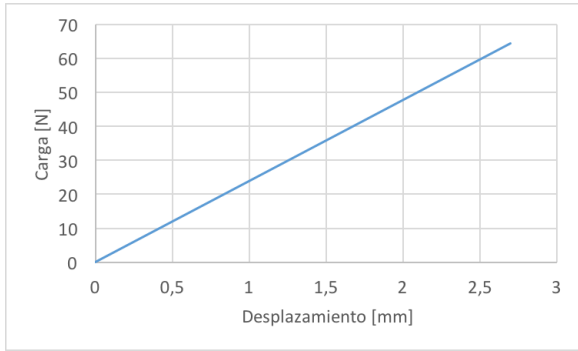


(d)

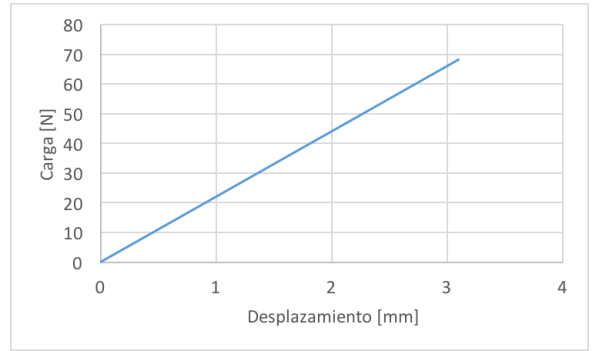


(e)

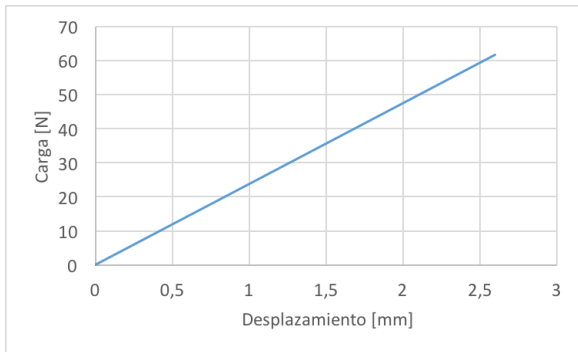
Figura D.2: Curva carga-desplazamiento para ensayo de flexión. Contenido de aserrín: 5%.
Fuente: Elaboración propia.



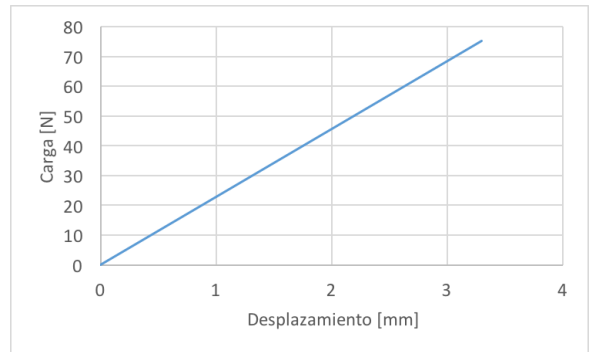
(a)



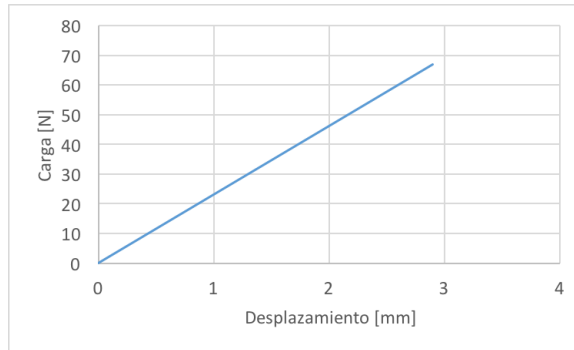
(b)



(c)

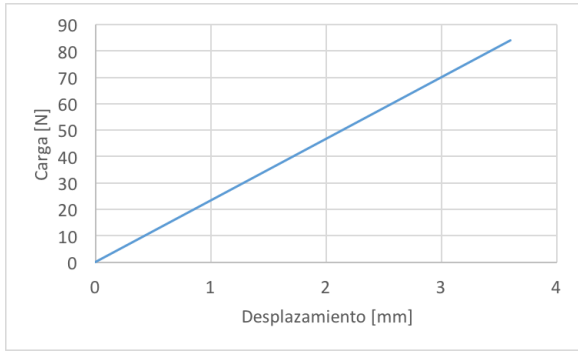


(d)

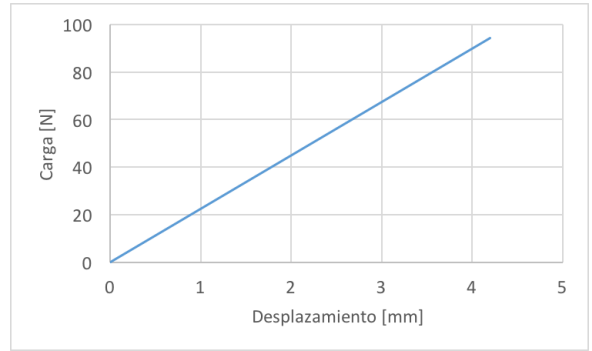


(e)

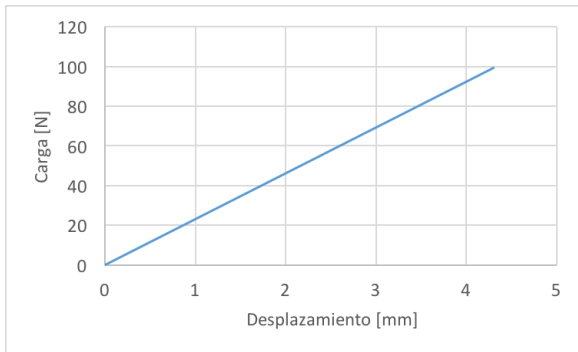
Figura D.3: Curva carga-desplazamiento para ensayo de flexión. Contenido de aserrín: 10%.
Fuente: Elaboración propia.



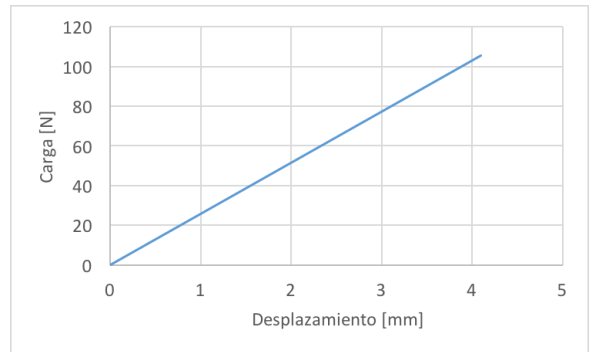
(a)



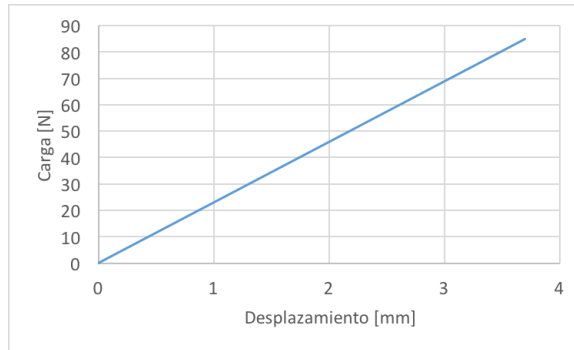
(b)



(c)

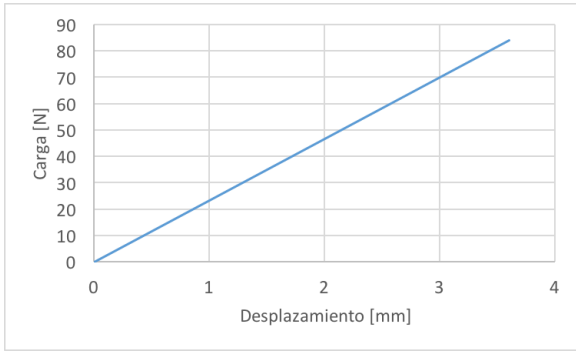


(d)

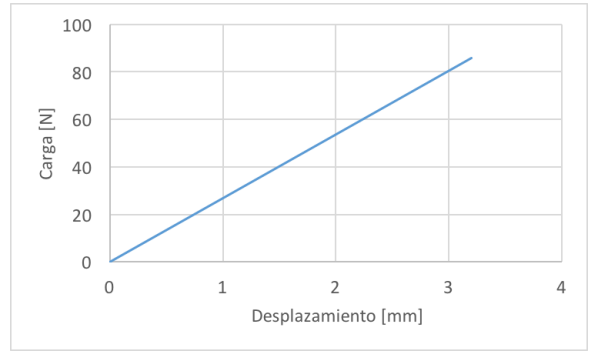


(e)

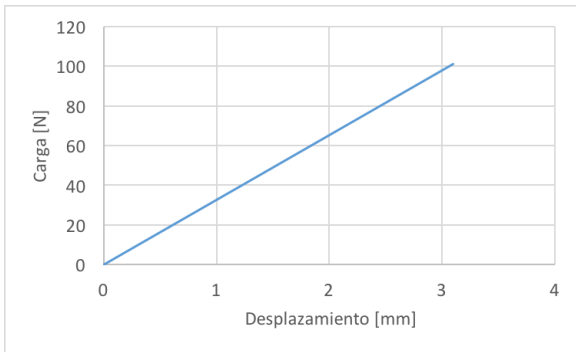
Figura D.4: Curva carga-desplazamiento para ensayo de flexión. Contenido de aserrín: 15%.
Fuente: Elaboración propia.



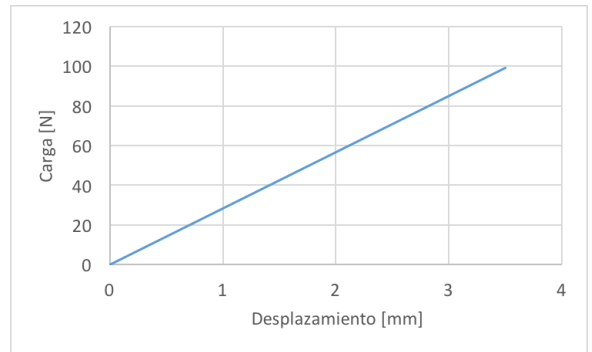
(a)



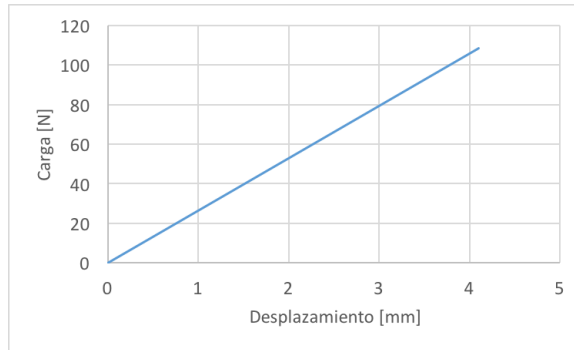
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura D.5: Curva carga-desplazamiento para ensayo de flexión. Contenido de aserrín: 20%.
Fuente: Elaboración propia.

Apéndice E

Espesor y ancho de probetas para ensayo de impacto

Tabla E.1: Espesor y ancho de probetas para ensayo de impacto

N°	Espesor [mm]	Ancho [mm]
Contenido de aserrín: 0 %		
1	6,4	13,4
2	6,3	12,8
3	6,4	12,3
4	6,5	1,25
5	6,85	13,35
Contenido de aserrín: 5 %		
1	7,2	13,1
2	7,25	13,15
3	7,15	12,7
4	7,2	13,6
5	7,1	13,1
Contenido de aserrín: 10 %		
1	7,3	12,65
2	7,3	13,1
3	7,1	12,9
4	7,0	12,5
5	6,95	12,6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla E.2: Espesor y ancho de probetas para ensayo de impacto

Nº	Espesor [mm]	Ancho [mm]
Contenido de aserrín: 15 %		
1	7,3	12,95
2	7,4	13,6
3	7,85	12,7
4	6,7	12,89
5	7,3	12,0
Contenido de aserrín: 20 %		
1	6,6	12,5
2	6,95	13,3
3	6,5	13,55
4	6,4	14,0
5	6,8	13,8

Fuente: Elaboración propia.